AURINKOPANEELIKÄYTTÖISEN LÄMPÖSÄHKÖISEN KYLMÄLAITTEEN TUOTEKEHITYS

Product development of solar panel based thermoelectric cooler

Esa Turkia

Kandidaatintyö
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

19.2.2021

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Esa Turkia
Aurinkopaneelikäyttöisen lämpösähköisen kylmälaitteen tuotekehitys

2021
Kandidaatintyö.
27 s.
Tarkastaja: Professori Juha Pyrhönen

Tässä kandidaatintyössä selvitettiin mahdollisuutta rakentaa aurinkovoimalla toimiva lämpösähköinen jäähdytyslaitteisto. Työssä oli käytettävissä prototyyppivaiheen lämpösähköinen jäähdytyslaite sekä uretaanilaatikko, jotka yhdessä muodostavat kylmälaitteen. Kirjallisuuskatsauksen avulla perehdyttiin laitteiston komponenttien toimintaperiaatteisiin, minkä lisäksi laitteistolla tehtiin suorituskykymittauksia. Työn tavoitteena oli mitoittaa laitteistolle optimaalinen aurinkopaneeli, selvittää jäähdytyslaitteen jäähdytystehon riittävyys sekä sen optimaalinen toimintapiste. Teoreettisen tutkimuksen ja saatujen mittaustulosten perusteella selvitettiin mahdolliset haasteet laitteiston toiminnassa sekä parannusehdotukset laitteistolle.

Mittaustulosten perusteella alkuperäinen jäähdytyselementti osoittautui liian pieneksi vaatimuksiin nähden. Päivitettäväksi elementiksi määritettiin jäähdytysteholtaan tehokkaampi 108 W TEC-elementti. Uuden elementin myötä jäähdytyslaitteen optimaalinen tehoalue saataisiin laajemmaksi, jolloin aurinkopaneelin mitoitus olisi helpompaa. Päivitetyn elementin optimitehoalueeksi saatiin 50–128 W, jolloin aurinkopaneelin nimellistehoksi määritettiin 125 W. Uuden jäähdytyselementin myötä tulee jatkossa kiinnittää huomiota liialliseen jäähtymiseen ja sen rajoittamiseen. Lisäksi tulisi testata laitteistoa tarkoituksen mukaisissa lämpimissä kohdemaissa, mihin laite on suunniteltu.

ABSTRACT

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

Esa Turkia
Product development of solar panel based thermoelectric cooler

2021
Bachelor's Thesis.
27 p.
Examiner: professor Juha Pyrhönen

In this Bachelor's Thesis the possibility of assembling a solar panel based thermoelectric cooling system was figured out. This thesis is based on a prototype of a cooling device that consist of a thermoelectric cooler and a urethane case. Literature review was made to get acquainted with operational principles of the system's components. In addition, there was measurements made for system's performance. The goal of this thesis was to dimension an optimal solar panel for the system, and to figure out cooler's sufficiency of cooling power and the optimal operating point. Based on the literature review and measurements possible challenges and improvements for the system was figured out.

According to the results of measurements original cooler turned out to be inadequate compared to requirements. As an action measure it was decided to upgrade the existing cooling element for a more powerful 108 W TEC-element. With the new element it is possible to widen the cooling system's optimal power range so that dimensioning of the solar panel would be more fluent. Optimal power range for the new element is 50–128 W. Based on that fact the nominal power of solar panel can be determined to 125 W. After replacing the old element with a new one it is important to pay attention to overcooling and act on restricting it. In addition, equipment should be tested under conditions equal to tropical climate where the device is designed for.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto 6
2. Laitteiston komponentit 7
   2.1 Peltier-kenno 7
   2.2 Aurinkopaneeli 12
   2.3 Regulaattori 14
3. Mittausjärjestelyt 15
   3.1 Jäähdytin 15
   3.2 Uretaanilaatikko 18
4. Tulokset 19
   4.1 Jäähdyttimen tuottama lämpötilaero ΔT 20
   4.2 Laitteen juomiin kohdistama viilennys vaikutus 22
   4.3 Tehonvaihteluiden vaikutukset kylmäkaapin sisälämpötilaan 24
5. Johtopäätökset 25

Lähteet 28

Liitteet

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

COP	Coefficient of Power, tehokerroin
DC	Direct Current, tasavirta, tasasähkö
MPP	Maximum Power Point, maksimitehopiste
MPPT	Maximum Power Point Tracker, maksimitehopisteen seurain
TEC	Termoelectric Cooler, Lämpösähköinen jäähdytin

I	virta
P	teho
t	aika
T	lämpötila
U	jännite
Q	lämmönsiirtokapasiteetti, lämpöenergia
Δ	muutos, -ero

Alaindeksit

c	kapasiteetti
e	energia
n	nimellis-
MAX	maksimi

1. JOHDANTO

Perinteiset, kompressorilla toimivat kylmälaitteet ovat yleinen ratkaisu laitteiden jäähdytykseen. Kompressoripohjaiset laitteet vaativat kuitenkin kylmäainetta toimiakseen, ja monien haitallisten kylmäaineiden käyttöä on alettu rajoittaa ilmastotoimien yhteydessä. Esimerkiksi freon-kauppanimellä kutsutut CFH-yhdisteet kiellettiin jo vuonna 2001 ja HCFH-yhdisteet vuonna 2015 (Detector, 2020). Nykyisin jääkaapeissa ja pakastimissa käytetty kylmäaine on HC-aineisiin (Hydrocarbon, hiilivety) kuuluva butaani, jonka ilmastollinen vaikutus on vanhempien kylmäaineiden vaikutusta huomattavasti pienempi.

Kompressorilla toimivaa laitetta yksinkertaisempi rakenne saavutetaan lämpösähköisellä jäähdytyselementillä. Tämän Peltier-kennoksi kutsutun jäähdytyselementin etuna on, että se ei tarvitse toimiakseen kylmäaineita. Koska Peltier-kennossa ei ole liikkuvia osia, kuten kompressoripohjaisessa, on se huoltovapaampi ja pitkäikäisempi. Lisäksi Peltier-elementistä itsestään ei lähde melua sen toimiessa. Vaikka Peltier-elementti on rakenteeltaan huomattavasti yksinkertaisempi ja edullisempi, on haittapuolena sen merkittävästi huonompi hyötysuhde verrattuna kompressorilla toimivaan kylmälaitteeseen.

Tässä työssä selvitetään mahdollisuutta rakentaa aurinkopaneelikäyttöinen kannettava jääkaappi. Kylmälaitteen jäähdytysteho on tarkoitus saada Peltier-kennosta. Työssä keskitytään Peltier-elementin synnyttämän lämpötilaeron ja laitteistolta vaaditun sähkötehon selvittämiseen. Tutkimusmenetelmänä käytetään teoreettista sekä kokeellista tutkimusta. Kirjallisuuskatsauksen avulla perehdytään rakennettavan laitteiston eri komponenttien toimintaperiaatteisiin. Tämän lisäksi prototyyppivaiheen laitteistolla tehdään mittauksia. Tehdyn selvityksen perusteella pyritään mitoittamaan aurinkopaneelin optimaalinen nimellisteho ja laitteen optimaalinen toimintapiste. Lisäksi analysoidaan jäähdyttimen jäähdytystehon riittävyyttä. Teoreettisen tutkimuksen sekä saatujen mittaustulosten perusteella selvitetään mahdolliset haasteet sekä parannusehdotukset laitteistolle.

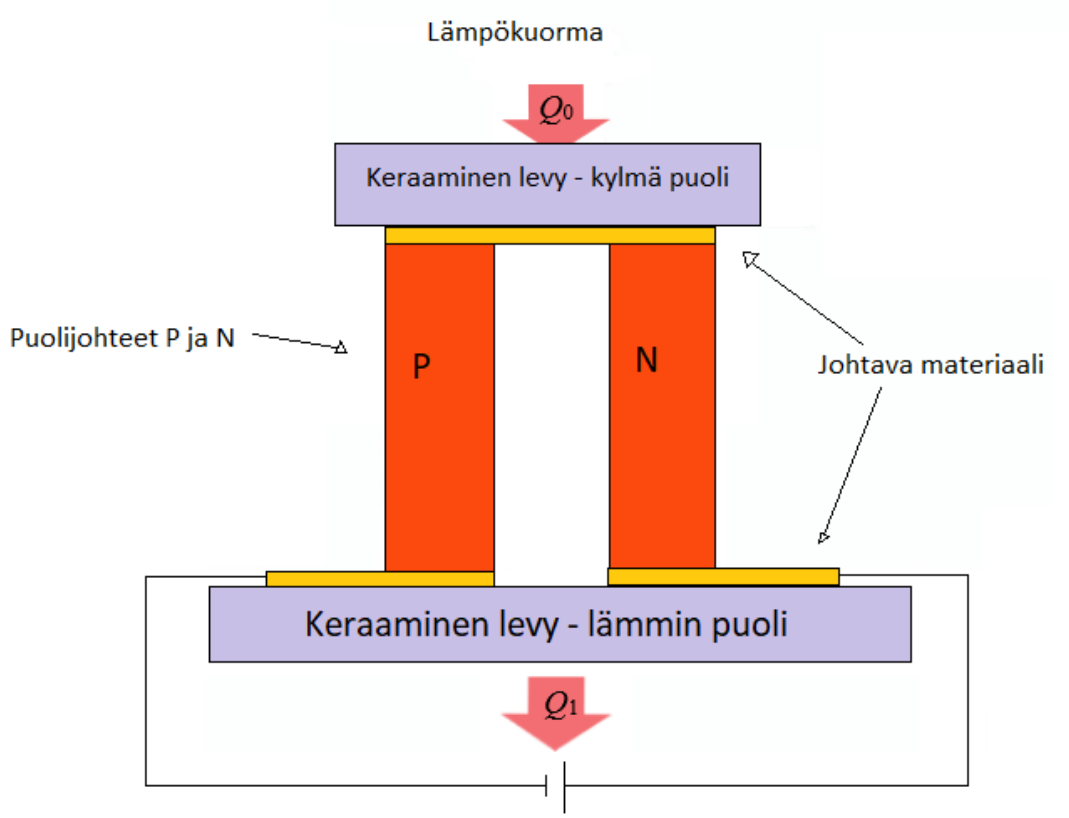
Työssä käytettävissä olevalle prototyyppivaiheen laitteistolle tehdään mahdolliset parannukset selvityksen perusteella. Tämän jälkeen on mahdollista selvittää tuotteen kaupallistamista. Kaupallistamisen vuoksi on olennaista, että laitteiston rakenne pysyy yksinkertaisena, mahdollisimman tehokkaana ja edullisena. Kaupallistamisessa etuna katsotaan olevan kylmäaineiden puuttuminen, jolloin myyntiluvan saaminen eri maihin on huomattavasti helpompaa.

2. LAITTEISTON KOMPONENTIT

Teoriaosuudessa käydään läpi pääpiirteittäin työssä tarvittavien eri osakokonaisuuksien toimintaperiaatteet. Rakennetun laitteiston on tarkoitus muodostaa energiaomavarainen kylmälaite, jonka energianlähteenä toimii aurinkopaneeli. Aurinkopaneeli syöttää virtaa Peltier-kenno-pohjaiselle kylmälaitteelle, joka puhaltaa kylmää ilmaa viilennettävien virvokejuomatölkkien lomitse. Oletuksena on, että aurinkopaneeli joudutaan teholtaan ylimitoittamaan puhaltimen vaatimaan tehoon nähden, joten virransyöttöä valitaan rajoittamaan regulaattori. Ylimitoitusta tarvitaan, sillä paneelin tuottama teho ei pysy nimellisarvossa jatkuvasti, johtuen muun muassa säätilan ja pilvisyyden vaihteluista sekä auringon tulokulmasta suhteessa paneelin pintaan.

2.1 Peltier-kenno

Peltier-kenno on lämpösähköinen laite, joka siirtää lämpöä sähkövirran avulla. Kennon toiminta perustuu Jean Peltierin vuonna 1834 löytämään ilmiöön (TEC Microsystems, 2020), jonka mukaan komponenttien välille syntyy lämpötilaero, kun johdetaan sähkövirtaa kahden eri materiaalisen puolijohdekomponentin läpi (Hunker, 2016). Kuva 2.1 havainnollistaa, kuinka puolijohteet on kytketty toisiinsa sähköä johtavalla materiaalilla. Kun muodostuneen piirin läpi kulkee sähkövirta, alkaa lämpö siirtyä puolijohdekomponenttien toisesta päästä toiseen päähän. Toisin sanoen yläpuoli alkaa viilentyä ja alapuoli lämmetä. Mikäli sähkövirran suunta vaihdetaan, vaihtuu myös lämpövirtauksen suunta. Lämpösähköinen elementti voi siis toimia sekä jäähdyttimenä että lämmittimenä sähkövirran suunnasta riippuen. Teknisesti TEC-elementti (thermoelectric cooler, lämpösähköinen jäähdytin) on kuitenkin lämmönsiirrin, eikä niinkään lämmitin tai jäähdytin. Elementin molemmissa päissä on hyvin lämpöä johtava usein keraaminen levy, jonka tehtävä on tehostaa lämmön siirtymistä. Jos halutaan edelleen parantaa lämmön siirtymistä, elementin päihin asennetaan lämmönjohtorivasto.



Kuva 2.1 Peltier-elementin toimintaperiaate. Sähkövirta kulkee jännitelähteeltä johdinten ja puolijohteiden kautta takaisin jännitelähteelle aiheuttaen lämpötilaeron levyjen välille. Tämän seurauksena lämpö alkaa siirtyä kuvan ylhäältä alaspäin. Q_1 on elementin läpi siirtyvä lämpöenergia. (mukaillen TEC Microsystems, 2020).

Valittaessa kuhunkin käyttökohteeseen sopivaa lämpösähköistä elementtiä tulee tietää elementiltä vaadittu lämpötilaero ΔT [°C] sekä maksimi lämmönsiirtokapasiteetti Q_{MAX} [W]. ΔT tarkoittaa TEC-elementin muodostamaa kylmä- ja kuumalevyn välistä lämpötilaeroa, joka riippuu muun muassa elementille syötetystä virrasta ja ulkolämpötilasta. Esimerkiksi jos ulkolämpötilan oletetaan olevan +25 °C, lämminlevyelementti on +35 °C ja ΔT on 30 °C, voi kylmälevy jäähtyä alimmillaan +5 °C:een. Tulee siis ottaa huomioon, että usein lämminlevy on kuumempi kuin ulkolämpötila, mikä rajoittaa alinta saavutettua lämpötilaa. Tämän vuoksi kylmältä levyltä lämpimälle levylle siirtyvän lämpöenergian siirtymistä edelleen ilmaan tehostetaan usein puhaltimella. (Meerstetter Engineering GmbH) Peltier-elementillä voidaan muodostaa maksimissaan 60–72 °C lämpötilaero, kun kyseessä on yksikerroksinen elementti. Jos lämpötilaeroa halutaan vielä suuremmaksi, täytyy kerroksia olla kaksi tai enemmän. Kaksikerroksisella elementillä saavutettavissa oleva ΔT on 80–100 °C. Haittapuolena kerrosten lukumäärän kasvattamisessa on kuitenkin lämmönsiirtokapasiteetin pieneneminen. Maksimi lämmönsiirtokapasiteetilla Q_{MAX} tarkoitetaan kapasiteettia, jonka elementti pystyy siirtämään lämpöenergiaa, kun ΔT on nolla ja vastaavasti suurin lämpötilaero

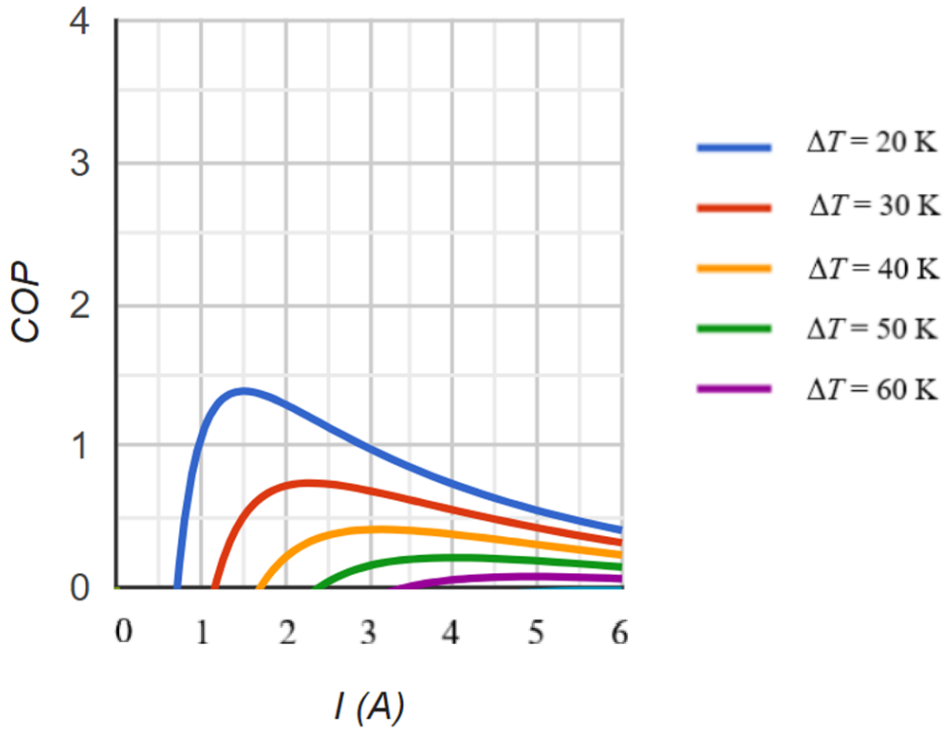
saavutetaan, kun lämmönsiirtokapasiteetti on nolla. Elementille annetut parametrit Q_{MAX} ja ΔT_{MAX} ovat siis teoreettisia. Käytännössä niihin ei ikinä päästä. (TEC Microsystems, 2020)

Määritettäessä laitteelta vaadittua Q_{MAX} parametria, arvioidaan jäähdytettävässä kohteessa olevaa lämpökuormaa. Tässä tutkimuksessa jäähdytettävänä kohteena on 14 kappaletta 2,5 dl virvokejuomatölkkejä. Tämän lisäksi lämpökuormaa aiheutuu ilmavuodoista sekä TEC-elementin lämpenemisestä. Nesteiden osalta lämpöenergia Q_e voidaan määrittää yhtälöllä (Valtanen, 2007)

$$Q_{\mathrm{e}} = c \cdot m \cdot \Delta T, \tag{2.1}$$

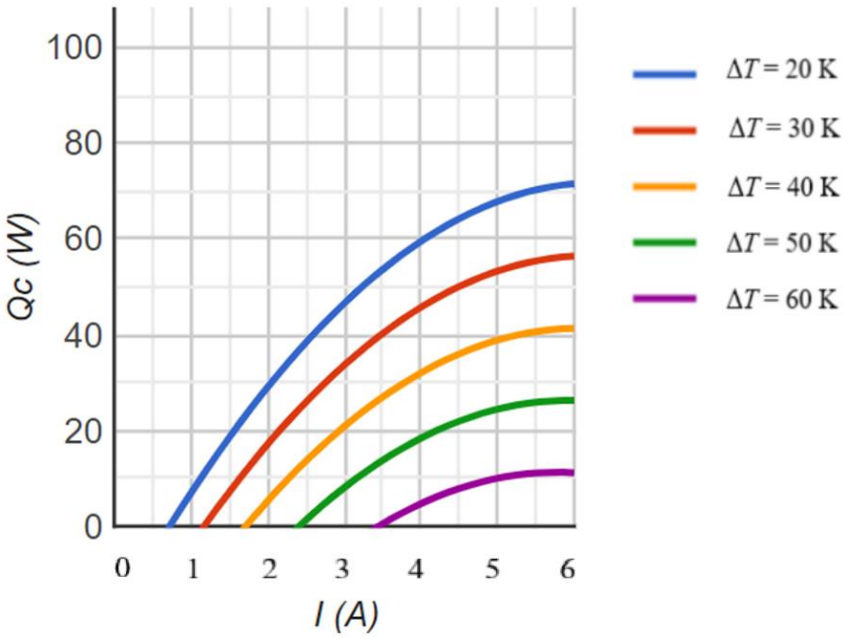
jossa c tarkoittaa ominaislämpökapasiteettia [kJ/(kgK)], m massaa [kg] ja ΔT lämpötilan muutosta [K]. Yksinkertaistamiseksi virvokejuoman oletetaan koostuvan vain vedestä, joten ominaislämpökapasiteettina käytetään lukua 4,19 [kJ/(kgK)]. Nesteen massa saadaan laskemalla sen tilavuus ja kertomalla tilavuus veden tiheydellä. Tässä yhteydessä tiheydestä voidaan käyttää lukua yksi. Oletetaan tavoitelämpötilan olevan +5 °C ja ulkolämpötilan +35 °C, jolloin tarvittavaksi lämpötilan muutokseksi saadaan 30 K. Yhtälöä (2.1) hyödyntämällä lämpöenergiaksi saadaan 440 kJ. Kun saatu lämpöenergia jaetaan jäähdyttämiseen kuluneella ajalla [s], vastaukseksi tulee haluttu lämmönsiirtoteho [W]. Kun jäähdytysajaksi asetetaan 3 tuntia, saadaan vaadituksi lämmönsiirtotehoksi 40 W. Laskussa on jätetty huomiotta alumiinitölkkien, lämpövuotojen sekä kylmäkaapin sisäilman vaatima jäähdytysteho. Näiden vaikutus on kuitenkin suhteellisesti vähäinen. Lisäksi oletetaan, että juomatölkit luovuttavat lämpöä tasaisesti koko jäähdytysajan. Lasku tehtiin haastavimpien olosuhteiden mukaisesti. Jos esimerkiksi juomat asetellaan kylmäkaappiin 20 °C:ssa, vaadittava lämmönsiirtoteho puolittuu.

Edellä määritettyjen parametrien lisäksi olennainen asia TEC-elementtiä valittaessa on tehokerroin. COP (Coefficient of Power) eli tehokerroin kuvaa kylmältä puolelta siirtyneen lämpötehon määrää suhteessa elementin ottamaan sähkötehoon. Tehokerroin ei ole vakio, vaan se muuttuu elementille menevän virran mukaan. Virran vaikutus tehokertoimeen on esitetty kuvassa 2.2.



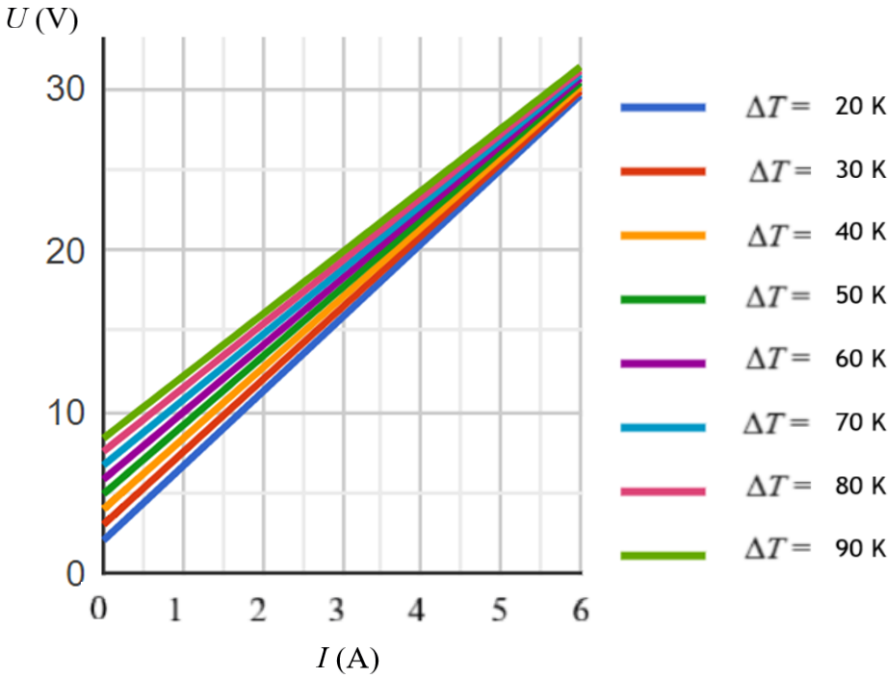
Kuva 2.2. Valmistajan antama tehokertoimen kuvaaja yksikerroksiselle 241-pariselle 6 ampeerin elementille. Virran ohella elementin suorituskykyyn vaikuttaa lämpötilaero, jota on havainnollistettu kuvassa eri käyrillä. (Ferrotec, 2021)

Seuraamalla kuvan 2.2 keltaista 40 K:n käyrää sen huippuarvoon, nähdään että tehokerroin on 0,45. TEC-elementin nimellisvirralla käyrän loppupäässä tehokerroin on 0,25. ΔT 40 K käyrä valitaan elementin mitoittamiseksi haastavimpien olosuhteiden mukaan. Kun haluttu lämpötilanmuutos on suurimmillaan 30 K ja elementin kuumalevyn arvioidaan lämpenevän noin 10 K ympäristön lämpötilaa korkeammaksi, päädytään käyttämään 40 K:n lämpötilaeroa. TEC-elementin tehokertoimen kuvaajasta voidaan lukea laitteen vaatima sähkövirta, joka on 3 A tehokertoimen ollessa huippuarvossaan. Lisäksi kuvaajasta nähdään, että suuremmat lämpötilaerot vaativat suurempia virtoja. Virtaa kasvatettaessa tehokerroin kuitenkin laskee, mutta lämmönsiirtokapasiteetti kasvaa. Virran vaikutus lämmönsiirtokapasiteettiin on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3 241-parisen 6 ampeerin Peltier-elementin lämmönsiirtokapasiteetti virran funktiona. (Ferrotec, 2021)

Tarkasteltaessa keltaista 40 K:n lämpötilaerokäyrää nähdään, että lämmönsiirtokapasiteetti 3 A:n virralla on 20 W ja viiden A:n virralla se on 40 W. Vaadittuun lämmönsiirtotehoon päästään siis 5 A:n virralla. Kyseistä virtaa vastaava jännite nähdään valmistajan tarjoamasta virta–jännitekuvaajasta, joka on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Valmistajan virta–jännitekäyrä 241-pariselle 6 ampeerin moduulille. (Ferrotec, 2021)

Kuvaajasta voidaan lukea vaadituksi jännitteeksi 5 A:n virralla ja 40 K:n lämpötilaerolla 25,5 V. Tässä mitoitusesimerkissä käytetty Peltier-elementti (Model 9500/241/060, Ferrotec) vastaa kutakuinkin optimaalista moduulia työssä käytettävään laitteistoon. Elementin parametrit ovat I_{MAX} = 6 [A], ΔT_{MAX} = 72 [K], U_{MAX} = 33,1 [V] ja $Q_{C,\,MAX}$ = 108 W.

2.2 Aurinkopaneeli

Prototyyppivaiheen jäähdytyselementin nimellisteho on noin 40–50 W, mutta aurinkopaneeli joudutaan ylimitoittamaan muun muassa pilvisyyden tai paneelin suuntauksen vähentäessä toisinaan tehon tuottoa. Laitteiston energianlähteeksi prototyyppiin valitaan siksi nimellisteholtaan 90 W aurinkopaneeli. Paneelin nimellisvirta I_n on 4,7 A ja nimellisjännite U_n on 19,2 V. Aurinkopaneelin kilpiarvot on esitetty tarkemmin kuvassa 2.5.

Kuva 2.5 Työssä käytetyn aurinkopaneelin kilpiarvot. Paneelin nimellisteho P_n on 90 W ja nimellisvirta I_n on 4,7 A.

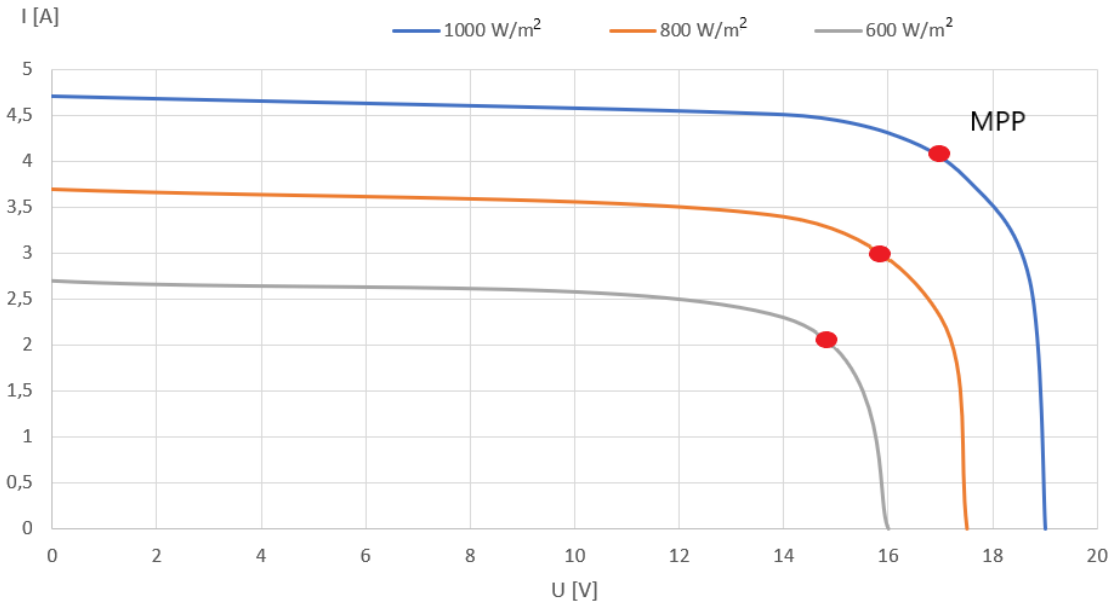
Kilpiarvot on esitetty suomeksi taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1 Aurinkopaneelin kilpiarvot

Nimellisteho P_n	90 W
Oikosulkuvirta I_k	5 A
Avoimen piirin jännite U_k	22,6 V
Maksimitehopisteen virta I_{MPP}	4,7 A
Maksimitehopisteen jännite U_{MPP}	19,2 V
Järjestelmän maksimijännite	715 V DC
Kennojen määrä	36 kpl
Sulakkeen maksimikoko	12 A
Ulkomitat	(780 × 676 × 30) mm
Standardi-olosuhteet (STC)	AM 1,5; 1000 W/m^2; 25 °C

Nimellisteho saavutetaan standardiolosuhteiden mukaisessa 1000 W/m^2 säteilyintensiteetissä, kun AM-luku on 1,5 ja ympäristön lämpötila 25 °C. AM-luku kuvaa auringon säteen kulkemaa matkaa ilmakehässä ja luvun suuruus riippuu auringon säteilykulmasta ja aurinkopaneelin sijainnista maapallolla. Jos aurinko paistaa suoraan ylhäältä, ja ollaan päiväntasaajalla, AM-luku on yksi. Mitä pidemmän matkan säde kulkee ilmakehässä, sitä enemmän säteily vaimenee. Aurinkopaneelin hyötysuhteeseen vaikuttaa myös ympäristön lämpötila. Paneelin lämpötilan noustessa asteella, sen tuottama maksimiteho laskee 0,2–0,6 % nimellistehosta riippuen paneelityypistä (HOMER Pro, 2007). Ohutkalvopaneelilla päästään arvoon –0,2 %/°C, kun taas perinteisemmillä yksi- ja monikidepiikennoilla tehon lämpötilakerroin on noin –4–5 %/°C. 20 °C lämpötilan nousu siis laskee paneelin tuottamaa tehoa 10 %:lla. On hyvä muistaa, että usein aurinkopaneelin lämpötila on ympäristön lämpötilaa korkeampi. Asian ymmärtämiseksi paneelia voi verrata esimerkiksi kuumaan peltikattoon. Lisäksi aurinkopaneelin tuottoon vaikuttavat paneelin suuntauskulma suhteessa aurinkoon ja pinnan puhtaana pito (Motiva, 2020). Valitun paneelin fyysiset mitat ovat 780 × 676 mm^2.

Edellä mainittujen seikkojen lisäksi aurinkopaneelista saatavaan tehoon vaikuttaa oleellisesti paneeliin kytketty kuorma. Jokaisella paneelilla on niille ominainen virta–jännite käyrä. Tämän *I*–*U* käyrän virran määrittää pitkälti auringon säteily intensiteetti, jännitteen pysyessä suhteellisen vakiona. Eri säteilyintensiteettien vaikutus aurinkopaneelin tuottamaan virtaan on havainnollistettu kuvassa 2.6. Paneelin pintalämpötilan kohoaminen näkyisi *I*–*U*-käyrällä käyrän loppupään pienemmällä jännitteellä. Lämpeneminen ei vaikuta virran suuruuteen, mihin perustuukin tehon pieneneminen. Kun jännite pienenee virran pysyessä samana, tehohäviöt kasvavat. (Kalogirou, Soteris A, 2014)



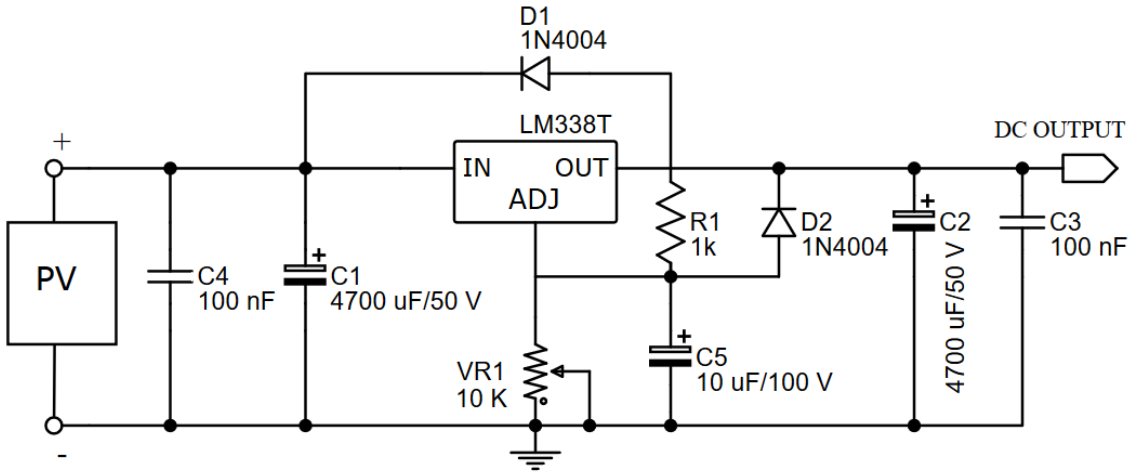
Kuva 2.6 Esimerkki aurinkopaneelin virta – jännite käyrästä. Kuvan käyrät ovat arvioita työssä käytetyn paneelin virtakäyristä. Maksimitehopisteet ovat merkattu punaisella pisteellä (Maximum power point). Auringon säteilyintensiteetin vaikutusta havainnollistaa eri intensiteeteillä piirretyt virtakäyrät. Paneelin lämpötilan kohoaminen vaikuttaisi *I*–*U*-käyrän loppupään jännitteen pienenemiseen virran pysyessä samana.

I–*U* kuvaajassa kunkin pisteen akseleiden kanssa rajaama pinta-ala kuvastaa tuotettua sähkötehoa. Jos aurinkopaneelin tehon tuotto halutaan maksimoida, pitää tavoitella kuvan 2.6 mukaista MPP (Maximum power point) pistettä. Vastaavasti jos ollaan virtakäyrän jommassakummassa ääripäässä, paneelin tuottama teho on vain murto-osan nimellisestä. Tämän vuoksi on tärkeää, että aurinkopaneeli mitoitetaan vastaamaan siihen kytkettyä kuormaa. Kaupallisissa aurinkopaneelijärjestelmissä maksimaalinen tehon tuotto on ratkaistu maksimitehopisteen seuraimella. MPPT:llä (Maximum power point tracker, maksimi tehopisteen seurain) paneelin tehon tuotto pysyy maksimaalisena, vaikka säteilyintensiteetti vaihtuisikin. Aurinkopaneelin kilpiarvoissa esitetyt maksimiarvot I_{MPP} ja U_{MPP} ovat juuri maksimitehopisteen jännite ja virta-arvot.

2.3 Regulaattori

Koska teholähteeksi valittu aurinkopaneeli joudutaan käytännössä ylimitoittamaan suhteessa laitteen käyttämään jännitteeseen, asennetaan virtapiiriin jännitettä alentamaan regulaattori. Regulaattori kytketään aurinkopaneelin jälkeen syöttämään tehoa kylmälaitteelle. Regulaattori on käytännössä aktiivimoodissa toimiva transistori, jonka vastusta säädetään kantavirtaa säätämällä. Kuvan 2.7 mukaisessa piirissä säätötoiminta perustuu säätövastukseen. jolla oh-

jataan regulaattorin läpi kulkevaa tehoa. Asetettaessa säätövastuksen resistanssi suurimmaksi mahdolliseksi, regulaattorin läpi kulkee suurin mahdollinen virta ja päinvastoin. Säätövastus VR1 esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.7 Regulaattorin piirikaavio. Aurinkopaneelilta (PV) tuleva teho ohjataan regulaattorille, josta ulos tulevaa tehoa säädellään VR1 nimetyllä säätövastuksella. Vastuksen resistanssin ollessa suurin mahdollinen myös regulaattorin läpi kulkeva teho on suurin mahdollinen.

Ylimääräinen teho muuttuu regulaattorissa lämmöksi, jonka siirtymistä tehostetaan regulaattorin piirilevyyn asennetulla alumiinisella lämmönjohtorivastolla. Näin vältetään mahdollista ylikuumenemista.

3. MITTAUSJÄRJESTELYT

Tutkittaessa laitteistoa ja sen toimintaa tehdään mittauksia jäähdyttimellä itsellään sekä aurinkopaneelilla kytkettynä jäähdyttimeen. Lisäksi mitataan jäähdyttimen tuottamaa maksimilämpötilaeroa sovittamalla jäähdytin sille tehtyyn uretaanilaatikkoon ja mallintamalla aurinkopaneelia tasajännitelähteellä. Tällä ratkaisulla päästään simuloimaan auringon säteilyenergian muutoksia stabiilimmassa ympäristössä. Lämpöeristetyn uretaanilaatikon on yhdessä jäähdyttimen kanssa tarkoitus mallintaa virvokejuomille suunniteltua jääkaappia. Tässä kappaleessa käydään läpi mittausjärjestelyt, mittalaitteet ja komponentit, joita mittauksessa tarvitaan.

3.1 Jäähdytin

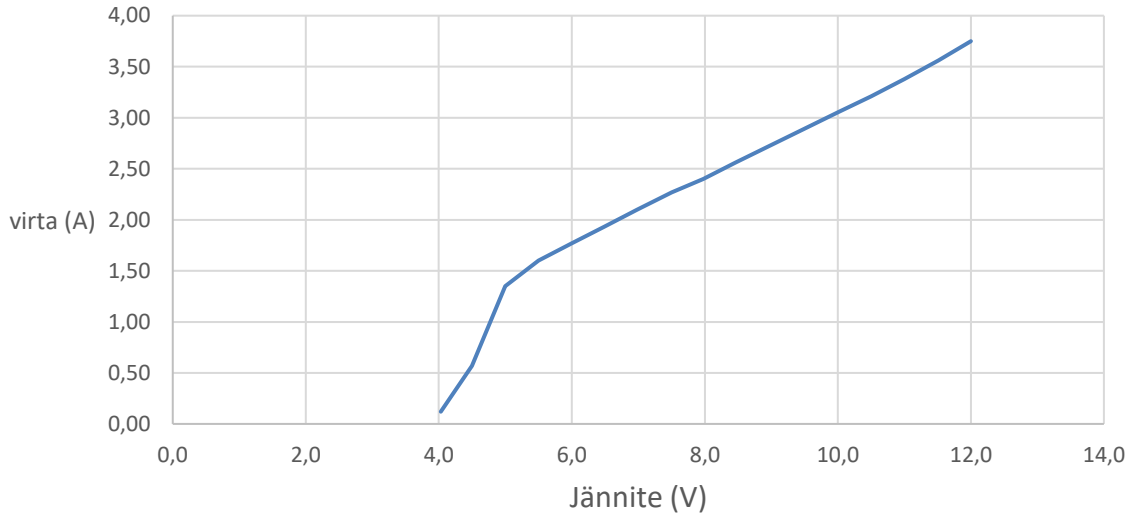
Tässä työssä jäähdyttimeksi kutsutaan Peltier-kennoon pohjautuvaa kylmälaitetta, jossa lämmön siirtymistä on tehostettu puhaltimilla. Jäähdytin on esitetty kuvassa 3.1.

Kuva 3.1. Peltier-kennoon perustuva jäähdytin esitettynä ilman kansilevyä ja kannen kanssa. Peltier-elementin lämpimän puolen alumiininen lämmönjohtorivasto, eli niin kutsuttu lämpösiili sekä puhallin ovat suoraan laitteen kannen alla.

Jäähdyttimen käyttöjännite on 12 V ja nimellistehoksi ilmoitetaan 54 W. Kuvasta 3.1 nähdään Peltier-elementin lämpimän puolen alumiininen lämmönjohtorivasto. Vieressä olevalla puhaltimella tehostetaan lämmön siirtymistä. Lähes identtinen elementin kylmä puoli on styroksieristeen toisella puolella kuvasta katsottuna alapuolella. Kylmän puolen puhallin on samalla akselilla lämpimän puolen puhaltimen kanssa, mutta on halkaisijaltaan pienempi.

Jotta jäähdyttimelle voidaan mitoittaa sopivan kokoinen virtalähde, selvitetään jäähdyttimen tehokäyrä. Laite on alun perin suunniteltu toimimaan verkkovirralla yksivaiheisen muuntajan välityksellä. Muuntajan toisiopuolen kilpiarvot ovat 12 V ja 6 A, mikä tarkoittaisi 72 W tehoa. Todellisen tehokäyrän selvittämiseksi laitteen jännitelähteeksi kytketään muuntajan sijaan laboratoriokäyttöön tehty TENMA (72–10495 Digital Control DC-Power Supply 0–30 V 5AX2) tasajännitelähde. Vaikka jännitelähde itsessään näyttää kytkennän virran sekä jännitteen, mitataan suureet lisäksi yleismittarilla (Fluke 177). Kytkennässä käytetään mahdollisimman lyhyitä banaanijohtoja häviöiden minimoimiseksi. Virtamittari kytketään sar-

jaan ja jännitemittaus rinnan jännitelähteen kanssa. Mittauksessa määritetään arvot parametreille jännitevälillä 4–12 V ja arvot taulukoidaan 0,5 V välein. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 2.2. Tarkemmat arvot ovat esitetty liitteessä 1.

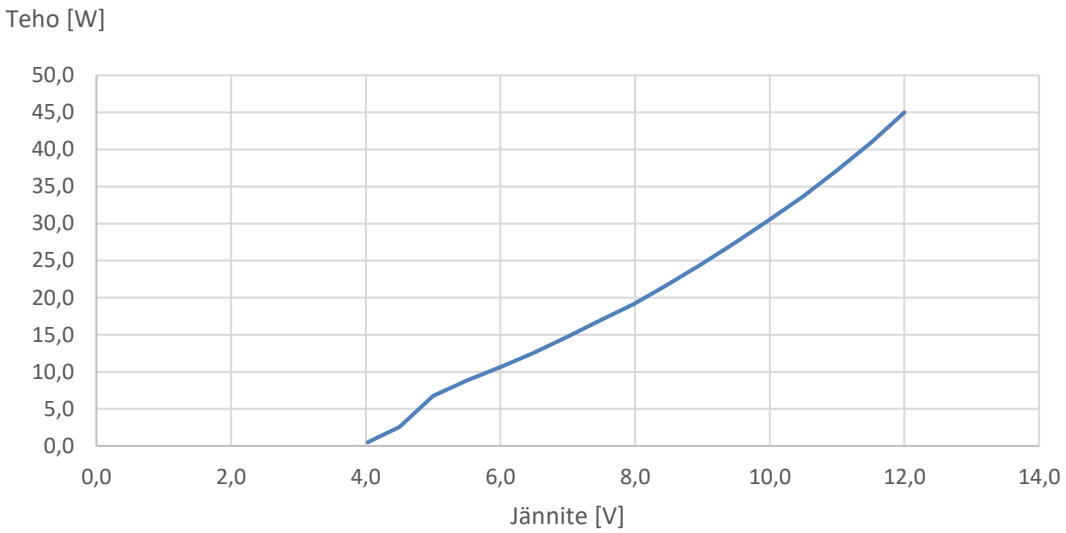


Kuva 3.2. Jäähdyttimen ottama virta jännitteen funktiona. Virran arvot taulukoitiin 0,5 V välein jännitevälillä 4–12 V. Jäähdytin vaatii käynnistyäkseen 4,2 V jännitteen.

Mittausta tehdessä havaitaan, että laitteen käynnistymiseen vaadittu minimijännite on 4,2 V ja minimivirta on 0,27 A. Saatujen virta- ja jännitearvojen perusteella voidaan laitteen ottama teho P laskea yksinkertaisesti

$$P = UI, \tag{3.1}$$

jossa U on tasajännite ja I on tasavirta. Yhtälöllä (3.1) lasketut tehot on esitetty jännitteen funktiona kuvassa 3.3.

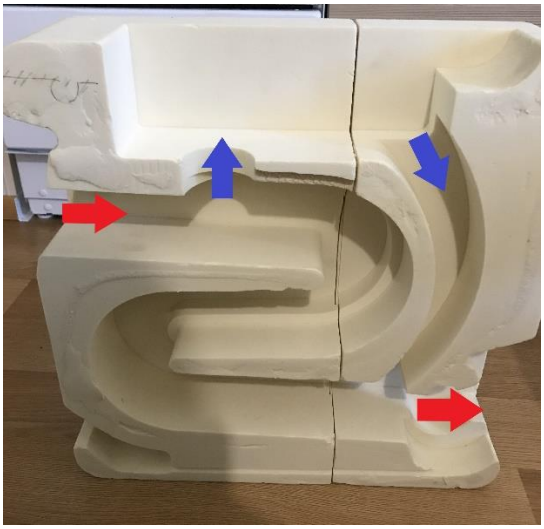


Kuva 3.3 Jäähdyttimen ottama teho jännitteen funktiona.

Kuvaajasta nähdään, että laitteen ottama teho kasvaa likimain lineaarisesti suhteessa jännitteeseen. Laitteen ottamaksi tehoksi 12 V:n nimellisjännitteellä voidaan lukea 45 W.

3.2 Uretaanilaatikko

Kun laitteen ottama teho on selvillä, sovitetaan laite sille tarkoitettuun kuvan 3.4 mukaiseen uretaanilaatikkoon. Kuvassa on sinisillä nuolilla esitetty kylmän ilman kiertoreitti, kun taas punaiset nuolet havainnollistavat virvoketölkkien kulkureittiä.



Kuva 3.4 Jäähdyttimen uretaanilaatikon halkaisukuva. Siniset nuolet kuvaavat kylmän ilman kulkureittiä ja punaiset nuolet virvoketölkkien reittiä. Jäähdytin asemoidaan kuvan yläosaan siten, että kylmäsiili puhaltaa viileää ilmaa alaspäin nuolen suuntaan, ja ilma palaa takaisin kiertoon kylmän siilin etupuolelle kuljettuaan tölkkien läpi. Punaisten nuolten kohdalla sijaitsevat läpät, jotka lämpöeristävät laatikon ulkoilmasta ja tekevät ilmakierrosta suljetun.

Puhaltimen paikka on kuvassa 3.4 ylhäällä sille muotoillussa syvennyksessä. Sininen alaspäin nuoli osoittaa paikan, josta Peltier-kennon kylmältä siililtä tuleva ilma puhalletaan tuulettimella kiertoon. Kylmä ilma kohtaa tölkit laatikon alaosassa, minkä jälkeen ilma jatkaa kulkeutumista tölkkien lomitse viilentäen niitä. Tämän jälkeen ilma palaa takaisin jäähdyttimelle sinisen ylöspäin nuolen mukaisesti, josta puhallin työntää ilman kylmäsiilin läpi. Kiertosuunnalla varmistetaan, että siililtä tuleva kylmin ilma kohtaa ensimmäisenä tölkit, jotka ovat ensimmäisenä poistumassa laitteesta eli menossa käytettäväksi. Punaisten nuolten välisten tölkkien täyttämän reitin molempiin päihin asennetaan läpät, jotka estävät ilman kulkeutumisen ulos uretaanilaatikosta. Jäähdytin upotettuna koottuun prototyyppivaiheen uretaanilaatikkoon esitetty kuvassa 3.5.

Kuva 3.5 Valmis kokoonpano kun jäähdytin on sovitettu prototyyppivaiheen uretaanilaatikkoon. Uretaanilaatikon kylkeen on asennettu lämpötilamittari, jolla mitataan sekä ulkolämpötilaa että laatikon sisälämpötilaa. Jäähdyttimen päällä oikeassa reunassa on korvausilmaritilä, jonka alla on puhallin. Puhallin työntää ulkoilmaa kuumapuolen siilin läpi ja lämmennyt ilma tulee poistosäleiköstä ulos.

Jäähdyttimen kannessa kuvassa 3.5 on nähtävissä ilmanotto sekä -poistoaukko. Oikeanpuoleinen ritilä mahdollistaa korvausilman tulon Peltier-kennon kuumalle puolelle. Ritilän alapuolella on puhallin, joka työntää ilman kuumasiilin läpi. Lämmennyt ilma johdatetaan ulos poistosäleiköstä.

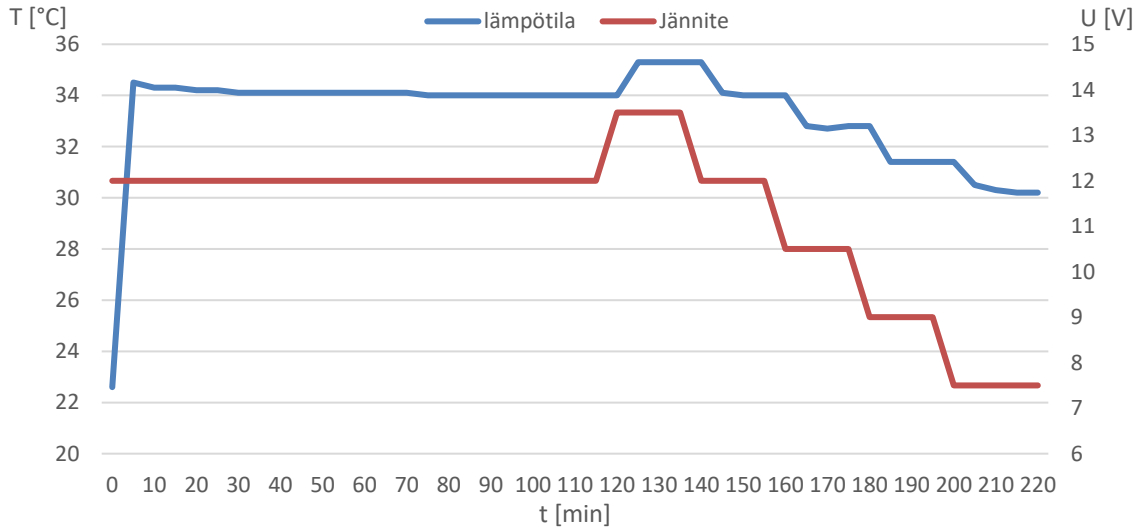
4. TULOKSET

Lämpötilan *T* ollessa paikallinen suure, mitataan lämpötilaa Peltier-elementin molemmilta puolilta jäähdyttimen maksimi lämpötilaeron selvittämiseksi. Tämän lisäksi mitataan lämpötilaa virvokejuomien lähettyviltä sekä laatikon ulkopuolelta. Lämpötilaa ja sen muutoksia

tutkimalla pyritään selvittämään jäähdyttimen optimitoimintapiste sekä virvokejuomiin kohdistama viilennysvaikutus.

4.1 Jäähdyttimen tuottama lämpötilaero ΔT

Lämpötilaeron ΔT selvittämiseksi anturit asennetaan ilman virtaussuunnan mukaan siilin jälkeen noin muutaman senttimetrin päähän. Mittaus tehdään puhaltimen ollessa asemoituna eristelaatikkoon, jotta tulos olisi mahdollisimman realistinen. Lämpötilaa mitataan sekä kylmän että kuuman siilin puolelta. Mittaukset suoritetaan huoneenlämmössä ja mittauksen alkaessa lämpötilan on annettu tasaantua koko laitteistossa vastaamaan huoneen lämpötilaa. Aluksi lämpötilan annetaan tasaantua lähelle loppulämpötilaa, jonka jälkeen jännitettä säätämällä simuloidaan energialähteen tehovaihteluita. Jännitevaihtelut tehdään 1,5 V:n portaissa 13,5 V:sta 7,5 V:iin asti ja lämpötilat kirjataan ylös viiden minuutin välein. Jännitteen muutoksen jälkeen lämpötilan annetaan tasaantua 15 minuuttia. Kuumasiilin tuottaman lämpötilan kehitys ajan suhteen esitetty kuvassa 4.1. Tarkemmat mittaustulokset ovat taulukoitu liitteessä 2.



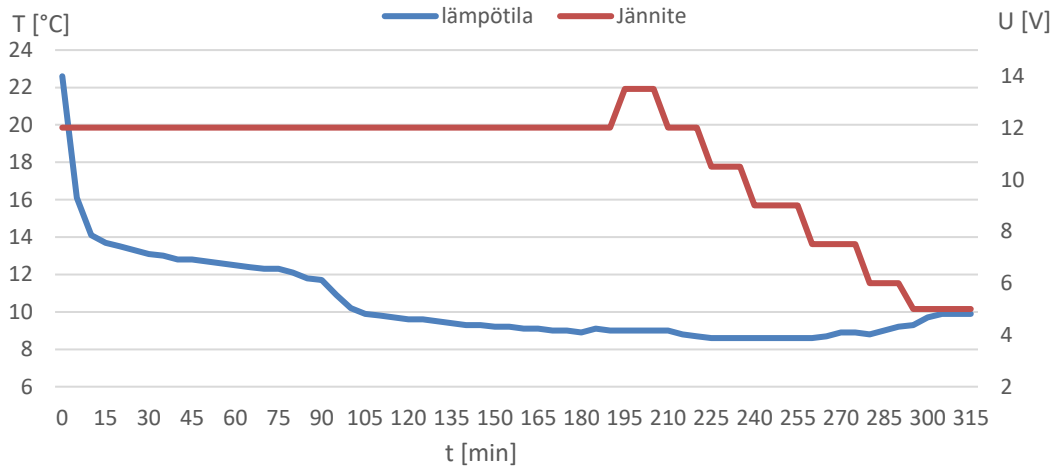
Kuva 4.1 Peltier-kennon kuuman puolen siilin lämpötila esitettynä ajan *t* suhteen. Kuvassa sinisellä on esitetty lämpötilan kehittyminen laitteen käynnistymisestä alkaen. Punainen käyrä kuvaa laitteelle syötettyä jännitettä. Tehtyjen jännitevaihteluiden aikaansaamat lämpötilamuutokset näkyvät käyrien loppupäässä.

Kuvasta 4.1 nähdään, että kuuman siilin lämpötila saavuttaa maksimiarvonsa käytännössä ensimmäisen viiden minuutin aikana. Jännitteen laskemisen ja nostamisen huomataan vaikuttavan suoraan kuumasiilin lämpötilaan. Kun laitteelle syötettävää jännitettä nostetaan,

nousee myös kuumasiilin lämpötila ja päinvastoin. Toisin sanoen punaisen jännitekäyrän muutokset korreloivat pienellä viiveellä suoraan kuumasiilin lämpötilan kanssa.

Mittauksen alussa ympäristön lämpötila on 23,0 °C ja mittauksen edetessä se kohoaa 23,6 °C: seen. Huonelämpötila vakiintuu mittausjakson puolesta välistä loppuun asti samaan 23,6 °C: seen. Vaikka huonetila on hyvin ilmastoitu, lämpötilan nousu on luultavasti seurausta jäähdyttimen tuottamasta lämmöstä. Ympäristön lämpötilan muutamien kymmenyksien nousu ei kuitenkaan näyttäisi mittauksen mukaan vaikuttavan kuumasiilin lämpötilaan. Tähän voisi olla selityksenä lämpimän puolen riittävän tehokas puhalluskapasiteetti. Kuitenkin lähdettäessä kasvattamaan ympäristön lämpötilaa enemmän, lähtee jossain vaiheessa myös kuumasiilin lämpötila nousemaan. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan perehdytä siihen tarkemmin. Kaiken kaikkiaan kuumasiilin lämpötila pysyy hyvin vakaana mittauksen ajan, kuten kuvasta 4.1 voidaan havaita. Huippulämpötila pois lukien jännitteen nosto on 34,5 °C ja sijaitsee heti mittauksen alussa 5 minuutin kohdalla. Jännitteen noston seurauksena lämpötila nousee 35,3 °C: seen.

Kylmän puolen siilin lämpötilan kehittyminen on esitetty kuvassa 4.2 ja tarkemmat mittaustulokset liitteessä 3.



Kuva 4.2 Peltier-kennon kylmän puolen siilin lämpötilan kehitys ajan *t* suhteen. Lämpötila esitettynä kuvassa sinisellä käyrällä ja jännite punaisella käyrällä.

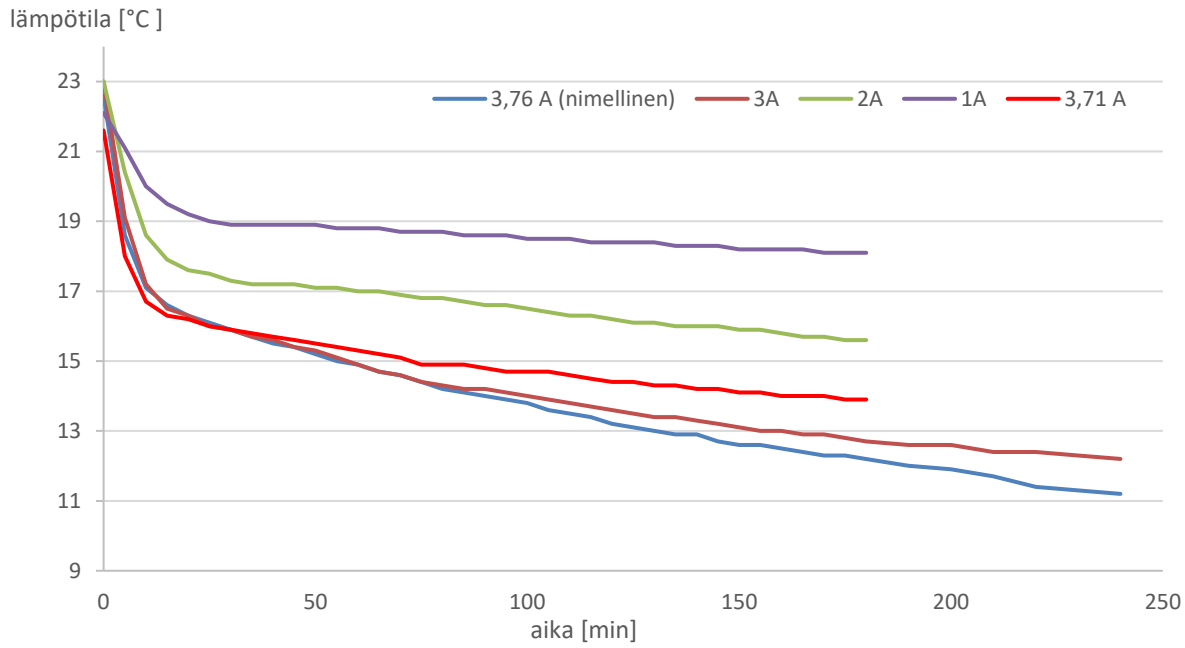
Kuuman puolen siilin lämpötilakehitykseen verrattuna kylmäsiili jäähtyy hitaammin. Kuvasta 4.2 näkee, kuinka sininen lämpötilakäyrä laskee ensimmäiset 10 minuuttia nopeam-

min, minkä jälkeen lasku hidastuu. 80 minuutin kohdalla näkyvä pykälä on seurausta huonosti asemoidusta puhaltimesta. Asennon vaihdon jälkeen lämpötila laskee hetkellisesti nopeammin, jonka jälkeen lasku jälleen hidastuu. Jännitevaihteluiden muutokset on havainnollistettu kuvassa punaisella käyrällä. Jännitteen kasvattamisella ei 15 minuutin testijakson aikana ole vaikutusta kylmäsiilin lämpötilaan. Siinä missä kuumasiili lämpenee, kylmän siilin lämpötila pysyy muuttumattomana. Kun taas jännitettä lasketaan alle nimellisen jännitteen 1,5 V:n portaissa, kylmäsiilin lämpötila lähtee loivaan laskuun. Laskettaessa jännite 9 V:sta 7,5 V:iin, lämpötilan lasku loppuu ja se lähtee kohoamaan. Jäähdyttimen teho 9 V:n jännitteellä on kuvan 3.3 mukaan noin 25 W. Lämpötilan laskeminen jännitettä pienennettäessä perustuu lämpötilan laskuun kuumasiilin puolella. Kuitenkin laskettaessa jännitettä edelleen, jäähdyttimen tuottama lämpötilaero ΔT pienenee suhteessa enemmän kuin kuumasiilin lämpötila. Tästä seuraa, että lämpötila kylmäsiilin puolella lähtee kasvuun. Verrattaessa kuuma- ja kylmäsiilien lämpötilojen muutoksia on hyvä muistaa, että kylmäsiili on lämpöeristetyn uretaanilaatikon sisällä, kun taas kuumasiili on yhteydessä ympäristöön. Toisin sanoen kylmän ilman kierto on teoriassa suljettu. Käytännössä esiintyy kuitenkin ilmavuotoja, jotka vaikuttavat osaltaan laitteella saavutettavan alimman mahdollisen lämpötilan tavoitteluun.

Nimellisjännitteellä kylmäsiililtä mitattu alin lämpötila on 8,9 °C ympäristön lämpötilan ollessa 23,7°C. Laitteen kehittämäksi lämpötilaeroksi ΔT tulee siten 14,8 °C. Laskettaessa jännitettä päästään parhaimmillaan 8,6 °C lämpötilaan ympäristön lämpötilan ollessa 24,3 °C ja jännitteen 9 volttia. Tällöin lämpötilaero on 15,7 °C.

4.2 Laitteen juomiin kohdistama viilennys vaikutus

Mitattaessa virvokejuomiin kohdistuvaa vaikutusta lämpömittarin anturi asennetaan uretaanilaatikon alimman osan ylälaitaan juomien välittömään läheisyyteen niiden yläpuolelle. Viilennyskykyä mitataan virvoitusjuomatölkeillä täytetyllä kylmäkaapilla. Uretaanilaatikkoon mahtuu 14 kappaletta 2,5 dl tölkkejä. Lämpötila-anturi sijaitsee alimpien tölkkien yläpuolella noin 15 cm ennen tölkkien ulostuloluukkua. Viilennyskyky mitataan viidellä eri virralla kuvan 4.3 mukaisesti ja lämpötilat taltioidaan viiden minuutin välein.



Kuva 4.3. Kylmäkaapin sisälämpötilan kehitys ajan *t* funktiona. Lämpötilan kehitys mitataan viidellä eri teholla, joita kuvastavat eri väriset käyrät. Keskimmäisenä oleva kirkkaan punainen käyrä on todennäköisesti mittausvirhe ja jäähdytin on ollut huonosti asemoituna.

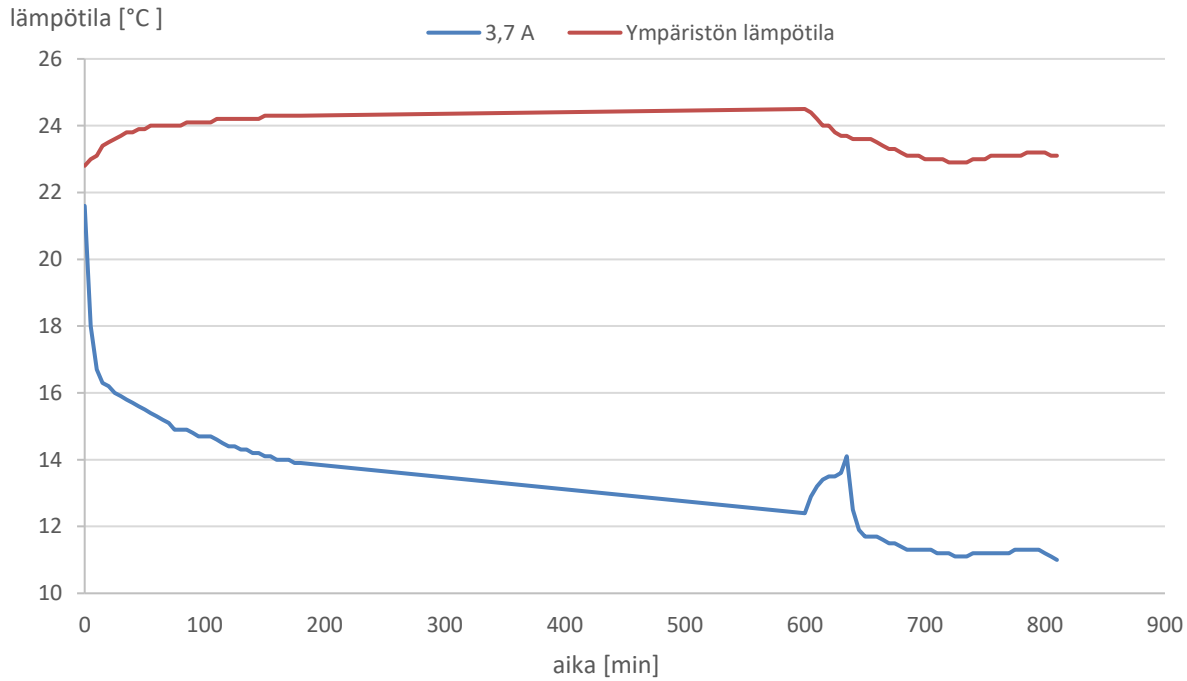
Lämpötilan aleneminen tapahtuu kuvan 4.3 mukaisesti kahdessa osassa. Ensimmäisten 10–15 minuutin aikana lämpötilan lasku on jyrkempää, minkä jälkeen lasku hidastuu. Lämpötilan käyttäytyminen on pitkälti samanlaista kuin suoraan kylmäsiililtä mitattu lämpötilan kehitys. Erona on kuitenkin hitaampi lämpötilan aleneminen verrattuna kuvan 4.2 mittaukseen. Ero johtuu kahdesta syystä. Ensinnäkin nesteiden ominaislämpökapasiteetti on suuri. Tämä tarkoittaa, että ne sitovat paljon lämpöenergiaa lämmetessään ja päinvastaisesti luovuttavat lämpöenergiaa jäähtyessään. Tässä tapauksessa juomatölkeistä vapautuva lämpöenergia hidastaa kylmäkaapin viilenemistä. Toinen syy eroavaisuuteen on mittausanturin sijainti kauempana kylmäsiilistä. Kuvan 4.3 mittauksessa valittu anturin sijainti antaa realistisemman kuvan kylmäkaapin keskimääräisestä lämpötilasta.

Vertailtaessa kuvan 4.3 eri virtakäyrien lämpötilakehitystä huomataan keskimmäisen käyrän poikkeavan muista. Keskimmäisen käyrän 3,71 A:lla tehdyssä kokeessa lämpötila laskee hitaammin kuin toisiksi alimpana olevassa 3 A:n käyrässä. Selitys tälle on luultavasti huonosti asemoitu jäähdytin, jolloin ilmavuoto jäähdyttimen ja uretaanilaatikon välissä on ollut suurempi, mikä aiheuttaa tuloksen vääristymän. Yhden, kahden ja kolmen A:n virroilla kylmäkaapin viileneminen ja maksimilämpötilaerot ovat loogisia suhteessa jäähdyttimen ottamaan tehoon. Saavutettu lämpötilaero kasvaa näissä tapauksissa samassa suhteessa virran

kanssa. Kun verrataan nimellistä 3,76 A:n virtaa kolmen A:n mittaukseen, ero supistuu huomattavasti ja esimerkiksi kahden tunnin kohdalla eroa on alle puoli astetta. Neljän tunninkin jälkeen eroa on vain asteen verran. Tulosten mukaan laite siis kykenee lähes samaan jäähdytyskykyyn kolme A:n virralla kuin nimellisvirralla. Tulosta tukee kappaleessa 4.1 määritetty rajajännite 9 V:a, jota alemmissa arvoissa lämpötila alkaa nousta. Tehonvaihteluiden kannalta kylmäkaappi siis kestää syöttöjännitteen tippumisen 9–10 V:iin, ilman että kaapin lämpötilassa tapahtuu muutoksia. Tehonvaihteluista lisää kappaleessa 4.3. Kolmen A:n virralla jäähdyttimen jännite on kuvan 3.2 mukaan vähän alle 10 V. Mittauksessa nimellisvirralla saadaan lämpötilaeroksi 4 tunnin kohdalla 11,4 °C sisälämpötilan ollessa 11,2 °C.

4.3 Tehonvaihteluiden vaikutukset kylmäkaapin sisälämpötilaan

Kylmäkaapin sisälämpötilan muutoksia tutkitaan vastaavasti tehoa vaihtelemalla kuten jäähdyttimen kanssa sekä lisäksi katkaisemalla virta kokonaan ja seuraamalla, miten nopeasti lämpötila alkaa nousta. Virran katkaisun vaikutus näkyy kuvassa 4.4 kohdassa 600 minuuttia, kun sisälämpötila alkaa nousta.



Kuva 4.4. Kylmäkaapin sisä- ja ulkolämpötilan kehitys ajan funktiona, kun tehonsyöttöön tulee katkos. Jäähdyttimen virta on katkaistu kohdassa 600 minuuttia ja uudelleenkäynnistetty kohdassa 630 minuuttia. Tämän jälkeen virraksi on säädetty 3 A.

Virran katkaisun jälkeen kuvan 4.4 mittauksessa laite käynnistettiin uudestaan 30 minuutin virrattomuuden jälkeen. Käynnistyksen yhteydessä virta laskettiin 3 A:iin. Käynnistyksen

jälkeen lämpötila jääkaapin sisällä lähti hetkellisesti nousemaan, mikä näkyy piikkinä 630 minuutin kohdalla. Tämän jälkeen lämpötila laskee kuitenkin muutamalla asteella ja edelleen jopa alemmas kuin ennen virran katkaisua. Samaan aikaan laskee kuitenkin myös ympäristön lämpötila, joten saavutettu lämpötilaero suhteessa ympäristöön on edelleen sama. Ympäristön lämpötilan kohoaminen mittauksen alussa ja laskeminen laitteen tehoa pienennettäessä indikoi vahvasti laitteen vaikutuksesta ympäristön lämpötilaan. Mittaus osoittaa, että laite kykenee säilyttämään lämpötilaeron myös 3 A virralla. 30 minuutin virrattomuuden aikana jääkaapin sisälämpötila nousi 1 °C.

Jännitettä nostettaessa yli nimellisen 13 V:iin, seuraa siitä kaikkien lämpötilojen nousu. Ensin lämpenee kuumasiili kuten kuvassa 4.1 ja tästä seuraa kylmäsiilin ja ulkolämpötilan nousu kahdella kymmenyksellä. Koska molemmat lämpötilat nousevat samassa suhteessa, jännitteen nostolla ei saavuteta etua lämpötilaeron suhteen. Kuvan 4.4 mittauksella jääkaapin ja ympäristön lämpötilaeroksi saadaan nimellisvirralla 10 tunnin kohdalla noin 12 °C ja 3 A:n virralla kohdassa 730 minuuttia 11,6 °C. Verrattaessa saatua tulosta kappaleen 4.1 tulokseen 15,7 °C huomataan, että niissä on noin 4 °C eroa. Ero selittyy lämpöhäviöillä ja vuodoilla. Lisäksi jäähtymistä hidastaa nesteiden suuri ominaislämpökapasiteetti. Suurin lämpövuoto prototyyppivaiheen eristelaatikossa on todennäköisesti jäähdyttimen ja laatikon välissä. Tämä vuoto todennäköisesti pienenisi huomattavasti saumaamalla väli hyvin lämpöä eristävällä aineella, kuten uretaanilla.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä selvitettiin kirjallisuuskatsauksen avulla energiaomavaraisen Peltier-pohjaisen kylmälaitteiston eri komponenttien toimintaperiaatteet. Koska energianlähteenä laitteistossa on aurinkopaneeli, selvitettiin aurinkopaneelin toimintapisteen määräytymistä *I–U* käyrästöllä kuorman ja auringon intensiteetin mukaan. Jotta paneelista saataisiin paras hyötysuhde, tulisi pyrkiä mahdollisimman lähelle aurinkopaneelin maksimitehopistettä (MPP, maximum powerpoint). Koska auringon säteilyintensiteetti kuitenkin vaihtelee, on paneelin mitoittaminen MPP:n kannalta haastavaa.

Mitattaessa prototyyppivaiheen laitteen kuluttamaa sähkötehoa havaittiin sen olevan nimellisjännitteellä 45 W. Kylmälaitteen teholähteeksi valittiin 90 W aurinkopaneeli, jonka nimellisvirta on 4,7 A ja nimellisjännite on 19,2 V. Valitun paneelin teho riittäisi kattamaan hyvin

laitteen energian kulutuksen, mutta haasteena on jännitteen säätö optimaaliseksi. Tässä työssä valittu aurinkopaneeli ylimitoitettiin suhteessa laitteen vaatimaan tehoon häviöiden ja pilvisyyden kompensoimiseksi. Ylimitoituksessa haasteeksi tuli kuitenkin tehon rajoittaminen laitteelle optimaaliseksi vaihtelevissa olosuhteissa. Tehon rajoittamiseen valittu regulaattori laskee jännitettä aina saman verran, eikä mukaudu vaihteleviin olosuhteisiin. Tämän vuoksi jatkossa voisi kyseeseen tulla jonkinlainen aktiivinen säätöpiiri tai lataussäädin. Työssä käytetyllä regulaattorilla laite toimii kuitenkin hyvin, kun aurinkopaneelin tuotto on lähellä sen maksimitehopistettä. Regulaattorin käyttöäkään ei ole poissuljettu, mikäli olosuhteet säteilyintensiteetin kannalta ovat likimain stabiilit.

Tehtäessä prototyyppivaiheen kylmälaitteelle suorituskykymittauksia saatiin laitteen muodostamaksi lämpötilaeroksi ΔT suhteessa ympäristön lämpötilaan parhaimmillaan 15,7 °C. Mikäli tavoitelämpötilaksi asetetaan 10 °C ja ulkolämpötila on 25 °C, saavutettu ΔT riittää, mutta jäähdytysaika jää silti pitkäksi. Vietäessä kylmälaite lämpimiin maihin ΔT jää kuitenkin selkeästi riittämättömäksi. Tämän vuoksi prototyyppiä tulisi päivittää kappaleessa 2.1 määritetyllä jäähdytysteholtaan suuremmalla TEC-elementillä. Määrityksen perusteella laitteistoon optimaalinen TEC-elementti olisi jäähdytyskapasiteetiltaan $Q_{C,\,MAX}$ 108 W. Tämän suuremman kokoluokan (Model 9500/241/060, Ferrotec) elementin etuina on suurempi jäähdytysteho ja lämpötilaero. Lisäksi paneelin mitoittaminen olisi helpompaa, kun päivitetyn elementin vaatima tehoalue on laajempi. Nykyisen elementin optimaaliseksi sähkötehoalueeksi määritettiin 25–45 W, joka vastaa jännitteessä (9–12) V. Isomman elementin optimaalinen sähkötehoalue on 50–128 W, joka vastaa (15–26) V jännitettä. Laajempi tehoalue mahdollistaa myös regulaattorin pois jättämisen, mikä yksinkertaistaa laitteistorakennetta. Kylmälaitteelle vaadituksi lämmönsiirtotehoksi määritettiin 3 tunnin jäähdytysajalla ja 30 °C lämpötilaerolla 40 W. Uudella elementillä saavutettava lämmönsiirtoteho on optimaalisella sähkötehoalueella 20–50 W, joten se vastaa vaatimuksia. Koska elementin optimaalinen sähkötehoalue on 50–128 W, voidaan aurinkopaneelin nimellistehoksi määrittää 125 W. Tällä mitoituksella TEC-elementti toimii vielä optimaalisella alueella, vaikka aurinkopaneeli tuottaisi vain puolet nimellistehostaan.

Saatujen tulosten perusteella aurinkopaneelikäyttöisen kylmälaitteen toteutus on mahdollista, mutta nykyinen jäähdytyselementti on liian pienitehoinen vaativimpiin olosuhteisiin. Tehokkaamman elementin myötä tulevaisuudessa tulee kiinnittää huomiota mahdolliseen jäätymiseen ja alimman lämpötilan rajoittamiseen. Tämän lisäksi laitteen toimintaa tulisi

testata sille käyttötarkoituksen mukaisissa ympäristön lämpötiloissa ja kosteusoloissa. Tässä työssä tehdyt mittaukset tehtiin huoneenlämpötilassa.

LÄHTEET

Detector. 2020. *R-aineet eli kylmäaineet*. [detector.fi www-sivuilla]. [viitattu 30.12.2020]. Saatavissa
https://detector.fi/r-aineet-eli-kylmaaineet/

Ferrotec. 2021. *Thermoelectric modules*. [ferrotec.com www-sivuilla]. [viitattu 30.1.2021]. Saatavissa
https://thermal.ferrotec.com/products/peltier-thermoelectric-cooler-modules/9500_241_060-b/

Homer Pro. 2007. *PV Temperature Coefficient of Power*. [Homerenergy.com www-sivulla] [viitattu 2.01.2021] Saatavissa
https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/pv_temperature_coefficient_of_power.html

Hunker. 2016. *How Do Portable Refrigerators Work?* [hunker.com www-sivuilla]. [viitattu 30.10.2020]. Saatavissa
https://www.hunker.com/13409863/how-do-portable-refrigerators-work

Kalogirou, Soteris A. 2014. *Solar Energy Engineering: Processes and systems*. Second Edition. Amsterdam: Academic Press. s. 490.

Meerstetter Engineering GmbH. *Peltier Element Design Guide.* [verkkodokumentti]. [viitattu 15.01.2021] Saatavissa
https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/32-tec-peltier-element-design-guide

Motiva. 2020. *Aurinkosähköjärjestelmän teho*. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.01.2021] Saatavissa
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelman_teho

TEC Microsystems. 2020. *Thermoelectric Coolers FAQ*. [TEC Microsystems www-sivuilla]. [Viitattu 15.12.2020]. Saatavissa:
https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectic-coolers-faq.html

Valtanen E. 2007. *Tekniikan taulukkokirja.* 14. painos. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy. s. 227

LIITTEET

LIITE 1. Jäähdyttimen ottama teho eri jännitteillä.

U (V)	I (A)	teho (W)
12	3,75	45
11,51	3,56	40,9756
11	3,38	37,18
10,5	3,21	33,705
10,02	3,06	30,6612
9,49	2,89	27,4261
8,99	2,73	24,5427
8,46	2,56	21,6576
7,98	2,4	19,152
7,5	2,27	17,025
6,98	2,1	14,658
6,48	1,93	12,5064
6	1,77	10,62
5,5	1,6	8,8
5	1,35	6,75
4,5	0,57	2,565
4,03	0,12	0,4836

LIITE 2. Kuumasiilin lämpötilan kehitys

Lämpötila [C]				
kuumasiili	ympäristö	jännite [V]	virta [A]	aika [min]
22,6	22,9	12	4,1	0
34,5	23	12	3,76	5
34,3	23	12	3,75	10
34,3	23,1	12	3,75	15
34,2	23,1	12	3,75	20
34,2	23,1	12	3,75	25
34,1	23,1	12	3,75	30
34,1	23,1	12	3,75	35
34,1	23,2	12	3,75	40
34,1	23,2	12	3,75	45
34,1	23,3	12	3,75	50
34,1	23,3	12	3,75	55
34,1	23,3	12	3,75	60
34,1	23,3	12	3,75	65
34,1	23,3	12	3,75	70
34	23,3	12	3,75	75
34	23,3	12	3,74	80
34	23,3	12	3,74	85
34	23,4	12	3,74	90
34	23,4	12	3,74	95

34	23,5	12	3,74		100
34	23,5	12	3,74		105
34	23,6	12	3,74		110
34	23,6	12	3,74		115
34	23,6	13,5	4,19		120
35,3	23,6	13,5	4,19		125
35,3	23,6	13,5	4,19		130
35,3	23,6	13,5	4,19		135
35,3	23,6	12	3,72		140
34,1	23,6	12	3,73		145
34	23,6	12	3,74		150
34	23,6	12	3,74		155
34	23,6	10,5	3,25		160
32,8	23,6	10,5	3,27		165
32,7	23,6	10,5	3,27		170
32,8	23,6	10,5	3,27		175
32,8	23,6	9	2,77		180
31,4	23,6	9	2,78		185
31,4	23,6	9	2,78		190
31,4	23,6	9	2,78		195
31,4	23,6	7,5	2,26		200
30,5	23,6	7,5	2,29		205
30,3	23,6	7,5	2,29		210
30,2	23,6	7,5	2,3		215
30,2	23,6	7,5	2,3		220

LIITE 3. Kylmäsiilin lämpötilan kehitys

Lämpötila [C]					
kylmäsiili	**ympäristö**	**jännite [V]**	**virta [A]**		**aika [min]**
22,6	22,9	12	4,1		0
16,1	22,9	12	3,72		5
14,1	23	12	3,71		10
13,7	23	12	3,71		15
13,5	23	12	3,71		20
13,3	23	12	3,71		25
13,1	23	12	3,71		30
13	23	12	3,71		35
12,8	23,1	12	3,7		40
12,8	23,1	12	3,7		45
12,7	23,1	12	3,7		50
12,6	23,2	12	3,7		55
12,5	23,2	12	3,7		60
12,4	23,3	12	3,7		65
12,3	23,3	12	3,7		70
12,3	23,3	12	3,7		75
12,1	23,4	12	3,74	kansi kiinni pa-remmin	80

11,8	23,4	12	3,74		85
11,7	23,4	12	3,74		90
10,9	23,5	12	3,77		95
10,2	23,5	12	3,77		100
9,9	23,4	12	3,77		105
9,8	23,4	12	3,77		110
9,7	23,5	12	3,77		115
9,6	23,5	12	3,77		120
9,6	23,5	12	3,77		125
9,5	23,5	12	3,77		130
9,4	23,5	12	3,77		135
9,3	23,5	12	3,77		140
9,3	23,5	12	3,77		145
9,2	23,5	12	3,77		150
9,2	23,6	12	3,77		155
9,1	23,6	12	3,76		160
9,1	23,6	12	3,76		165
9	23,6	12	3,76		170
9	23,6	12	3,76		175
8,9	23,7	12	3,76		180
9,1	23,8	12	3,76		185
9	23,8	12	3,75		190
9	23,9	13,5	4,2	jännitteen nosto	195
9	23,9	13,5	4,2		200
9	23,9	13,5	4,2		205
9	23,9	12	3,75	jännitteen lasku	210
8,8	23,9	12	3,75		215
8,7	24	12	3,75		220
8,6	24	10,5	3,23	jännitteen lasku	225
8,6	24	10,5	3,27		230
8,6	24	10,5	3,27		235
8,6	24	9	2,75	jännitteen lasku	240
8,6	24	9	2,79		245
8,6	24,1	9	2,79		250
8,6	24,2	9	2,79		255
8,6	24,3	7,5	2,28		260
8,7	24,3	7,5	2,3		265
8,9	24,3	7,5	2,3		270
8,9	24,3	7,5	2,3		275
8,8	24,2	6	1,77		280
9	24,2	6	1,8		285
9,2	24,1	6	1,8		290
9,3	24	5	1,4		295
9,7	23,9	5	1,4		300
9,9	23,8	5	1,4		305
9,9	23,6	5	1,4		310
9,9	23,6	5	1,1		315