



## **SÄTEILYJÄÄHDYTTIMIEN MAHDOLLISUUDET RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYKSESSÄ JA ENERGIAN TUOTANNOSSA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

Santeri Nikulainen

Tarkastaja: TkT Markku Nikku

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Santeri Nikulainen

### **Säteilyjäähdyttimien mahdollisuudet rakennusten jäähdytyksessä ja energiantuotannossa**

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

35 sivua, 11 kuvaa ja 2 taulukko

Tarkastaja: Tkt Markku Nikku

Avainsanat: Säteilyjäähdytin, jäähdytys, lämpösäteily

Työssä käsitellään säteilyjäähdyttimien toimintaa ja niiden käyttökohteita.

Säteilyjäähdyttimet osoittautuivat korkean potentiaalinen kehityskohteeksi jäähdytyksen ja energiantuotannon saralla. Tämänhetkinen teknologia mahdollistaa energiansäästöjä ja energiatehokkuuden nostoja olemassa olevassa infrastruktuurissa ja prosesseissa. Ennen jäähdyttimien laajamittaista käyttöönottoa, tulee kuitenkin arvioida niiden taloudellista toteuttamiskelpoisuutta.

Työn yhteydessä tehty koe säteilyjäähdyttimellä osoitti sen toimivan vaihtelevissa sääolosuhteissa ja myös Suomen leveyspiireillä. Kokeen laitteen yksinkertaisella rakenteella ja helposti saatavilla materiaaleilla on mahdollista saada aikaan hyödyllinen lämpötilaero esimerkiksi rakennusten viilentämistarpeen alentamiseen. Paremmat tulokset vaativat kuitenkin parempaa suunnittelua ja/tai paremmin soveltuvia materiaaleja.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Santeri Nikulainen

### **The possibilities of radiative sky cooling in cooling of buildings and energy production**

Bachelor's thesis

2024

35 pages, 11 figures and 2 table

Examiner: Tkt Markku Nikku

Keywords: Radiative sky cooling, cooling, thermal radiation

The thesis deals with radiative sky coolers and their use cases.

Radiative sky coolers turned out to be high potential research target in the field of cooling and energy production. Current technology enables energy savings, and efficiency increases in existing infrastructure and processes. Before wide scale adoption of radiative sky coolers, their economic viability must be considered.

An experiment carried out with the thesis indicated that radiative sky coolers work in varying weather conditions and in the latitudes in which Finland is located. The device used in the experiment was of simple construction and made with easily acquirable materials. It shows that it is possible to achieve temperature reductions feasible to cool buildings for example. Better results however need better planning and/or better suited materials.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

|     |                   |                      |
|-----|-------------------|----------------------|
| $C$ | lämpökapasiteetti | J/K                  |
| $h$ | konvektiokerroin  | W/(m <sup>2</sup> K) |
| $k$ | lämmönjohtavuus   | W/(m K)              |
| $q$ | lämpövirta        | J/s                  |
| $T$ | lämpötila         | °C, K                |
| $U$ | Sisäenergia       | V                    |

### Kreikkalaiset

|            |                  |         |
|------------|------------------|---------|
| $\alpha$   | kohtauskulma     | °       |
| $\alpha$   | absorptiokerroin | kerroin |
| $\lambda$  | aallonpituus     | m       |
| $\epsilon$ | emissiivisyys    | kerroin |

### Vakiot

|          |                         |  |
|----------|-------------------------|--|
| $\sigma$ | Stefan-BolzmANNIN vakio | $5,67 \times 10^{-8}$ W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ) |
|----------|-------------------------|--|

### Lyhenteet

|        |   |
|--------|---|
| TEG    | Lämpösähköinen generaattori (Thermo-electrical generator)   |
| RC-TEG | Säteilyjäähdyttimen ja lämpösähköisen generaattorin konfiguraatio (Radiative cooling thermo-electrical generator) |
| SRC    | Valikoivan spektrin säteilijäähdytin (Selective radiative cooler)   |

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Johdanto.....  | 6  |
| 2   | Säteilyjäähdytin .....                                     | 7  |
| 2.1 | Lämpösäteily.....  | 7  |
| 2.2 | Lämpösäteilyn käyttäytyminen.....                          | 8  |
| 2.3 | Säteilyjäähdyttimen toiminta .....                         | 9  |
| 2.4 | Esimerkkejä säteilyjäähdyttimien toiminnasta .....         | 11 |
| 3   | Säteilyjäähdyttimen käyttö rakennusten jäähdytyksessä..... | 14 |
| 3.1 | Katto jäähdyttimenä.....                                   | 14 |
| 3.2 | Kylmäntuotto ilmastoinnille .....                          | 16 |
| 4   | Jäähdyttimien käyttö energiantuotannossa .....             | 1  |
| 4.1 | Aurinkopaneelien jäähdytys .....                           | 1  |
| 4.2 | Lämpövoimalaitoksen lauhduttimen tehostaminen .....        | 2  |
| 4.3 | Lämpösähköinen sähköntuotto .....                          | 4  |
| 5   | Jäähdyttimen prototyyppi .....                             | 6  |
| 5.1 | Rakenne .....  | 6  |
| 5.2 | Testaus .....  | 9  |
| 5.3 | Tulokset .....   | 11 |
| 6   | Johtopäätökset .....                                       | 14 |
|     | Lähteet .....  | 16 |

# 1 Johdanto

Säteilyjäähdytin on käsitteenä monelle tuntematon, vaikka sen toiminta perustuu hyvin yksinkertaiseen ilmiöön eli lämmön siirtymiseen säteilyn kautta. Tietyt sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudet voivat kulkea vaivatta ilmakehän läpi, joka mahdollistaa energian siirtämisen avaruuteen.

Sopivia materiaaleja säteilyjäähdyttimiin on etsitty jo vuosikymmeniä, mutta etsimisessä on lähinnä keskitytty yöllä tapahtuviin prosesseihin, auringonvaloa hyvin heijastavien materiaalien puutteen vuoksi. Lähiaikoina tapahtuneet materiaalitekniset kehitykset ovat kuitenkin mahdollistaneet päiväsaikaan tapahtuvan passiivisen jäähdyttämisen alle ympäristön lämpötilan. Tämä mahdollistaa merkittävän energiansäästön ilmastoinnissa ja jäähdyttämisessä erityisesti kuumilla alueilla, sillä päiväsaikaan jäähdytykselle on enemmän tarvetta kuin yöllä. (Aili et al., 2019)

Auringonvalossa tapahtuvalla passiivisella jäähtymisellä on kuitenkin monia muitakin mahdollisuuksia tehostaa energiatekniikan kannalta keskeisiä prosesseja, kuten erityyppisten auringonvoimaloiden toimintaa. Säteilyjäähdyttimillä luodun passiivisen kylmävaraston ja maan lämpötilaerosta pystyisi jopa keräämään energiaa lämpövoimakoneilla ilman polttoainekustannuksia. Tämänkaltaisen teknologia vaatii kuitenkin paljon jatkokehitystä ennen kuin siitä pystyy hyödyntämään. (Sun et al., 2017)

Aili, Yin ja Yang, (2021) tutkimuksen mukaan vuosittainen nettojähdytysteho Suomessa on noin  $30 \text{ W/m}^2$ , joka on huomattavasti vähemmän kuin lämpimimmillä alueilla lähempänä kääntöpiirejä. Talvisin Suomessa ympäristön lämpötilan ollessa alhainen ja jäähdytystarpeen ollessa minimaalinen, säteilyjäähdyttimillä on rajoitetusti käyttökohteita. Kesäisin jäähdyttimet voivat kuitenkin tuoda huomattavia mahdollisuuksia energiatekniikan sovelukseen.

## 2 Säteilyjäähdytin

Säteilyjäähdyttimet toimivat nimensä mukaisesti säteilemällä jäähdyttimen lämpöenergiaa ulos laitteesta. Jäähdyttimet käyttävät hyväkseen kapeaa aallonpituusaluetta, jonka alueella sähkömagneettisen säteilyn läpäisevyys ilmakehässä on korkea. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi lämpösäteilyn käyttäytymistä ja miten se mahdollistaa säteilyjäähdyttimen toiminnan.

### 2.1 Lämpösäteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, joka aiheutuu aineosien kyvystä vaihtaa energiatasoaan. Mikroskooppiset energiatason muutokset johtuvat aineen lämpöliikkeestä, jolloin kaikki aineet, joiden lämpötila on suurempi kuin 0 K, emittoivat jatkuvasti lämpösäteilyä. (Sandip ja Modest, 2022) Aineen tuottama lämpösäteily on verrannollinen aineen lämpötilan neljänteen potenssiin, Stefan-Boltzmannin-lain kuvaamana,

$$q = \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

jossa  $q$  on säteilyvuo,  $\epsilon$  aineen emissiivisyys,  $\sigma$  Stefan-Boltzmannin vakio ja  $T$  aineen lämpötila kelvineinä. (Sun et al., 2017)

Lämmön siirto säteilemällä eroaa muista lämmönsiirron menetelmistä, konvektiosta ja johtumisesta, parillakin tapaa. Lämmönsiirtoa johtumisen kautta kuvaa Fourierin laki,

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

jossa  $q_x$  on lämpövuo  $x$ :n suunnassa,  $T$  on lämpötila ja  $k$  on lämmönjohtavuus väliaineessa. Konvektiossa siirtyvää lämpötehoa taas kuvaa yhtälö,

$$q = h(T - T_\infty) \quad (3)$$

jossa  $q$  on lämpövirta,  $h$  on konvektiokerroin,  $T$  pinnan lämpötila ja  $T_\infty$  fluidin lämpötila. Vertaamalla yhtälöitä huomaamme säteilylämpötehon kasvavan nopeasti lämpötilan suuren- tuessa. Konvektiivisen lämmönsiirron ja johtumisen kertoimet voivat muuttua hieman lämpötilan muuttuessa, mutta usein muutos ei ole merkityksellinen ja lämpötehon voikin olettaa

kasvavan lineaarisesti lämpötilaeron kanssa. Näin voimme huomata säteilylämmönsiirron olevan voimakkain lämmönsiirtomuoto hyvin korkeilla lämpötiloilla. Tämän tutkielman tarkoituksena ei kuitenkaan ole tarkastella säteilyjäähdytystä korkeilla lämpötiloilla vaan mahdollisesti ympäristöä matalammilla lämpötiloilla. Tämä ilmiö vaatii tiettyjä ominaisuuksia jäähdyttävältä kappaleelta ja sen mahdollistaa lämpösäteilyn olevan sähkömagneettista säteilyä, joka ei vaadi väliainetta liikkuakseen. (Sandip ja Modest, 2022)

Lämpösäteilyksi luokitellaan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudet ( $\lambda$ ) 0,1  $\mu\text{m}$  ja 100  $\mu\text{m}$  välillä. Tähän skaalaan kuuluvat näkyvä valo sekä osa ultravioletin ja infrapunon aallonpituuksista. Koska eri aallonpituuksiset säteilyt siirtävät todella erisuuren määrän energiaa, ne myös käyttäytyvät eri tavoin. Eri aineiden käyttäytymistä sähkömagneettisen säteilyn kanssa voidaan mitata juuri aallonpituuden avulla. (Sandip ja Modest, 2022)

## 2.2 Lämpösäteilyn käyttäytyminen

Sähkömagneettinen säteily, joka kulkee väliaineesta toiseen voi heijastua osittain tai kokonaan. Se osa säteilyä, joka ei heijastu väliaineiden rajapinnasta läpäisee toisen väliaineen tai absorboituu siihen. Mikäli säteily kulkee väliaineen läpi, on väliaine läpinäkyvä sen tyyppiselle säteilylle. Osittain läpinäkyvät aineet päästävät läpi hieman säteilyä ja läpinäkymättömät taas eivät yhtään. Aineen läpinäkyvyys riippuu materiaalista sekä sen paksuudesta. Myös tavallisesti läpinäkymättöminä materiaaleina pidetyt aineet voivat päästää lävitse tietyn aallonpituuksista säteilyä. Läpinäkymättöminä aineina pidetyt materiaalit voivat päästää läpi säteilyä myös, kun väliaineena toimiva materiaali on tarpeeksi ohut. (Sandip ja Modest, 2022)

Läpinäkyvyys on eri säteilyn eri aallonpituuksille. Esimerkiksi lasi on hyvin läpinäkyvä näkyvän valon aallonpituuksille, mutta taas heijastaa lähes kaikki pidemmistä aallonpituuksista. Samoin tavoin läpinäkymättömät kappaleet absorboivat ja heijastavat eri pituuksista säteilyä eri tavoin. Eri materiaalit sopivat siis eri tavoin lämpösäteilyyn liittyviin sovelluksiin. Esimerkiksi kiiltävä läpinäkymätön pinta toimii hyvin eristämään lämpösäteilyä, sillä se heijastaa suuren osan siihen osuvasta säteilyä. Tämä tarkoittaa materiaalin absorptiokykyyn olevan pieni. Täydellisen musta kappale on teoreettinen kappale, joka ei heijasta säteilyä ja se absorboi kaiken siihen osuvan lämpösäteilyn. Sillä on siis hyvä absorptiokyky.

Musta kappale on myös täydellinen emittoija, joka emittoi lämpösäteilyä kaikilla aallonpituuksilla teoreettisella maksimiteholla. (Sandip ja Modest, 2022)

Kirchoffin säteilylain mukaan aineen emissiivisyys ja absorptiokerroin ovat normaalisti yhtä suuria.

$$\epsilon = \alpha \quad (4)$$

Kappale siis lähettää ja vastaanottaa lämpösäteilyä yhtä herkästi. Emissiivisyys ei kuitenkaan ole vakio kaikilla aallonpituuksilla, jolloin tietyt aallonpituudet voivat absorboitua kappaleeseen ja toiset heijastua. Eri materiaalien absorptiokertoimet ovat myös erilaisia, jolloin yhden kappaleen lähettämä säteily voi heijastua kokonaan toisen kappaleen pinnasta. Sama pätee kaasuihin, jotka absorboivat tietyn aallonpituuksista säteilyä ja ovat läpinäkyviä toisilla aallonpituuksilla. (Sandip ja Modest, 2022)

### 2.3 Säteilyjäähdyttimen toiminta

Säteilyjäähdyttimet, jotka viilenevät alle ympäristön lämpötilan saattavat vaikuttaa rikkovan fysiikan lakeja, mutta tosiasiaassa ne vain hyödyntävät säteilyn ominaisuuksia perustavanlaatuisella tavalla.

Kappale, joka luovuttaa ympäristöönsä enemmän lämpöenergiaa kuin saa sitä takaisin, jäähtyy. Tätä sisäenergian muutosta kuvaa yhtälö,

$$\Delta U = E_{\text{sisään}} - E_{\text{ulos}} \quad (5)$$

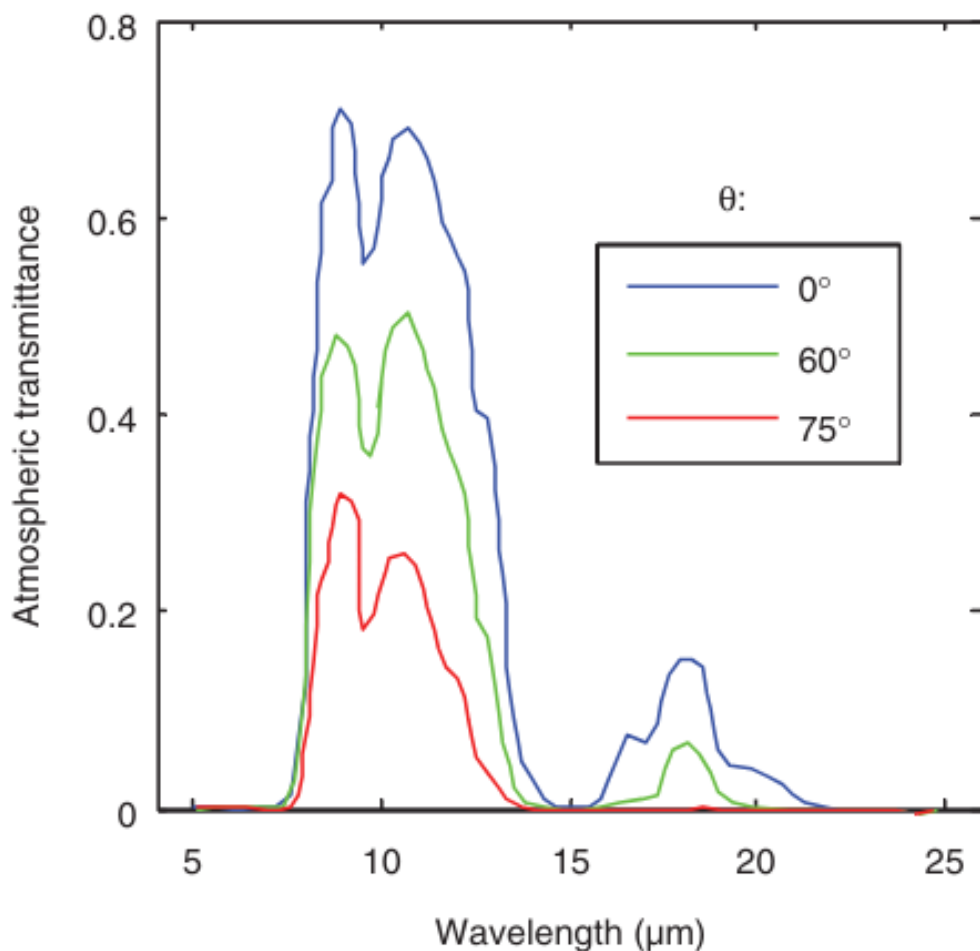
jossa  $U$  on sisäenergia ja  $E$  energia sisään tai ulos alaindeksin mukaan. Kappaleen lämpötilan muutos  $\Delta T$  saadaan selville jakamalla sisäenergian muutos kappaleen lämpökapasiteetilla  $C$ .

$$\Delta T = \frac{\Delta U}{C} \quad (6)$$

Aiemmassa kappaleessa tuli ilmi lämmön siirtyvän kolmella tavalla, johtumalla, konvektioitumalla ja säteilemällä. Koska lämpö siirtyy lämpimästä kylmään, tasaten lämpötilaeroja, ovat johtuminen ja konvektio säteilyjäähdyttimelle haitallista. Siksi säteilyjäähdyttimen energiavirtoja muutoin kuin säteilemällä pyritään minimoimaan. Säteily taas viilentää kappaleen ja toimii hyödyllisenä energiavirtana jäähtymisessä, sillä pääasiallinen

lämmönvaihdon kohteena oleva kohde on avaruus, jonka lämpötila on huomattavasti alhaisempi, kuin maan pinnan.(Liu et al., 2023)

Kappale, joka säteilemällä jäähtyy alle ympäristön lämpötilan, hyödyntää ilmakehän läpinäkyvyysikkunaa. Pääasiallinen läpinäkyvyysikkuna (Kuva 1) on aallonpituudeltaan 8–13  $\mu\text{m}$ , jonka alueella lämpösäteilyn absorboituminen ilmakehään on vähäistä, eli säteilyn läpäisykyky näillä aallonpituuksilla on suuri. Tämä tarkoittaa myös, ettei ilmakehä juurikaan emittoi sen aallonpituuksista säteilyä.(Sun et al., 2017)



Kuva 1. Ilmakehän läpäisy suhde zenittikulmilla  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ , ja  $75^\circ$ . (Sun et al., 2017)

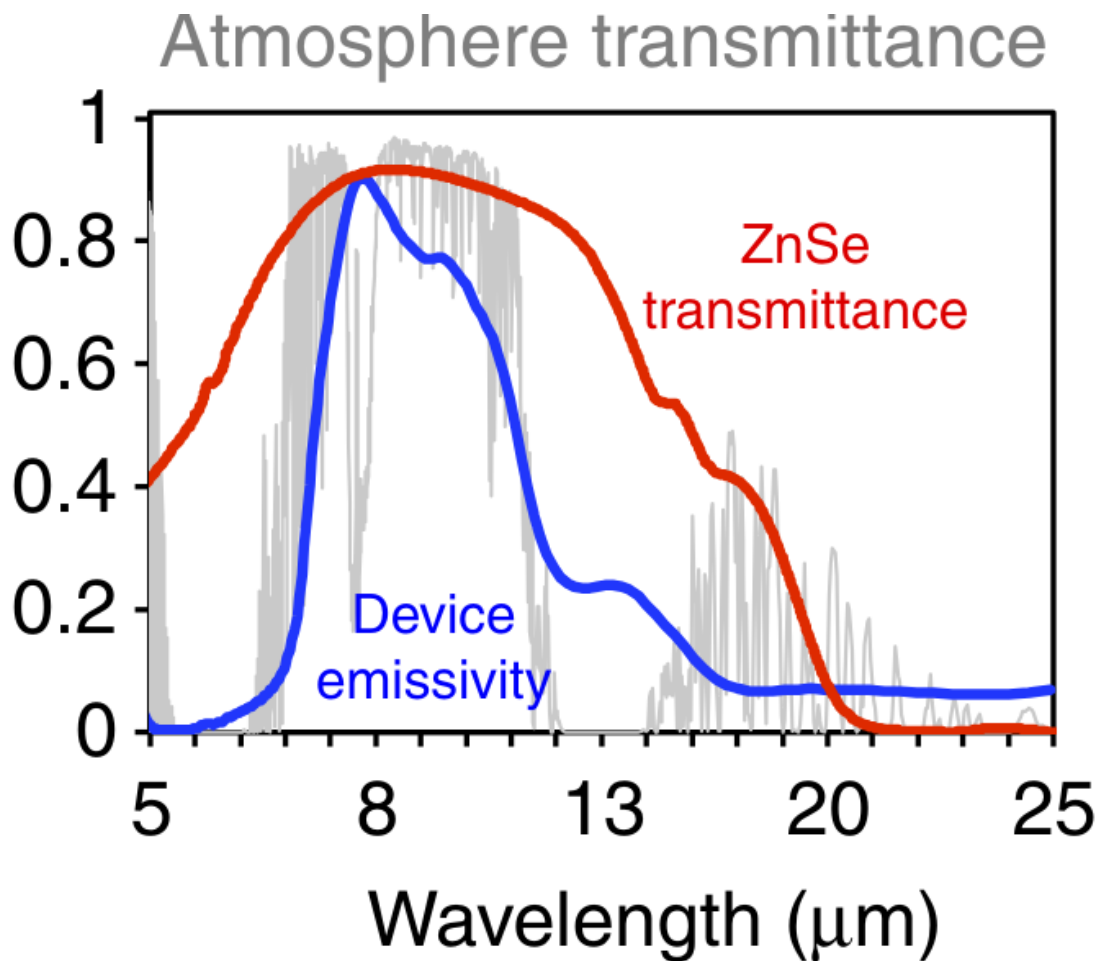
Läpinäkyvyysikkuna muodostuu aallonpituusalueelle, jolla ilmakehän pääasiallisten absorboijien, vesihöyryn ja hiilidioksidin, absorptiokyky on pieni. (Sun et al., 2017) Siksi ilmakehän läpäisykerroin riippuukin ilmakehän hetkellisistä tapahtumista ja on herkkä ilmakehän kosteuspitoisuudelle. Nestemäinen ja kiinteä vesi absorboi ja heijastaa kuitenkin paljon voimakkaammin kuin vesihöyry. Tämän voi huomata vertaamalla pilvettömien ja

pilvisien öiden lämpötiloja. Pilvisinä öinä lämpötila laskee usein vähemmän pilvettömiin verrattuna, sillä lämmönsiirto avaruuden kanssa on rajoitetumpaa. (Wong et al., 2023) Säteilyjäähdyttimien käyttöä energiantuotannossa koskee siis samankaltainen ongelma kuin aurinkopaneeleita. Rakennusten jäähdyttäminen ei kuitenkaan luo yhtä merkittävää ongelmaa, sillä jäähdytysenterve on pienempi, kun pilvet varjostavat aurinkoa.

#### 2.4 Esimerkkejä säteilyjäähdyttimien toiminnasta

Valikoivan säteilyjäähdyttimen (SRC) (engl. selective radiative cooler) jäähdytyskyky riippuu sen kyvystä emittoida voimakkaasti juuri läpinäkyvyysikkunan aallonpituuksista säteilyä, sekä pienestä absorptiokertoimesta muun säteilyn aallonpituuksilla. (Chen et al., 2016) Tekemässä tutkimuksessa kyseisenlainen säteilyjäähdytin kykeni viilenemään huomattavasti ympäristön lämpötilan alapuolelle. Tutkimustuloksien maksimi oli 42 °C alle ympäristön lämpötilan ja teoreettinen maksimi samankaltaiselle jäähdyttimelle olisi jopa 60 °C alle ympäristön lämpötilan.

Jäähdyttimen säteilijänä toimi piinitridistä ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) muodostettu 70 nm paksuinen levy, jonka emittoima spektri keskittyi ilmakehän pääasiallisen läpinäkyvyysikkunan kohdalle. (kuva 2.) Jäähdytin eristettiin ympäristöstä tyhjiöllä, jonka takia laitteen yläosassa tuli olla lämpösäteilyä läpäisevä ikkuna, joka kestää ilmanpaineen aiheuttaman rasituksen. Tutkimuksessa päädyttiin sinkin ja seleenin yhdisteeseen, joka absorboi heikosti ilmakehän läpäisevillä aallonpituuksilla ja vahvasti muilla aallonpituuksilla (kuva 2), muodostaen näin suurimman osan tulevasta säteilystä absorboivan konvektiosuojan. Materiaalivalinta ei kuitenkaan ollut sovelias muuhun kuin tutkimukseen sen korkean hinnan vuoksi. Tutkimuksessa ehdotetaan kaupalliseen tarkoitukseen soveltuvina materiaaleina silikonia tai germaniumia, jotka ovat läpinäkyviä ilmakehän pääasiallisen läpinäkyvyysikkunan alueella. (Chen et al., 2016)



Kuva 2. Valikoivan säteilijän spektri. (Chen et al., 2016)

Myös mustaa kappaletta voidaan käyttää säteilyjäähdyttimenä ja jäähdyttimen lämpötilan ollessa yli ympäristön lämpötilan, sen jäähdytysteho säteilemällä on huomattavasti suurempi kuin edellä mainitulla valikoivalla säteilyjäähdyttimellä. Mustan kappaleen jäähdytyskyky kuitenkin rajoittuu jokseenkin lähelle ympäristön lämpötilaa. (Sun et al., 2017) Ideaalisen mustan kappaleen jäähdytysteho on arvioiden mukaan yhtä suuri kuin ideaalisen valikoivan jäähdyttimen noin 5 °C ympäristön lämpötilaa alemmassa lämpötilassa. Tästä lämpötilasta alaspäin mentäessä musta kappale menettää jäähdytystehonsa nopeasti, sillä se vastaanottaa ympäröivän ilmakehän säteilyä voimakkaasti. Musta kappale myös lämpenee auringonvalossa tehokkaasti (Raman et al., 2014), eikä siksi ole sopiva viilentämiseen esimerkiksi pinnotteena, vaan mustan kappaleen käyttö jäähdyttämiseen vaatii varjostimen tai hyvin korkean lämpötilan. (Chen et al., 2016)

Bhatia et al., (2018) tutkimuksessa demonstroititiin zeniittiin osoittavan jäähdyttimen jäähdytystehoa vertailemalla auringonvalolle mustan, sekä auringonvalolle valkoisen elementin

jäähdytystehoa samoissa olosuhteissa samanlaisten laitteiden sisällä. Säteilijät olivat mustaksi ja valkoiseksi maalattua kuparia. Niitä varjostettiin Auringon eteen laitettavalla heijastimella. Tutkimuksessa konvektio minimoitiin nanoreiällisellä polyetyleenilevyllä, joka myös osittain heijasti diffuusia auringonvaloa. Tutkimuksessa kappaleet pysyivät tasaisesti noin 6 °C ympäristön lämpötilan alapuolella, valkoinen kappale kuitenkin hieman viileämpänä. Tutkimus osoitti diffuusin auringonvalon luovan energiavirran kappaleisiin ja pienentämällä tätä esimerkiksi valkoisella säteilijällä pystytään tutkimuksen mukaan saavuttamaan noin 20 W/m<sup>2</sup> suurempi jäähdytysteho kuin mustalla. Tutkimuksessa myös osoitettiin miten viilentämiseen hyödyllinen lämpötilaero kyettiin tuottamaan helposti saatavilla olevista materiaaleista.

### 3 Säteilyjäähdyttimen käyttö rakennusten jäähdytyksessä

Säteilyjäähdyttimiä voidaan käyttää monenlaisissa käyttökohteissa. Matalan lämpötilaeron ympäristöön vaatimat sovellukset ovat kuitenkin huomattavasti helpommin saavutettavissa, kuin korkea lämpötilaeroa vaativat. Matala lämpötilaero voidaan saavuttaa esimerkiksi maaleilla tai pinnoitteilla, jotka ovat omiaan täyttämään esimerkiksi rakennusten jäähdytystarvetta.

Ilmastointi kattaa noin 10 % maapallon sähkönkulutuksesta ja sen osuuden arvioidaan nousevan ilmastonmuutoksen myötä. Rakennusten viilentäminen on siis suuri hiilidioksidipäästöjen aiheuttaja, sillä yli 67 % maailman sähköstä tuotetaan fossiililla polttoaineilla. Alentamalla tätä energiankulutusta passiivisilla materiaaliratkaisuilla, päästöjä voitaisiin vähentää huomattavasti. (Aili et al., 2024)

#### 3.1 Katto jäähdyttimenä

Aili et al., (2024) artikkelissa arvioidaan (suom.) ”paranneltujen viileäkattojen” olevan artikkelissa esitellyistä käyttökohteista kypsä. Nämä viileäkatot ovat osoittautuneet matalan kynnyksen käyttökohteiksi, sillä yleisillä ja halvoilla materiaalivalinnoilla rakennuksen katoissa, voidaan saada aikaan suuri hyöty energiansäästössä. Yksinkertaisin tapa vähentää rakennusten lämpenemistä on heijastaa tuleva auringonvalo niin, ettei se absorboitu rakennukseen. Tästä syystä useissa Välimeren kaupungeissa rakennukset maalataan vaaleiksi.



Kuva 3. Panoraamakuva Oia, Santorini. (Chernov, 2013)

BBC:n mukaan valkoiseksi maalatut katot voivat laskea sisälämpötiloja 2–5 celsiusastetta, sekä maailmanlaajuinen heijastavien kattojen käyttö voisi vähentää hiilidioksidipäästöjä jopa 24 gigatonnia. Valkoisten kattojen käyttö on myös halpa ratkaisu. Kalkkikivestä valmistettu maali heijastaa riittävästi aiheuttaakseen energiasäästöjä. (Reality check team BBC news, 2019) Maalia itsessään ei kuitenkaan voida luokitella säteilyjäähdyttimeksi, sillä sen jäähdytysteho perustuu vain auringonvalon heijastamiseen, eikä lämpösäteilyn emissioon.

Kiinan Chongqingissa tehdyssä tutkimuksessa ilmeni kerrostalon energiankulutuksesta noin 5–10 % aiheutuvan katon lämpökuorman kompensoinnista. Ylimmässä kerroksessa viilentämiseen käytetty energia saattaa olla yli 40 % kokonaisenergiankulutuksesta. Koko kerrostalon prosenttiosuus tietysti vaihtelee kerroksien määrän mukaan, jolloin matalissa taloissa energiankulutus on suurempaa kerrosta kohden. Tutkimuksessa vertailtiin mustan, valkoisen ja puutarhakaton energiankulutusta. Musta kattoon verrattuna valkoinen katto tuotti lähes 8 % energiansäästön vuositasona. Puutarhakatto tuotti paremman eristyksen, mutta kokonaisenergiankulutus mustaan kattoon verrattuna oli vain noin 1 % alhaisempi. (Gao et al., 2017)

Suurempien energiansäästöjen saavuttamiseksi tarvitaan materiaaleja, jotka emittoivat vahvasti ilmakehän läpinäkyvyysikkunan alueella. Wang, N. et al., (2022) tutkimuksen kohteena käytettiin noin 8200 m<sup>2</sup> jäähdytettyä varastorakennusta, joka kulutti tutkimuksen aikana päivittäin noin 450 kWh sähköä viilentämään rakennusta. Katto lämpeni auringonvalossa noin 55 °C asteiseksi. Asentamalla säteilyjäähdytinkalvo jo olemassa olevan teräskaton päälle, katon pinnan lämpötilaa pystyttiin laskemaan noin 20 °C. Tämän ansiosta ilmastonin sähkönkulutus väheni 44 % ja rakennus pysyi viileämpänä kuin aikaisemmin.

Viileäkatot sellaisenaan ovat kuitenkin soveliaita vain alueille, joissa vuoden lämmitystarve on alhainen, tai sitä ei ole. Esimerkiksi Suomen olosuhteisiin sovellus ei olisi käytännöllinen, sillä katto aiheuttaisi suuremmat lämmityskustannukset talvella. Riskinä on myös kosteuden tiivistyminen katon rakenteisiin, ja siitä johtuva homeen muodostuminen. (Reality check team BBC news, 2019)

### 3.2 Kylmäntuotto ilmastoinnille

Säteilyjäähdyttimiä voidaan käyttää myös aktiiviseen jäähdyttämiseen. Yhdistettynä ilmastointilaitteisiin, voidaan eliminoida edellä mainitun viileäkaton heikkous jäähdyttää myös silloin, kun jäähdyttämistä ei tarvita. Säteilyjäähdyttimiä voidaan käyttää suoraan jäähdyttämään ilmanvaihtokoneen tuloilmaa, tai viilentämällä lämpöpumpun lauhdutinta parantaen näin sen hyötysuhdetta. Nämä viilennystavat aktiivisina kuitenkin kuluttavat energiaa vähintäänkin kiertoaineen liikuttamiseen.

Zhao, D. et al., (2019) demonstroivat kylmäntuottoa rakentamalla kilowatin tehoisen jäähdyttimen Coloradon yliopiston insinöörikeskuksen katolle. Jäähdytin koostui 10 kennosta ja sen kokonaispinta ala oli 13,5 m<sup>2</sup>. Kennot koostuivat polykarbonaatista valmistetuista vesiasioista, joiden yläpuolella oli säteilyjäähdytinosa. Itse säteilyjäähdytin koostui hopeasta tehdystä heijastimesta ja polymeeripohjaisesta kalvosta, joka toimi laitteen säteilijänä. Laite eristettiin ympäristöstä polyisosyanuraattikuorella ja etyleenikalvolla, joka toimi konvektiosuojana.

Jäähdyttämällä kiertoainetta (vettä) 26,5 l/h virtauksella keskimäärin 3,1 °C alle ympäristön lämpötilan, laitteella pystyttiin saavuttamaan noin 1300 W jäähdytysteho öisin. Alimmillaan eli päivisin keskipäivän jälkeen laitteen teho oli noin 600 W. Lämpötilan noustessa päivisin yli 30 °C tällä kokoonpanolla laitetta voidaan käyttää vain lämpöpumpun yhteydessä riittävän viilennyksen aikaansaamiseksi. Laitteella kuitenkin pystyttiin jäähdyttämään vettä stationääritilassa jopa 10,6 °C alle ympäristön lämpötilan. Näin suurella lämpötilaerolla laitteesta saatava teho on kuitenkin lähes nolla.

Tutkimuksella osoitettiin, että energiasäästöjä voidaan saada aikaan yleisistä helposti saatavista materiaaleista koostuvilla säteilyjäähdyttimillä. Tutkimuksessa jäähdytysteho oli

päiväsaikaan kuitenkin riittämätön ja yöaikaan tarpeeton, joten tutkimuksessa ehdotettiin sen yhdistämistä kylmävarastoon, jolloin yöaikana tuotettu ylimääräteho saataisiin talteen.

Kylmän varastointi tuo muutamia haasteita ja huomioon otettavia seikkoja, mutta myös mahdollisuuksia yhdistää useissa rakennuksissa jo olevia resursseja, kuten Kiyae et al., (2022) tuovat artikkelissaan ilmi. Artikkelissaan he huomioivat aurinkopaneelien yleensä omaavan korkean emissiivisyyden infrapunaa aallonpituuksilla, jolloin ne yleensä viilenevät yöllä mustan kappaleen tavoin jopa 11 celsiusastetta alle ympäristön lämpötilan. Artikkelissa kuitenkin huomattiin keskimääräisen tuotetun kylmän lämpötilan olevan korkeampi, kuin alhaisin yön ympäristön lämpötila, jolloin eristämättömän varaston lämpötila voitaisiin minimoida vain luonnollisella jäähtymisellä.

Mikäli luonnollinen jäähtyminen ei kuitenkaan ole riittävän tehokasta, voidaan tätä sovelusta käyttää viilentämään kylmävarastoa. Tätä viilentämiskykyä voitaisiin käyttää hyödyksi kohteissa, joissa kylmävaraston ei tarvitse olla kovinkaan viileä antamaan merkittävää hyötyä, kuten esimerkiksi lämpöpumppujen kylmävarastona.

Kylmän varastointi suoran ilmastoinnin käyttöön tuo kuitenkin haasteita, joita lämpöpumppuja apuna käyttämisessä ei ilmene. Lämpöpumppua käytettäessä, kylmävaraston tulee olla viileämpi, kuin ulkoilma mahdollistaakseen energiansäästön ja pitääkseen tasaisen lämpötilan rakennuksessa. Tähän tarkoitukseen sopii esimerkiksi yksinkertainen vesisäiliö. Suorassa säteilyjäähdytteisessä ilmastoinnissa kylmävaraston lämpeneminen heikentää lämmönsiirtoa jäähdytysnesteeseen, joka nostaa tuloilman lämpöä, heikentäen näin kylmän varastoinnista saatavaa hyötyä.

Kylmää voidaan varastoida myös olomuodon muutokseen, joka mahdollistaa tasaisen sisäntulolämpötilan ilmanvaihdolle, poistaen näin lämpöpumpun tarpeen viilennykseen. Kiyae et al., (2022) ehdottavat varastointimallia artikkelissaan. Olomuodon muutokseen perustuva kylmävarasto tuo monenlaisia etuja tavalliseen nähden. Varaston fyysinen koko voi olla pienempi, sillä olomuodon muutos varaa paljon energiaa. Varaston lämpötila voi niin ikään myös olla lähempänä haluttua käyttölämpötilaa eli korkeampi, sillä lämpötila ei muutu olomuodon muutoksen aikana. Korkeamman lämpötilan ansiosta, säteilyjäähdyttimestä on mahdollisuus saada suurempi teho. Haittapuolena mainittakoon monimutkaisuus ja siitä johtuvat lisäkustannukset.

## 4 Jäähdyttimien käyttö energiantuotannossa

Säteilyjäähdyttimien käyttö energiantuotannossa keskittyy lähtökohtaisesti olemassa olevien ratkaisujen kehittämiseen. Säteilyjäähdyttimen viilentämisteho pienenee mitä kylmempää yritetään saada aikaan, jolloin Carnot'n lämpövoimakoneen hyötysuhteen kaavan (1) mukaista korkeampaa hyötysuhdetta tavoiteltaessa, jäähdyttimen kokonaisteho laskee.

$$\eta = 1 - \frac{T_{kylmä}}{T_{kuuma}} \quad (1)$$

Säteilyjäähdyttimillä voidaan helpommin tehostaa lämmönpoistoa prosessista, jolloin suhteellisen pienellä lämpötilaerolla voidaan saada suuri vaikutus aikaan.

### 4.1 Aurinkopaneelien jäähdytys

Aurinkopaneelit pystyvät muuntamaan auringonvaloa suoraan sähköksi. Niiden muunnostehokkuus on kuitenkin vain 20–30 %. Nykyiset silikonipohjaiset aurinkopaneelit absorboivat kuitenkin jopa 90 % auringon säteilystä, jolloin noin 60 % säteilystä vain lämmittää aurinkopaneelia. (Zhao, B. et al., 2022) Lämpeneminen heikentää paneelin kykyä tuottaa sähköä ja tarpeeksi suurissa lämpötiloissa voi johtaa pysyvään tehonmenetykseen tai hajoamiseen. (Al-Ahmed, 2022)

Silikonista valmistettujen aurinkopaneelien sähköntuottohyötysuhde voi laskea jopa 0,5 % lämmön noustessa yhden celsiusasteen. (Al-Ahmed, 2022) Tämä johtuu paneelin lisääntyneestä resistanssista. Kylmällä säällä lämpeneminen ei aiheuta kovinkaan suuria ongelmia, mutta kesäisin kuumalla ilmalla aurinkopaneelit voivat saavuttaa jopa 65 °C lämpötilan. Vertaattaessa häviötä aurinkopaneelien standardilämpötilaan (25 °C), voidaan karkeasti arvioida aurinkopaneelien tehon pienentyneen noin 20 %. Paneeleita on kuitenkin useita tyyppisiä, ja todellinen tehonmenetys voi vaihdella. (Masterson, 2022)

Aurinkopaneelien viilentämiseen on ehdotettu monenlaisia ratkaisuja. (Al-Ahmed, 2022) Passiiviset säteilyyn perustuvat viilentämismenetelmät ovat aktiivisiin

jäähdytysmenetelmiin nähden halpoja ja kevyitä. Zhu et al., (2014) osoittivat tutkimuksessaan aurinkopaneelin päälle tehtävän säteilyjäähdyttimen pystyvän viilentämään paljasta aurinkokennoa ideaalisessa tapauksessa jopa 18,3 K. Tutkimuksessa tämän arvioidaan rajoittavan aurinkopaneelin tehonmenetystä huomattavasti.

Aurinkopaneelin päälle asetettava säteilyjäähdytin ei merkittävästi pienennä paneelin puolijohteeseen osuvan valon määrää, sillä läpinäkyvä säteilyjäähdytin ei absorboi aurinkopaneelin sähköntuottoon käyttämää valoa. Aurinkopaneelin pinnalle asetettava jäähdytin on usein ohut kalvo tai jopa paneelin pinnan lasiin tehtävä rakenne. Lasi ( $\text{SiO}_2$ ) on kuitenkin itsessään jo läpinäkyvyysikkunan alueella vahvasti emittoivaa materiaalia, jolloin itse paneeliin lisättävä pinnoite ei voi tuoda kovinkaan suurta lisäystä säteilyn avulla tapahtuvaan jäähtymiseen. (Ahmed et al., 2022)

Ahmed et al., (2022) simuloivat tutkimuksessaan eri tapoja viilentää aurinkopaneelia säteilyn avulla. Tapoja verrattiin tavallisesti käytössä olevaan paneeliin, eli silikonista valmistettuun aurinkopaneeliin, jonka päällä on lasi. Parhain tulos saatiin aikaan integroimalla aurinkopaneeliin erillinen säteilyjäähdytinmoduuli, käytännössä nostamalla paneelien jäähdytyspinta-alaa. Yhdistämällä moduulit lämpöputkella, aurinkopaneelin lämpötila laski normaaliin ratkaisuun verrattuna 12,86 °C, nostamalla hyötysuhdetta 7,25 %.

Aurinkopaneelien hintojen laskiessa nopeasti (Pvxchange, 2024) ei erillinen jäähdytin kuitenkaan välttämättä ole kannattava ratkaisu, vaan erillinen jäähdytin kannattaa ehkä korvata lisäpaneelilla.

## 4.2 Lämpövoimalaitoksen lauhduttimen tehostaminen

Perinteisten lämpövoimalaitoksien hyötysuhde on noin 30–40 %. Tämä johtaa suureen määrään jätelämpöä, jota on erittäin hankala hyödyntää. Tämä lämpö joudutaan poistamaan prosessista ympäristöön, usein lämmönvaihtimella, joka johtaa lämmön läheiseen vesistöön tai jäähdytystorneihin. Yleiset kuivuudet, vesipulat, nousevat ilmaseinät ja vesistöjen lämpötilat sekä kasvava sähköntarve asettaa tarpeen kehittää jäähdytysmuotoja, jotka käyttävät vähemmän vettä ja toimivat paremmin kuin kuivat jäähdytysratkaisut. (Aili et al., 2024)

Yhdysvalloissa lämpövoimalaitoksien kuluttama vesi oli 41 % makean veden kulutuksesta. Suurin osa tästä vedestä palautetaan takaisin vesistöihin, mutta noin 3 % siitä (n. 6 mrd. l)

haihtuu prosessissa. Tämän lisäksi kierto nostaa vesistöjen lämpötiloja, josta voi olla haittaa paikalliselle ekosysteemille. Säteilyjäähdyttimillä voitaisiin tehostaa haihtumiseen perustuvia jäähdytystorneja, pienentäen näiden vedenkulutusta. Jäähdyttämällä piirissä kiertävää vettä säteilyjäähdyttimillä, voidaan alentaa lämmönpoiston tarvetta tornissa, vähentäen siten vedenkulutusta. (Aili et al., 2021)

Aili et al., (2021) tutkimuksessa esitetään ratkaisu, jossa lauhduttimessa kiertävää vettä jäähdytetään ennen jäähdytystorneja. Järjestely ei vaikuttaisi lauhduttimeen palaavan veden lämpötilaan, mutta säästä johtuvat säteilyjäähdyttimien tehon muutokset eivät toisi haasteita jäähdytykseen. Näin laitoksen hyötysuhde pysyy ennallaan ja vedenkulutus pienenee, säteilyjäähdyttimien tuottaessa kylmää. Tutkimuksessa arvioitiin jäähdyttimien pystyvän vähentämään vedenkulutusta 30–60 % USA:n kuumilla ja kuivilla alueilla ja 50–90 % muilla alueilla USA:ssa. Säteilyjäähdyttimet toimivat paremmin kuivassa ilmastossa, mutta niin toimivat myös jäähdytystornit, mikä selittää kuivan ilmaston pienemmän vedensäästämahdollisuuden.

Säteilyjäähdyttimiä voidaan käyttää myös itsenäisenä jäähdytysmenetelmänä, nostaan vedensäästön sataan prosenttiin. Myös kuivat jäähdytysmenetelmät pystyvät eliminoimaan vedenkulutuksen, mutta näissä menetelmissä suurena haittana on korkeat häviöt. Säteilyjäähdyttimien hinta-arvioiden ollessa samaa luokkaa kuivien metodien kanssa, ovat säteilyjäähdyttimet huomattavasti parempi vaihtoehto, omaten vain 0–2,2 % häviön, kun taas kuivilla häviöt ovat noin 4–8 %. (Aili et al., 2021)

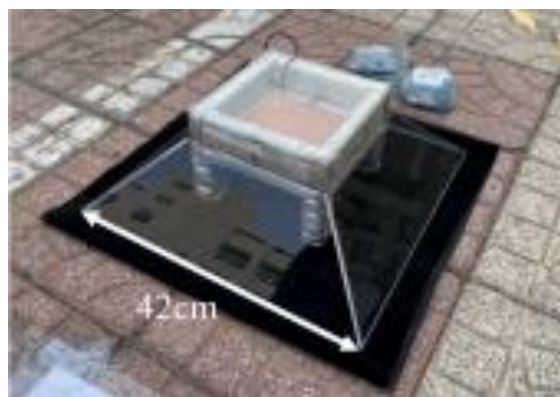
Säteilyjäähdyttimiä voidaan myös yhdistää kuiviin jäähdytysratkaisuihin, jolloin säteilyjäähdytin alentaa kiertoaineen lämpötilaa ilmajäähdyttimen jälkeen, nostaan näin prosessin hyötysuhdetta. Zeyghami ja Khalili, (2015) tutkivat säteilyjäähdyttimien tuomia mahdollisuuksia ilmajäähdytetyssä keskittävässä aurinkovoimalassa, jossa kiertoaineena toimii ylikriittinen hiilidioksidi. Tutkimuksessaan he totesivat säteilyjäähdyttimen pystyvän halutuissa toimintaoloissa tuomaan jopa  $135 \text{ W/m}^2$  lisäviilennyksen. Säteilyjäähdyttimen lisäys pienentäisi prosessihäviöitä. He huomioivat myös säteilyjäähdyttimien käytöstä saatavan lämpötilaeron edesauttavan erityisesti matalan maksimilämpötilan omaavia prosesseja. Hyötysuhteen nousu oli yksinkertaisissa  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  ylikriittisissä hiilidioksidisykleissä 5,0 % ja 3,1 % vastaavasti.

### 4.3 Lämpösähköinen sähköntuotto

Lämpösähköinen generaattori (TEG) kykenee tuottamaan jännitettä suoraan lämpötilaerosta. Tämän sähköntuottotavan etuna on sen kiinteä rakenne, jonka ansiosta käyttö on tärinätön, lähestulkoon huoltovapaa ja elementtien käyttöikä pitkä. Nämä ominaisuudet ovat nostaneet kiinnostusta TEG-elementtien ja säteilyjäähdyttimien sovelluksiin (RCTEG). Tämänlaisilla sovelluksilla on demonstroitu passiivista sähköntuottoa kellon ympäri. (Wang, C. et al., 2023)

TEG-elementit kaikkine hyvine puolineen, omaavat kuitenkin heikon sähköntuottohyötysuhteen, rajoittaen RCTEG-systeemeistä saatavaa tehoa. Toisin kuin muut lämpövoimakoneet, TEG kuitenkin pystyy tuottamaan sähköä jo pienestä lämpötilaerosta. Tämä mahdollistaa säteilyjäähdyttimien käytön suoraan energiantuotannossa. Kuten säteilyjäähdyttäjiä, TEG-elementtejä kehitetään kuitenkin koko ajan, jolloin tekniikasta voidaan saada ratkaisuja rajoitettuihin käyttökohteisiin. (Wang, J. et al., 2023) Näitä käyttökohteita ovat toiminnot, jotka vaativat matalatehoista jatkuvaa energiansyöttöä, kuten esimerkiksi sensorit, joita ei käytännöllisesti voida liittää verkkoon. (Wang, C. et al., 2023)

Wang, C. et al., (2023) luoma prototyyppi (kuva 4) on hybridijärjestelmä, joka käyttää hyväkseen kylmän puolen valikoivan säteilyjäähdyttimen lisäksi auringonvalolla lämmitettyä lasista ”kasvihuonetta” lämmittämään TEG:n kuumaa puolta päivisin. Yöaikaan ”kasvihuone” pysyy lähes ympäristön lämpötilassa, mutta kylmän puolen säteilyjäähdytin viilenee alle ympäristön lämpötilan mahdollistaa jatkuvan sähköntuoton kellon ympäri.



Kuva 4. Kuva järjestelmän rakenteesta. (Wang, C. et al., 2023)

Testiaikana laitteen minimitiho yöaikaan oli  $0,18 \text{ W/m}^2$  ja maksimi päiväsaikaan  $3,76 \text{ W/m}^2$ . Laitteen teho on varsin pieni, kun verrataan esimerkiksi aurinkopaneeliin ( $250 \text{ W/m}^2$ ). Laite kuitenkin pystyy tuottamaan sähköä kellon ympäri. Tutkimuksessa kuitenkin arvioitiin, että mikäli valikoiva säteilyjäähdytin korvataan laajan spektrin jäähdyttimellä, TEG-elementin puolten lämpötilaero nousee päivisin  $15,69 \%$  eli  $0,8 \text{ K}$ , joka johtaa maksimitehon nousuun. Tämän aiheuttaa ”kasvihuoneen” lämmittävä vaikutus, joka nostaa kylmän puolen lämpötilan yli ympäristön lämpötilan, parantaen laajan spektrin jäähdyttimen lämmönsiirtoa huomattavasti. Laajan spektrin säteilyjäähdyttimellä tarkoitetaan kappaletta, joka ei vastaanota näkyvää valoa, mutta säteilee voimakkaasti koko lämpösäteilyn spektrillä, pienentäen lämmönsiirron vastusta ympäristön kanssa. Jäähdyttimen korvaamalla teho nousee arviolta myös yöaikaan, auringon lämmittävän vaikutuksen puuttuessa. Näin laitteen minimitiho öisin voitaisiin nostaa jopa  $0,6 \text{ W/m}^2$ .

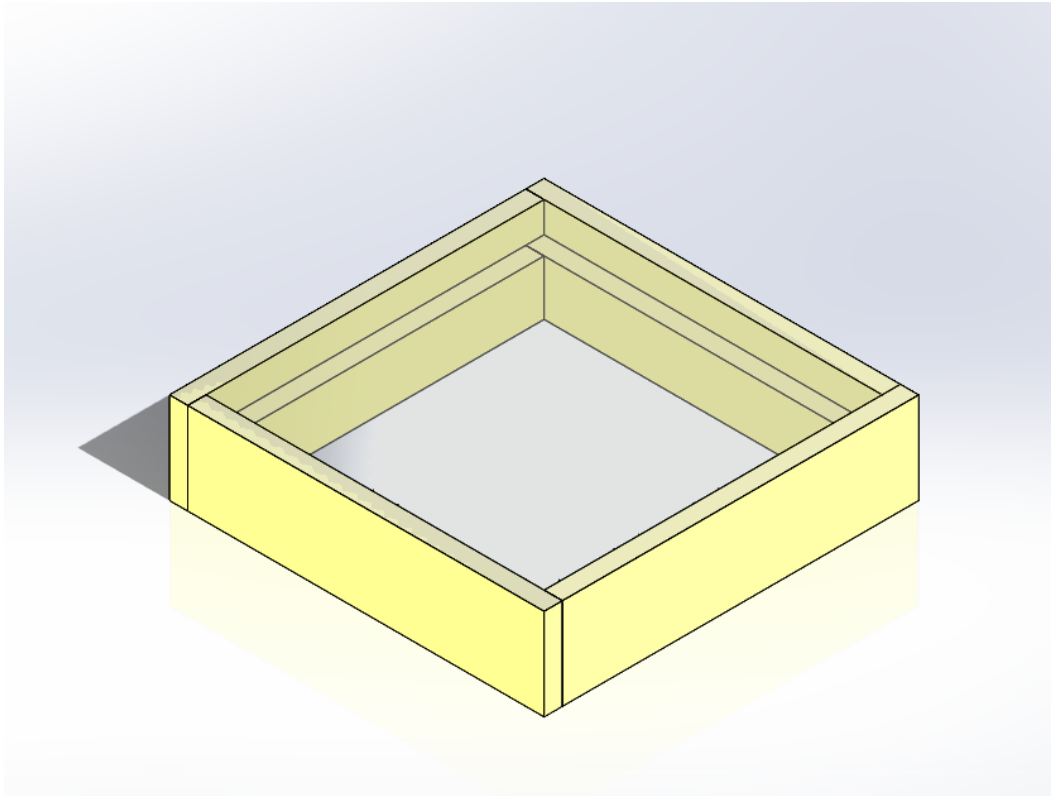
## 5 Jäähdyttimen prototyyppi

Useat tutkimukset ovat osoittaneet yksinkertaisen säteilyjäähdyttimen olevan mahdollista rakentaa helposti saatavilla olevista materiaaleista. Useimmat todelliset jäähdyttimien testauspaikat sijoittuvat kuitenkin lämpimille ja/tai kuiville ilmastoalueille ja hyvin vakaisiin sääolosuhteisiin. Säteilyjäähdyttimen toiminta riippuu kuitenkin paikallisesta säästä, jolloin muiden alueiden tuloksia ei ehkä voida ekstrapoloida näistä tutkimuksista. Prototyypin tarkoituksena on kerätä dataa Suomen ilmastossa, jolloin säteilyjäähdyttimen mahdollisuuksia voisi arvioida tarkemmin.

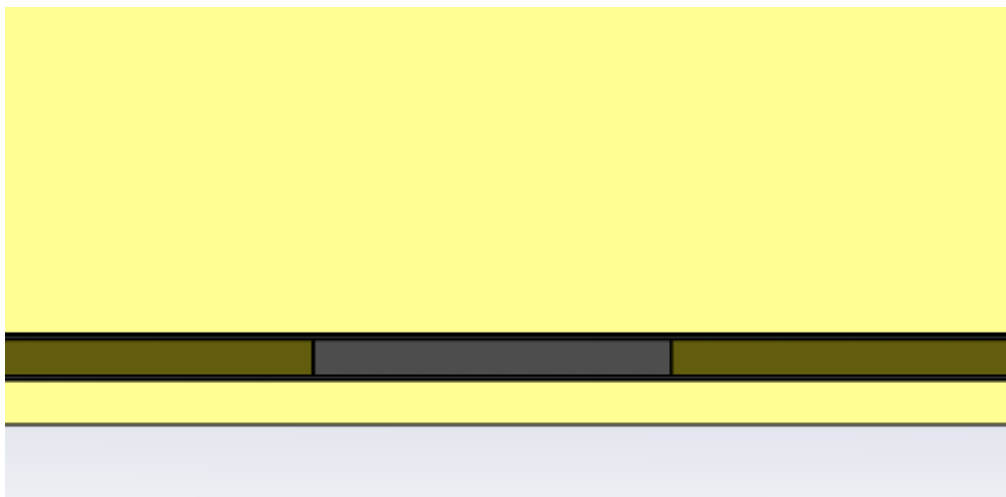
Prototyypin päätarkoituksena on testata jäähdytyskykyä (Huang, Mandal ja Raman, 2022) tutkimuksen inspiroiman säteilyjäähdyttimen rakenteen mukaisesti. Laitteeseen on myös asennettu Peltier TEG-elementtejä, joiden avulla laitteesta voisi jopa saada sähkötehoa. Saatava teho olisi kuitenkin hyvin alhainen, jolloin sitä ei ehkä pysty havaitsemaan budjettiin mahtuneilla sensoreilla.

### 5.1 Rakenne

Säteilyjäähdytin koostuu säteilijästä, eristeistä, TEG-elementeistä, pohjalevystä, sekä mittalaitteistosta. Kuvat 5, 6 ja 7 havainnollistavat jäähdyttimen rakennetta.



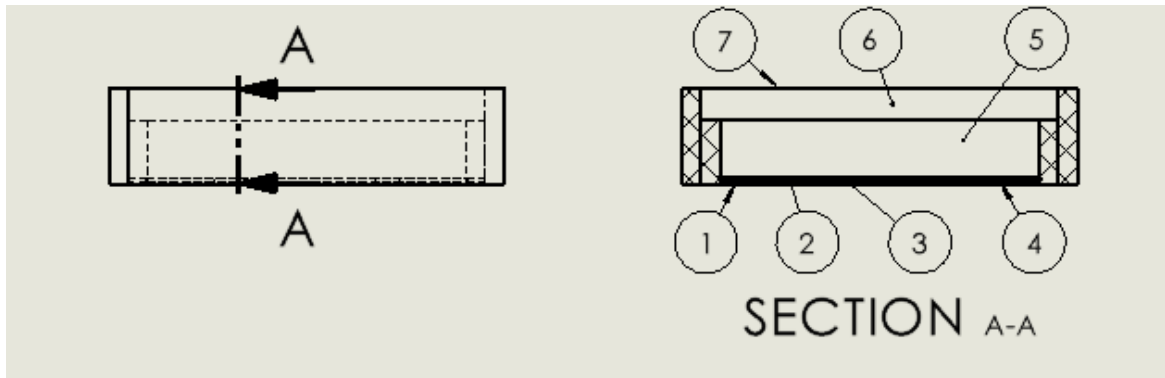
Kuva 5. Konseptikuva säteilyjäähdyttimestä (Solidworks)



Kuva 6. Poikkileikkaus, jossa TEG-elementti (Solidworks)

Taulukko 2. Osaluettelo

| ITEM NO. | PART NUMBER    | DESCRIPTION | QTY. |
|----------|----------------|-------------|------|
| 1        | Pohjalevy      |             | 2    |
| 2        | Termoelementti |             | 6    |
| 3        | Väljeriste     |             | 1    |
| 4        | PPkalvo        |             | 1    |
| 5        | Eriste 1       |             | 4    |
| 6        | Eriste2        |             | 4    |
| 7        | Konvektiosuoja |             | 1    |



Kuva 7. Rautalankamalli ja sen poikkileikkaus (Solidworks)

Säteilijänä toimii noin  $0,25 \text{ m}^2$  polypropyleeniteipillä päällystetty alumiinilevy, jossa alumiinin tarkoituksena on heijastaa mahdollisimman paljon säteilyä. Polypropyleeniteippi taas läpinäkyvänä on huono absorboimaan näkyvää valoa, jolloin mahdollisimman suuri osa valosta heijastuu teipin läpi ulos laitteesta. Teippi kuitenkin absorboi vahvasti läpinäkyvyysikkunan alueella, jolloin sen toimiessa varsinaisena säteilijänä, laitteen tulisi emittoida pääasiassa läpinäkyvyysikkunan aallonpituuksista säteilyä. Pohjalevynä toimii toinen puoli alumiinilevystä, joka leikattiin säteilijän heijastimeksi.

Laite on eristetty sivuilta polyuretaanilevyillä. Päällä konvektiosuojana toimii kalvo, jonka tulisi olla mahdollisimman läpinäkyvä säteilylle minimoiden siitä aiheutuva kalvon lämpeneminen. Etyleeni osoittautui tähän soveliaaksi materiaaliksi.

TEG-elementeiksi valittiin Peltier-elementit niiden alhaisen hinnan ja hyvän saatavuuden vuoksi. Elementit liitettiin lämpöä johtavalla liimalla säteilijälevyn ja pohjalevyn väliin. Jäljelle jäänyt tila levyjen välissä eristettiin polyuretaanivaahdolla, jolloin mahdollisimman suuri lämpövuoto kulkisi elementtien läpi.

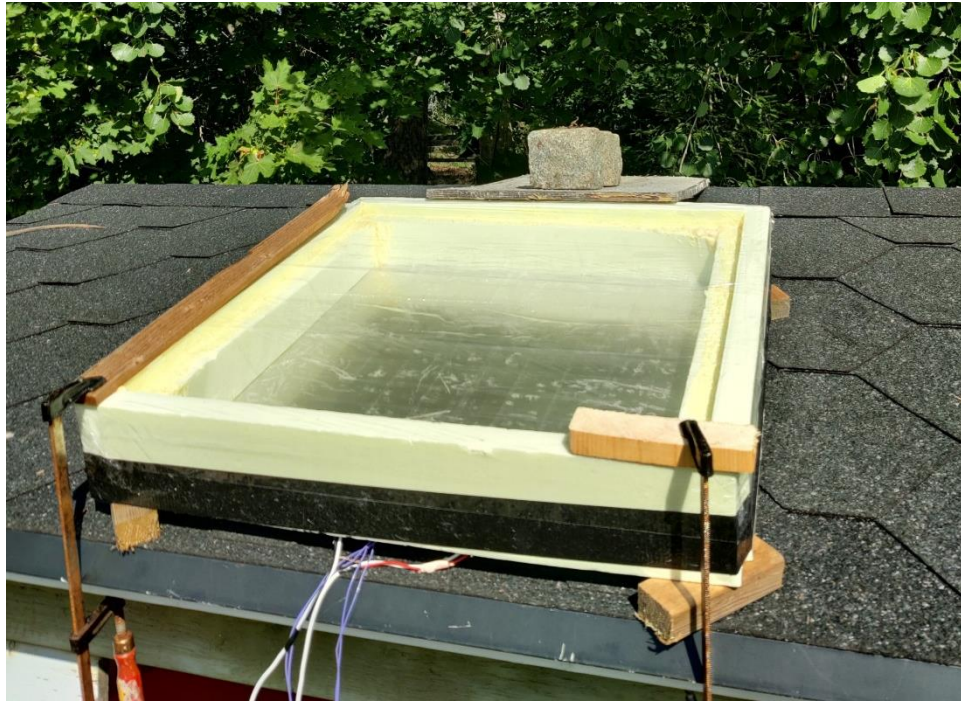
Mittalaitteistona prototyypissä toimii Arduinopiiri, johon on seuraavat anturit.

Taulukko 1. Piirin anturit

| Lkm. | tyyppi                                  | tarkoitus                            |
|------|---|--------------------------------------|
| 2    | Pt100 lämpöanturi                       | Levyjen lämpötilan mittaus           |
| 1    | DHT22 lämpötila- ja ilman-kosteusanturi | Ympäristön olosuhteiden mittaus      |
| 1    | ACHS-7121 Virta-anturi                  | TEG-elementtien sähköntuoton mittaus |

## 5.2 Testaus

Testaus tapahtui 17.-20.8.2024. Kappaleen 2.3 kuvassa 1 havainnollistettiin zenittikulman vaikutusta ilmakehän läpäisyysuhteeseen. Optimaalinen kulma olisi pystysuoraan taivaalle, jolloin läpäistävä ilmakehän kerros olisi pienin. Näin ollen optimaalisin paikka kokeelle olisi korkea ja tasainen paikka, jossa ei ole optisia esteitä, kuten kerrostalon katto. Testikohteeksi valikoitui kuitenkin hieman etelään vinossa oleva pinta (Kuva 8), joka oli suorassa auringonvalossa, sillä aikaisemmista suunnitelmista huolimatta, osa kokeen elektroniikasta tuli saada varmuuden vuoksi sateensuojaan katon alle, eikä helppoa pääsyä kerrostalon katolle ollut.



Kuva 8. Jäähdytin koepaikalla

Laitteen suoristaminen testipaikassa ei kuitenkaan olisi tuonut kovin suurta etua, sillä paikan pohjoispuolella oli puita, jotka katkaisivat taivasyhteyden. Suoristaminen olisi voinut tuoda etua päiväsaikaan tapahtuvalle jäähtymiselle, joka tässä kokeessa jäi hyvin vähäiseksi. Säteilijäähdyttimen lämpeneminen päiväsaikaan tuo ilmi tarpeen paremmin heijastavalle pohjamateriaalille tai varjostimelle. Pohjamateriaalin heijastavuutta voisi parantaa esimerkiksi alumiinilevyn kiillotus.

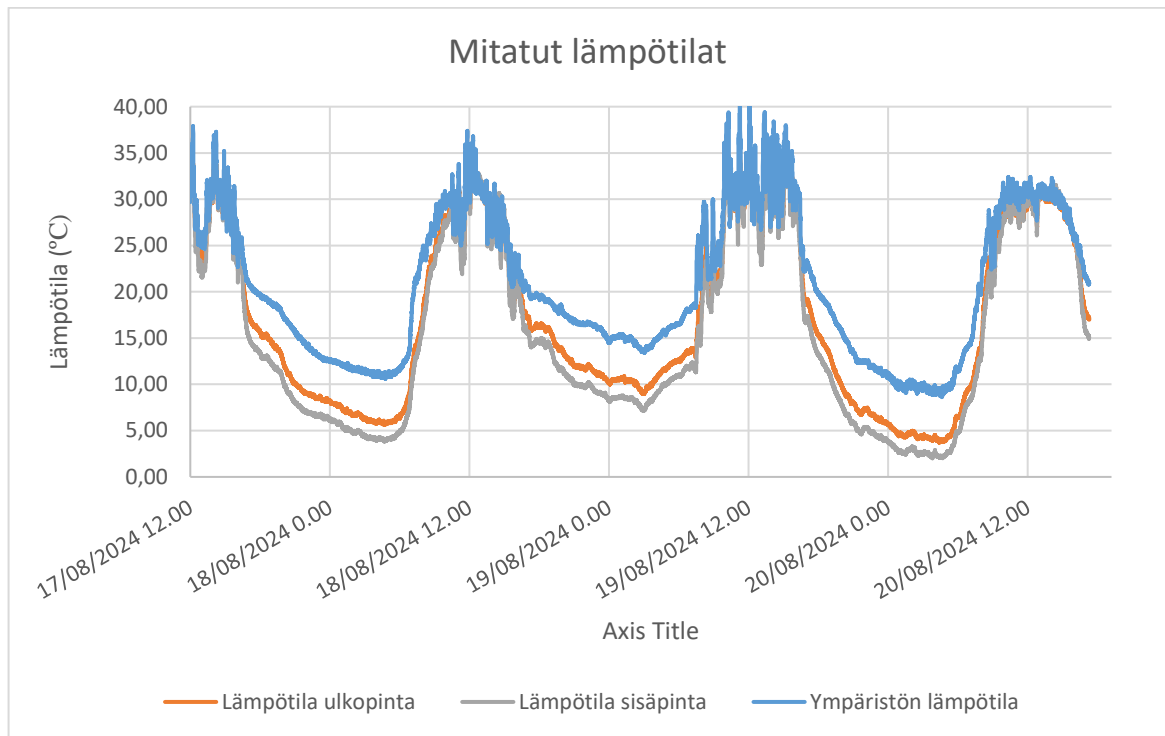


Kuva 9. Jäähdytin kokeen jälkeen

Muutkaan materiaalit eivät osoittautuneet optimaalisiksi, sillä kuten kuvasta 9 voi huomata, eristeiden liimana käytetty polyuretaani tummui auringonvalossa nostaten näin auringon suoraa säteilyvaikutusta. Paremmen heijastavuuden aikaansaamiseksi eristeen voisi peittää kiiltävällä materiaalilla, esimerkiksi alumiiniteipillä.

### 5.3 Tulokset

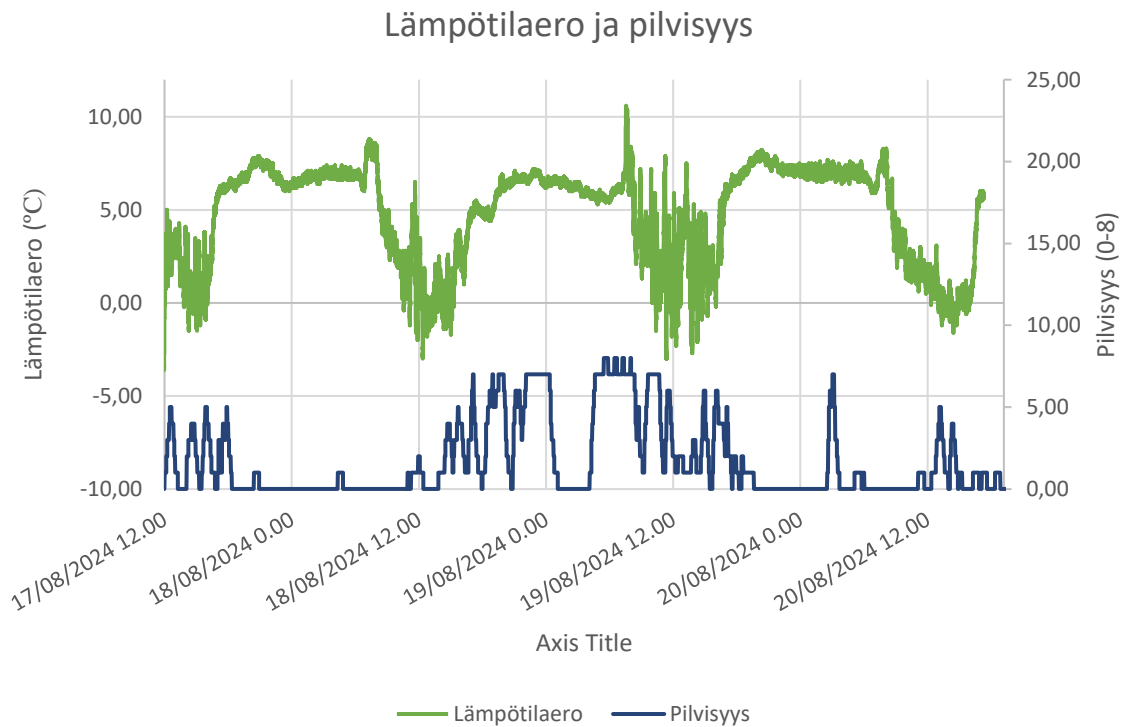
Kuvassa 9 ovat laitteen toiminnan aikana mitatut lämpötilat. Kuvaajista voi huomata ympäristön lämpötilan eroavan ja olevan korkeampi, kuin laitteen alumiinilevyistä mitatut lämpötilat, jolloin laite pystyi jäähdyttämään itseään. Jäähdytminen suoraan auringonvalossa on kuitenkin hyvin vähäistä ja päivisin tuotetusta datasta ei suuren hajonnan vuoksi voida tehdä havaintoja.



Kuva 10. Mitatut lämpötilat

Kuvasta 10 voi huomata lämpötilaerolla olevan pilvisyyden kannalta heikko korrelaatio yöaikaan. Sunnuntain ja maanantain välisenä yönä (18.–19.8.), lämpötilaero jäi hieman matalammaksi muihin öihin nähden. Korkein lämpötilaero voitiin havaita varhain aamuisin, kun auringonvalo ei vielä osunut jäädyttimeen, mutta lämmitti ympäristöä. Päiväsaikaan pilvisuus ei tuottanut havaittavaa eroa lämpötiloihin, mutta epävakaata pilvipeite tuotti suurempaa hajontaa lämpötilaerojen mittauksiin. Lämpötilaeroa voitaisiin kasvattaa eristämällä pohjalevy paremmin. Tässä kokeessa sen eristykset jäivät alhaisiksi, jotta TEG-elementit voitiin liimata lämmönjohtavalla liimalla suoraan alumiinilevyihin.

Keskimääräinen lämpötilaero ympäristöön kokeen aikana oli 4,8 °C. Korkein lämpötilaero havaittiin maanantaiaamuna klo 7.33, joka oli noin 10,50 °C.



Kuva 11. Lämpötilaero ja pilvisuus Pilvisyystiedot (Ilmatieteenlaitos, 2024)

Kosteusmittari mittasi suhteellista kosteutta, jolloin siitä saatavia arvoja ei suoraan voi verrata jäähdyttimen toimintaan. Suhteellinen kosteus vaihteli mittauksen ajan yön ja päivän välillä. Päivien väliset lämpötilat olivat kuitenkin lähes samat, kuten myös päivien väliset suhteelliset kosteudet. Kosteuden datasta ei siis saada merkittäviä tuloksia jäähdyttimen toiminnan arviointiin, joten sitä ei tehdä.

Testaus ja laite oli pääosin onnistunut, sillä itse rakennetut lämpöanturit ja piiri toimivat ja laite pystyi jopa jäähdyttämään itseään. Laitteesta ei kuitenkaan saatu irti havaittavaa sähkövirtaa, joten koe epäonnistui sen osalta. Lämpötilaero kuitenkin havaittiin, joten syitä sähköntuoton epäonnistumiseen voi olla monia, mutta pääasiallisiksi ongelmiksi nousi liian pieni lämpötilaero pintojen välillä, TEG-elementtien heikko laatu, virtamittarin epätarkkuus ja/tai epäoptimaaliset kytkennät piirissä, joiden takia pientä sähkövirtaa ei voitu havaita.

## 6 Johtopäätökset

Työssä tarkasteltiin säteilyjäähdyttimen toimintaa ja sen mahdollisuuksia erilaisissa käyttökohteissa. Lisäksi tehtiin tutkimus säteilyjäähdyttimen käytöstä Suomessa kesällä.

Säteilyjäähdyttimillä vaikuttaa olevan jo tämänhetkisellä kehitysasteella todellisen maailman käyttökohteita. Ilmastonmuutoksen edetessä, jäähdytykselle on enemmän tarvetta, jolloin säteilyjäähdyttimistä saatava hyöty kasvaa. Erityisesti rakennusten jäähdyttämisestä aikaan saatava hyöty on korkea suhteessa vaadittavaan teknologian tasoon ja laajamittaisimmat kokeet kohdistuvatkin juuri rakennusten viilentämiseen. Säteilyjäähdyttimet ovat osoittautuneet kustannustehokkaiksi ratkaisuksi kuumilla alueilla, joten niiden käyttö rakennusten jäähdyttämiseen voi yleistyä nopeasti.

Energiateollisuudessa tietyissä käyttökohteissa tehdyistä arvioista, jopa jäähdyttimien taloudellisuus voi olla korkeampi kuin muiden olemassa olevien sovellusten. Hyöty jää kuitenkin vähäiseksi ilman korkeaa luotettavuutta, joten testaamattomia säteilyjäähdyttimiä energiateollisuuden prosesseissa voidaan lähitulevaisuudessa nähdä korkeintaan lisälaitteina jo olemassa olevan infrastruktuurin apuna.

Työssä tehty tutkimus osoitti säteilyjäähdyttimen toimivan myös pilvisellä säällä, joskin heikommin kuin pilvettömänä aikana. Havaittu korrelaatio oli kuitenkin heikko ja tutkimuksen lyhyen keston vuoksi ei saatu merkittävästi dataa säteilyjäähdyttimen toiminnasta eri sääolosuhteissa. Pidemmän aikavälin tutkimukset mahdollistaisivat eri sääolosuhteiden muodostumisen ja mahdollisuuden arvioida säteilyjäähdyttimen toimintaa paremmin. Tutkimuksesta kuitenkin selvisi jäähdyttimen parannuskohteita, kuten varjostin, paikka ja paremmat pintamateriaalit, joilla jäähdyttimellä voitaisiin saada aikaan viilennystehoa jopa päivisin. Mikäli jäähdytintä halutaan käyttää energiantuotantoon, sen käytöstä tulisi tehdä jatkotutkimus myös talvella, jolloin jäähdyttimen todellinen potentiaali vuoden ympäri tulee ilmi.

Tässä kehitysvaiheessa laitteen tehon laskeminen on hyvin hankalaa, sillä se vaatisi tutkimuksen käytetyistä materiaaleista, sillä kaikille käytetyille materiaaleille ei löydy lämmönjohtavuuskertoimia. Säteilijässä käytetyistä materiaaleista ei myöskään löytynyt tarpeeksi informaatiota, säteilytehon laskemiseen. Paras tapa arvioida tehontuottoa olisi yhdistää

laitteeseen vettä jäähdyttävä piiri, jonka avulla tuotetun kylmän tehon voisi laskea. Tällä menetelmällä pystyisi myös seuraamaan kylmän tuottoa eri lämpötiloihin.

## Lähteet

Ahmed S, Li S, Li Z, Xiao G ja Ma T . 2022. Enhanced radiative cooling of solar cells by integration with heat pipe. *Applied Energy* 308: 118363.

Aili A, Yin X ja Yang R . 2021. Global Radiative Sky Cooling Potential Adjusted for Population Density and Cooling Demand. *Atmosphere* 12(11): 1379.

Aili A, Zhao D, Tan G, Yin X ja Yang R . 2021. Reduction of water consumption in thermal power plants with radiative sky cooling. *Applied Energy* 302: 117515.

Aili A, Jiang T, Chen J, Wen Y, Yang R, Yin X ja Tan G . 2024. Passive daytime radiative cooling: Moving beyond materials towards real-world applications. *Next Energy* 3: 100121.

Aili A, Zhao D, Lu J, Zhai Y, Yin X, Tan G ja Yang R . 2019. A kW-scale, 24-hour continuously operational, radiative sky cooling system: Experimental demonstration and predictive modeling. *Energy Conversion and Management* 186: 586–596.

Al-Ahmed A. 2022. *The Effects of Dust and Heat on Photovoltaic Modules : Impacts and Solutions*. Cham, Switzerland: Springer.

Bhatia B, Leroy A, Shen Y, Zhao L, Gianello M, Li D, Gu T, Hu J, Soljačić M ja Wang EN . 2018. Passive directional sub-ambient daytime radiative cooling. *Nature Communications* 9(1): 5001–8.

Chen Z, Zhu L, Raman A ja Fan S . 2016. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day–night cycle. *Nature Communications* 7(1): 13729.

Chernov *File:Panoramic View of Oia, Santorini Island (Thira), Greece.Jpg*. [Viitattu 10.7. 2024] [Saatavissa: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Panoramic\\_view\\_of\\_Oia%2C\\_Santorini\\_island\\_%28Thira%29%2C\\_Greece.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Panoramic_view_of_Oia%2C_Santorini_island_%28Thira%29%2C_Greece.jpg)].

CJS Robotics. 2024 *Code Generator for Arduino*. [Saatavissa: <https://www.duino-code-generator.com/>].

Gao Y, Shi D, Levinson R, Guo R, Lin C ja Ge J . 2017. Thermal performance and energy savings of white and sedum-tray garden roof: A case study in a Chongqing office building. *Energy and Buildings* 156: 343–359.

Huang X, Mandal J ja Raman AP . 2022. Do-it-yourself radiative cooler as a radiative cooling standard and cooling component for device design. *Journal of Photonics for Energy* 12(1): 012112.

Ilmatieteenlaitos. 2024 *Säähavainnot*. [Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>].

Kiyae S, Khalilmoghadam P, Behshad Shafii M, Moshfegh AZ ja Hu M . 2022. Investigation of a radiative sky cooling module using phase change material as the energy storage. *Applied Energy* 321: 119357.

Liu P, Bae S, Noh J, Kim M, Heo JW, Son D, Kang J, Rho J, So S, Kang JG, et al. . 2023. Functional Radiative Cooling: Basic Concepts, Materials, and Best Practices in Measurements. *ACS Applied Electronic Materials* 5(11): 5755–5776.

Masterson V. 2022 *Why Don'T Solar Panels Work as Well in Heatwaves?* [Viitattu 3.7. 2024] [Saatavissa: <https://www.weforum.org/agenda/2022/08/heatwaves-can-hamper-solar-panels/>].

OpenAI. 2024 *Chatgpt*. [Saatavissa: <https://chatgpt.com/>].

Pvxchange. 2024 *Photovoltaic Price Index*. [Saatavissa: <https://www.pvxchange.com/Price-Index>].

Raman AP, Anoma MA, Zhu L, Rephaeli E ja Fan S . 2014. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature (London)* 515(7528): 540–544.

Reality check team BBC news. 2019 *How Much can Painting a Roof White Reduce its Temperature?* [Viitattu 10.7. 2024] [Saatavissa: How much can painting a roof white reduce its temperature?].

, Sandip ja Modest M. 2022. *Fundamentals of Thermal Radiation*. Teoksessa: Toim. Anonymous : Elsevier, 1.

- Sun X, Sun Y, Zhou Z, Alam MA ja Bermel P . 2017. Radiative sky cooling: fundamental physics, materials, structures, and applications. *Nanophotonics (Berlin, Germany)* 6(5): 997–1015.
- Wang C, Chen H, Jiang Z, Zhang X ja Wang F . 2023. Modelling and performance evaluation of a novel passive thermoelectric system based on radiative cooling and solar heating for 24-hour power-generation. *Applied Energy* 331: 120425.
- Wang J, Lu L, Chen J ja Jia L . 2023. Parametric analysis and potential evaluation of thermoelectric generator driven by solar energy and radiative sky cooling. *Solar Energy* 264: 112071.
- Wang N, Lv Y, Zhao D, Zhao W, Xu J ja Yang R . 2022. Performance evaluation of radiative cooling for commercial-scale warehouse. *Materials Today Energy* 24: 100927.
- Wong RYM, Tso CY, Jeong SY, Fu SC ja Chao CYH . 2023. Critical sky temperatures for passive radiative cooling. *Renewable Energy* 211: 214–226.
- Zeyghami Mja Khalili F . 2015. Performance improvement of dry cooled advanced concentrating solar power plants using daytime radiative cooling. *Energy Conversion and Management* 106: 10–20.
- Zhao B, Lu K, Hu M, Liu J, Wu L, Xu C, Xuan Q ja Pei G . 2022. Radiative cooling of solar cells with micro-grating photonic cooler. *Renewable Energy* 191: 662–668.
- Zhao D, Aili A, Zhai Y, Lu J, Kidd D, Tan G, Yin X ja Yang R . 2019. Subambient Cooling of Water: Toward Real-World Applications of Daytime Radiative Cooling. *Joule* 3(1): 111–123.
- Zhu L, Raman A, Wang KX, Abou Anoma M ja Fan S . 2014. Radiative cooling of solar cells. *Optica* 1(1): 32–38.