



# Lämpösähköisen ilmiön mahdollisuudet hukkalämmön hyödyntämiseksi

## Opinnäytetyö

Lauri Olin

Opinnäytetyö, AMK

Huhtikuu 2023

Tekniikan ala

Sähkö- ja automaatiotekniikka, insinööri (AMK)

Lauri Olin

## Lämpösähköisen ilmiön mahdollisuudet hukkalämmön hyödyntämiseksi

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2023, 52 sivua.

Tekniikan ala. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### Tiivistelmä

Opinnäytetyö tehtiin osana Jyväskylän ammattikorkeakoulun LäSä – lämpösähköiset ratkaisut energiatehokkuuden lisääjinä hanketta. Hanke tutkii uusiin materiaaleihin perustuvaa lämpösähköistä ilmiötä hyödyntävien ratkaisujen löytämistä. Energiatehokkuuden parantaminen, hukkalämpöjen hyödyntäminen lämpösähköistä ilmiötä käyttäen ja lämpösähköistä ilmiötä hyödyntävien ratkaisujen parempi ymmärtäminen ovat keskeisessä osassa hanketta.

Tavoitteena opinnäytetyössä oli viedä lämpösähköinen ilmiö todelliseen ympäristöön, kerryttää kokemusta ilmiöstä todellisessa ympäristössä ja tunnistaa mahdollisia ongelmakohtia. Tutkimuksen alkuvaiheessa karotettiin soveltuvia kohteita testilaitteen rakentamiselle sekä perehdyttiin ilmiöön ja aiheen kirjallisuuteen.

Tehtäväksi muodostui suunnitella ja rakentaa testilaitte todelliseen teolliseen testiympäristöön, joka tuottaa sähköä lämpösähköistä ilmiötä hyödyntäen. Valmistuneen testilaitteen suorituskykyä testattiin ja siitä saatuja tuloksia analysoitiin ja dokumentoitiin. Samalla mahdolliset ongelmakohdat pyrittiin tunnistamaan tulevaisuuden laitteiden rakentamista silmällä pitäen. Lopputuloksena syntyi testilaitte, jota käytettiin havainnollistamaan Seebeckin- ilmiötä käytännössä LäSä- hankkeen yrityspäivillä ja testilaitteesta saadut mittaustulokset.

Valmis testilaitte tuotti lämmöstä sähköä Seebeckin-ilmiötä hyödyntäen ja sen suorituskyvystä ja olosuhteista saatiin kerättyä tietoa. Tavoitellusta tehosta jäätiin kuitenkin odotusten alapuolelle. Ongelmakohtia onnistuttiin tunnistamaan tulevaisuuden laitteita varten.

### Avainsanat (asiasanat)

Lämpösähköinen ilmiö, Seebeckin ilmiö, lämpösähköiset laitteet, lämpösähköinen moduuli, TEG, TEG-moduuli

### Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

**Lauri Olin**

### **Possibilities of the thermoelectric phenomenon for the utilization of waste heat**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2023, 52 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Electrical and Automation Technology. Bachelor's thesis

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

The thesis was done as part of Jyväskylä University of Applied Sciences LäSä- thermoelectric solutions as energy efficiency enhancers project. The project aims to find solutions that uses the thermoelectric phenomenon based on new materials. Improving energy efficiency, utilization of waste heat using the thermoelectric phenomenon and better understanding of solutions that utilize the thermoelectric phenomenon are a central part of the project.

The goal was to bring the thermoelectric phenomenon to a real environment, to gather experience about the phenomenon in a real environment and to identify possible problem areas. In the beginning of the research, potential suitable sites for the construction of the test device were mapped. The phenomenon and the literature on the topic were familiarized.

The task was to design and build a test device in a real industrial test environment that produces electricity using the thermoelectric phenomenon. The performance of the finished device was tested, and the results obtained were analyzed and documented. Same time, efforts were made to identify possible problem area within the test device, future devices in mind. The end result was the test device that was used to illustrate the Seebeck phenomenon in practice at the company days of the LäSä project and the measurement results obtained from the test device.

The finished test device produced electricity from heat using the Seebeck effect and measurement results were collected about its performance and conditions. However, the targeted produced power fell short of expectation. Problems were successfully identified for future devices.

### **Keywords/tags (subjects)**

Thermoelectric phenomenon, Seebeck effect, thermoelectric devices, thermoelectric module, TEG, TEG module

### **Miscellaneous (Confidential information)**

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>4</b>
1.1	Opinnäytetyön tausta ja tarpeellisuus .....	4
1.2	Opinnäytetyön tavoite, rajaus ja lopputulos .....	4
<b>2</b>	<b>Tutkimusasetelma</b> .....	<b>5</b>
2.1	Kehittämistutkimus .....	5
2.2	Eettisyys ja luotettavuus .....	5
<b>3</b>	<b>Lämpösähköiset ilmiöt</b> .....	<b>6</b>
3.1	Fysikaalisuus.....	6
3.2	Seebeckin-ilmiö ja Seebeckin kerroin .....	7
3.3	Käänteinen Seebeckin-ilmiö, Peltier .....	8
3.4	Thomson-ilmiö .....	9
<b>4</b>	<b>Lämpösähköisten laitteiden rakenne</b> .....	<b>10</b>
4.1	Materiaalit ja Hyvyyysluku ZT .....	10
4.2	TEG-moduulit .....	12
<b>5</b>	<b>Alustavat pienoiskoon testit</b> .....	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Testilaitte</b> .....	<b>14</b>
6.1	Asennuspaikka.....	14
6.2	Testilaitteen suunnittelu .....	15
6.2.1	TEG-moduulit .....	17
<b>7</b>	<b>Mittaukset</b> .....	<b>18</b>
7.1	Mittausten suunnittelu .....	18
7.1.1	Tehon mittaus ja resistanssin laskeminen.....	19
7.1.2	TEG- moduulien pintojen lämpötilaero ( $\Delta T$ ) .....	19
7.1.3	Lämmön johtumisen mittaaminen .....	20
7.1.4	Hyötysuhteen laskeminen .....	20
7.2	Mittauksissa käytettävät laitteet .....	22
7.2.1	Datalogger DataTaker DT80W ja DataTaker CEM20 laajennusmoduuli .....	22
7.2.2	Lämpötila-anturi .....	23
7.2.3	Virta-anturi.....	23
7.2.4	Virtausanturi, Pitot-putki.....	23
7.3	Mittausten käytännön toteutus .....	24
<b>8</b>	<b>Saatujen tulosten tarkastelu</b> .....	<b>25</b>
8.1	Mittaus 3 .....	25

8.2	Mittaus 4 .....	27
8.3	Mittaus 5 .....	29
8.4	Mittaus 6 .....	31
<b>9</b>	<b>Pohdintaa mittaustuloksista .....</b>	<b>32</b>
<b>10</b>	<b>Kehitysehdotus.....</b>	<b>34</b>
10.1	Jäähdytyksen toteutus .....	34
10.2	Moduulien kiinnitys.....	36
<b>11</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>36</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>38</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>41</b>
	Liite 1. Alustavan testin tulokset.....	41
	Liite 2. Marlow Industries TG12-8-01LS .....	42
	Liite 3. Mittaupöytäkirja .....	44
 <b>Kuviot</b>		
	Kuvio 1. Elektronien liike materiaalissa. (Arar 2022.) .....	7
	Kuvio 2. Lämpösähköinen laite. (Vaidyanathan 2022.) .....	7
	Kuvio 3. Peltier-ilmiö (Mardi-Bovea, Torres-Diaz, Sabau, De-la-Hoz-Franco, Nino-Moreno, & Pacheco-Torres 2019.) .....	9
	Kuvio 4. Thomson-ilmiö (Thomson effect).....	10
	Kuvio 5. N- ja P-tyyppin puolijohteet. (Yazawa, Je-hyeong & Asli 2021, 72-74.).....	11
	Kuvio 6. TEG-moduulin rakenne. (Lee 2010, 100–102) .....	12
	Kuvio 7. Taulukko P- ja N-tyyppin materiaaleista. (Lee 2010, 105) .....	13
	Kuvio 8. Pienoisoon testijärjestelyt.....	14
	Kuvio 9. Tarvaalan lämpölaitos. ....	15
	Kuvio 10. Testilaitteen osia 3D-mallinnettuna.....	16
	Kuvio 11. Testilaitteen kokonaisuus 3D-mallinnettuna. ....	16
	Kuvio 12. Jäähdytysilmanjakajat valmiina tulostukseen.....	17
	Kuvio 13. Marlow Industries TG12-8-01LS (TG12-8).....	18
	Kuvio 14. Datalogger (DataTaker DT80W) .....	22
	Kuvio 15. DataTaker CEM20 laajennusmoduuli (DataTaker CEM20).....	22
	Kuvio 16. Testilaitte asennettuna lämpölaitoksella. ....	25
	Kuvio 17. Mittaus 3. Teho, virta, jännite ja resistanssi. ....	26
	Kuvio 18. Mittaus 3. Lämpötilat. ....	27

Kuvio 19. Mittaus 3. Hyötysuhde.....	27
Kuvio 20. Mittaus 4. Teho, virta, jännite ja resistanssi. ....	28
Kuvio 21. Mittaus 3. Lämpötilat.....	28
Kuvio 22. Mittaus 4. Hyötysuhde.....	29
Kuvio 23. Mittaus 4. Teho, virta, jännite ja resistanssi. ....	30
Kuvio 24. Mittaus 5. Lämpötilat.....	30
Kuvio 25. Mittaus 6. Teho, virta, jännite ja resistanssi. ....	31
Kuvio 26. Mittaus 6. Lämpötilat.....	32
Kuvio 27. Mittausten hyötysuhde verrattuna datalehden hyötysuhteisiin.....	33
Kuvio 28. Veden lämpötilan vaihtelut ja kerrostuminen (Pohjoisen luontomme talvi).....	35
Kuvio 29. Maan lämpötila noin 15 m syvyydessä (Geoenergia 2019).....	35

# 1 Johdanto

## 1.1 Opinnäytetyön tausta ja tarpeellisuus

Nykypäivän jatkuvasti kiristyvillä energiamarkkinoilla laitosten hyötysuhteiden merkitys on nous-  
sut huomattavasti. Laitokset tavoittelevat jatkuvasti korkeampia hyötysuhteita ja pyrkivät mini-  
moimaan hukatun energian määrää, samalla tehden laitoksista ympäristöystävällisempiä. Tästä  
panostuksesta huolimatta Suomessa hukkalämpöä syntyy Afryn arvion mukaan noin 130 TWh  
(Energiatehokkuusdirektiivin mukainen selvitys hukkalämmön potentiaalista ja kustannushyöty-  
analyysi tehokkaasta lämmittämisestä).

Opinnäytetyö tehdään osana Jyväskylän ammattikorkeakoulun LäSä- Lämpösähköiset ratkaisut  
energiatehokkuuden lisääjinä hanketta. Hankkeen toteuttavat Biotalousinstituutti ja Teollisuustek-  
niikan yksiköt. Mukana hankkeessa on energiatekniikkaa valmistavia ja tuottavia yrityksiä, jotka  
tarjoavat todellisen toimintaympäristön hankkeessa syntyvien testilaitteiden testaamiseen. (LäSä –  
Lämpösähköiset ratkaisut energiatehokkuuden lisääjinä)

Hankkeessa edistetään lämpösähköisten laitteiden hyödyntämistä hukkalämpöjen hyödyntämi-  
seen ja energiatehokkuuden parantamiseen. Kiristyvät energiatehokkuuden vaatimukset ja vähä-  
hiilisyys luovat painetta uusien ratkaisujen löytämiseen ja käyttöön ottamiseen. Nopeasti kehittyvä  
puolijohdetekniikka luo todelliset mahdollisuudet lämpösähköisille laitteille olla tulevaisuudessa  
varteenotettava vaihtoehto jo olemassa olevien ratkaisujen rinnalla. Tällaisten ratkaisujen kehittä-  
minen ja nykytilanteen parempi ymmärtäminen vaativat lämpösähköisten laitteiden testausta ja  
tutkimista todellisessa ympäristössä. (LäSä – Lämpösähköiset ratkaisut energiatehokkuuden lisää-  
jinä)

## 1.2 Opinnäytetyön tavoite, rajaus ja lopputulos

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja rakentaa TEG-elementtejä hyödyntävä testilaitte, jolla  
voidaan tuottaa sähköä lämmöstä hyödyntäen Seebeckin-ilmiötä. Rakennettava testilaitte on tar-  
koitettu teolliseen ympäristöön noin 70–200 °C lämpötiloihin. Opinnäytetyö keskittyy tällaisen tes-  
tilaitteen rakentamiseen kaupallisesti saatavilla olevien materiaalien rajoissa. Testilaitteen ei ole

tarkoitus olla valmis toimiva tuote, vaan tarkoitus on tutkia ja testata lämpösähköistä ilmiötä käytännössä, kerryttäen kokemusta ja osaamista ilmiön toiminnasta.

Testilaitteesta saatavia tuloksia tarkastellaan ja vertaillaan teorian antamien tulosten kanssa. Lopputuloksena syntyy testilaitte ja sitä testatessa saadut mittaustulokset. Testilaitetta voidaan hyödyntää tulevaisuudessa hankkeissa ja sillä voidaan kerätä lisää mittaustuloksia uusista kohteista. Tuloksia voidaan hyödyntää sopivien kohteiden löytämiseen, tulevien laitteiden rakentamisen pohjana ja mahdollisten ongelmakohtien tunnistamiseen. Puolijohdetekniikan kehittyessä ja uusien materiaalien löytyessä ja yleistyessä, voidaan saatuja tuloksia käyttää vertailukohtina.

Tutkimuskysymyksenä työssä ovat:

- Miten TEG-elementtien käyttö onnistuu?
- Miten TEG-elementit toimivat käytännön olosuhteissa ja millaisiin tuottolukemiin päästään?
- Mihin haasteisiin törmäämme TEG-elementtien hyödyntämisessä?

## **2 Tutkimusasetelma**

### **2.1 Kehittämistutkimus**

Tämä työ tehtiin kehittämistutkimuksena. Kehittämistutkimuksella ei ole yhtä ainoaa määritelmää eikä tarkkaa rajausta. Kehittämistutkimus alkaa kuitenkin aina ongelmasta, tarpeesta kehittää jostain olemassa olevaa tai kokonaan uuden kehittäminen. Tässä vaiheessa tunnistetaan kehittämisen tarve, tehdään kehittämiskohteen rajaukset ja esitetään tutkimuskysymykset. Tämän jälkeen luodaan kehittämissuunnitelma, jossa esitetään miten tullaan kehittämään ja miten tavoitettiin päästään. Käytännön toteutus vaiheessa kokeillaan, tehdään ja kehitetään kehityksen kohteena olevaa aihetta. Käytännön toteutus voi koostua sykleistä, jossa kehitetään, arvioidaan ja raportoidaan tuloksia. Näiden pohjalta voidaan aihetta jatkokehittää ja toistaa samaa sykliä, paremman lopputuloksen saavuttamiseksi. (Opinnäytetyö – kehittämisprojekti; Perna N.d.)

### **2.2 Eettisyys ja luotettavuus**

Opinnäytetyötä tehdessä noudatetaan hyviä eettisiä ja tieteellisiä käytänteitä. Tietoa haetaan useista eri lähteistä ja lähteiden tietoja vertaillaan keskenään. Käytetyt alkuperäiset lähteet merki-



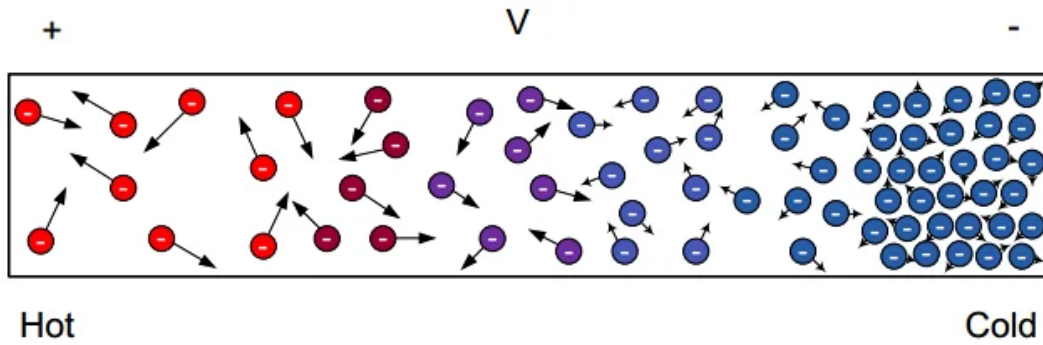
tään lähdeluetteloon. Testilaitetta rakentaessa ja sitä testatessa noudatetaan hyviä toimintatapoja. Mittaukset tehdään tarkasti ja mahdollisimman luotettavasti. Tulokset esitetään rehellisesti kokonaisuudessaan mitään vääristelemättä tai mitään tärkeää jättämättä pois. Käytetyt mittalaitteet kirjataan ylös mahdollisimman tarkasti ja mittaustulokset kirjataan ylös mittauspöytäkirjaan. (Opinnäytetyön eettiset suositukset. N.d.)

Testilaitte tullaan asentamaan käytössä olevaan lämpölaitokseen. Siellä toimiessa ja tarvittavia muutostöitä tehdessä noudatetaan hyviä toimintatapoja ja vältetään laitoksen toiminnalle tai haltijan omaisuudelle aiheutuvaa haittaa tai vahinkoa. Työn jälkeen testilaitte voidaan purkaa pois ja lämpölaitos palauttaa mahdollisuuksien mukaan takaisin alkuperäiseen tilaansa. Työssä ei synny salassapidettävää materiaalia eikä se tutki ihmisryhmiä tai kerää henkilökohtaisia tietoja. Täten tietosuojamateriaalia ei työssä synny tai ole tarvetta käsitellä (Opinnäytetyön eettiset suositukset. N.d.).

### **3 Lämpösähköiset ilmiöt**

#### **3.1 Fysikaalisuus**

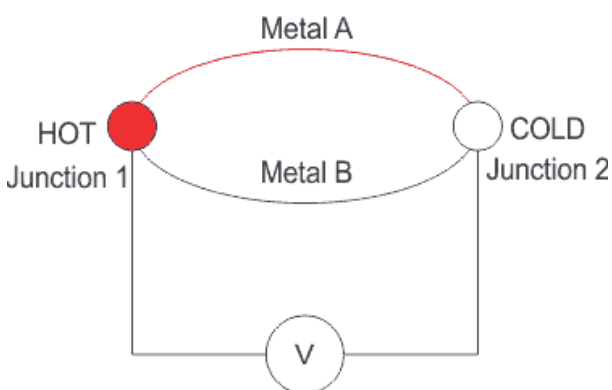
Lämpösähköiset ilmiöt perustuvat elektronien liikkeeseen johtavassa materiaalissa, kun se altistetaan lämmölle. Johtavassa materiaalissa elektronit ovat tasaisesti jakautuneet materiaaliin, jolloin materiaalissa ei ole potentiaalieroja. Kun materiaalin toinen pää altistetaan lämmölle elektronien liikehdintä voimistuu lämmön seurauksena ja elektronit ”tönivät” toisiaan. Tällöin elektronit pyrkivät pakkautumaan viileämpään materiaalin päähän, koska viileässä ne voivat olla lähekkäin ”tönimättä” toisiaan ja niiden tiheys on suurempi. Tämä elektronien epätasainen jakautuminen aiheuttaa materiaalin päiden välille potentiaalieron, koska nyt materiaalissa olevat elektronit eivät ole enää tasaisesti jakautuneet (ks. kuvio 1). (Auparay 2013, 6–8; The Fundamentals of Thermoelectrics)



Kuvio 1. Elektronien liike materiaalissa. (Arar 2022.)

### 3.2 Seebeckin-ilmiö ja Seebeckin kerroin

Seebeckin-ilmiön löysi saksalainen fyysikko Thomas Johann Seebeck vuonna 1821. Hän havaitsi, että kahden eri sähköä johtavan materiaalin yhdistäminen silmukkaan ja pitämällä niiden liitoskohdat eri lämpötiloissa, piiriin syntyy sähkövirta ja piirin liitoskohtien välille syntyy jännite-ero. Tätä jännitettä kutsutaan myös Seebeckin-jännitteeksi. (Auparay 2013; Awati 2021.) Kuvassa lämpösähköinen laite muodostuu kahdesta eri materiaalista. Metallit A ja B yhdessä muodostavat silmukan, jossa materiaalien liitospisteet ovat eri lämpötiloissa. Tällöin piiriin syntyy virta, jonka suuruus riippuu lämpötilaerosta ja materiaaleista (ks. kuvio 2). (Lindell 1994, 135.)



Kuvio 2. Lämpösähköinen laite. (Vaidyanathan 2022.)

Seebeckin-kertoimella ilmoitetaan kunkin materiaalin tuottama sähköinen jännite, joka on verrannollinen lämpötilaeroon. P-tyyppin materiaaleilla on positiivinen Seebeckin-kerroin ja N-tyyppin materiaaleilla on negatiivinen Seebeckin-kerroin. Seebeckin-kertoimen yksikkö on V/K (Volttia/Kelvin). Usein kuitenkin käytetään  $\mu\text{V}/\text{K}$  ja se voidaan esittää kaavalla:

$$S(\mu\text{V}/\text{K}) = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_{\text{cold}} - V_{\text{hot}}}{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}$$

jossa,

$\Delta V =$  jännite – ero kylmän ja lämpimän liitoksen välillä

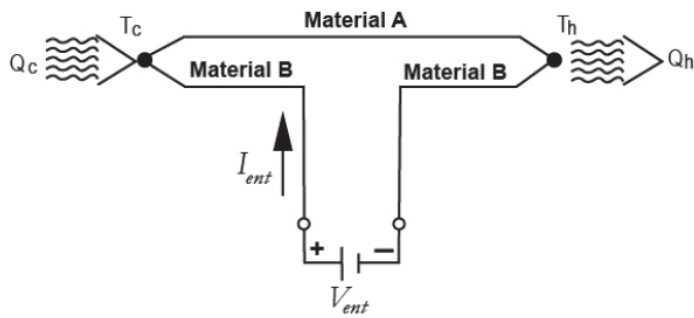
$\Delta T =$  lämpötilaero kylmän ja lämpimän liitoksen välillä Kelvineinä

(What are Seebeck Effect and Seebeck Coefficient?)

Seebeckin-ilmiötä voidaan käyttää muuttamaan hukkalämpöä käytettäväksi sähköenergiaksi. Käyttökohteita ovat mm. teollisuuden laitokset, ajoneuvot, lämpökattilat, uunit, puettavat laitteet ja avaruusluotaimet. Ilmiötä voidaan käyttää myös keräämään aurinkokennojen synnyttämää hukkalämpöä. (Abdel-Motaleb & Qadri 2017, 8.)

### 3.3 Käänteinen Seebeckin-ilmiö, Peltier

Peltier-ilmiö on Seebeckin-ilmiön käänteinen ilmiö, jonka löysi ranskalainen Jean Charles Peltier vuonna 1834. Peltier-ilmiössä sähköä johdetaan kahdesta eri sähköä johtavasta materiaalista muodostettuun silmukkaan. Materiaalien liitoskohdassa, sähkövirta emittoi tai absorboi lämpöenergiaa tasapainottaakseen potentiaalieron. Tämän seurauksena toinen liitoskohta kylmenee ja toinen lämpenee luoden lämpötilaeron liitoskohtien välille. (Freire, Navarrete, Corrales & Castillo 2021)



Kuvio 3. Peltier-ilmiö (Mardi-Bovea, Torres-Diaz, Sabau, De-la-Hoz-Franco, Nino-Moreno, & Pacheco-Torres 2019.)

jossa,

$Q_c$  = Lämmön absorbointi määrä

$T_c$  = Viileän puolen lämpötila

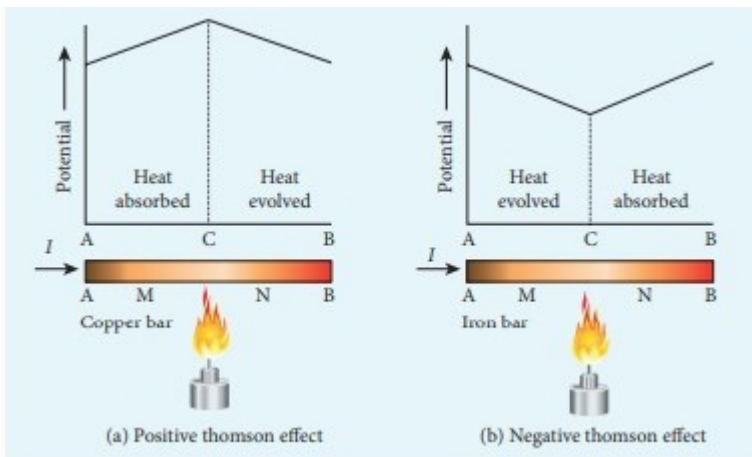
$Q_h$  = Lämmön emitointi määrä

$T_h$  = Lämpimän puolen lämpötila

Peltier-moduuleita käytetään yleisesti jäähdytykseen esimerkiksi kylmälaukuissa, joissa ei ole kompressorikoneistoa. Muita käyttökohteita ovat mm. kannettavat jäähdyttimet, kamerat, avaruusalukset ja satelliitit. (Abdel-Motaleb & Qadri 2017, 6.) Peltier-moduulien pintojen läpötilaero voi kasvaa jopa 70 °C (THE HEATSINK GUIDE: Peltier Guide, Part 1).

### 3.4 Thomson-ilmiö

Thomsonin-ilmiön löysi William Thomson vuonna 1854. Se on yhdistelmä Seebeck- ja Peltier-ilmiöitä. (Abdel-Motaleb & Qadri 2017, 3.) Thomsonin-ilmiössä lämpöä kehittyy tai absorboituu epätaisisesti lämmenneeseen johtimeen. Tämän aiheuttaa erisuuruinen elektronitiheys johtimessa lämpimän ja viileän osan välillä. Lämmön kehittyminen tai absorboituminen riippuu virran kulkusuunnasta ja johtimen materiaalista. Materiaalin käyttäytymisen mukaan sillä voi olla positiivinen tai negatiivinen Thomsonin-ilmiö.



Kuvio 4. Thomson-ilmiö (Thomson effect)

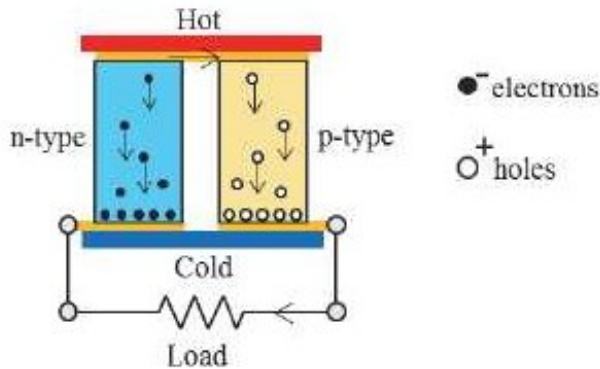
Kuviossa neljä on kahdesta eri materiaalista valmistettu tanko. Molempia tankoja lämmitetään keskeltä ja molemmissa tangoissa sähkövirran suunta on vasemmalta oikealle. Kuparitangossa A–C pisteen välillä lämpöenergiaa absorboituu tankoon ja C–B pisteen välillä lämpöä kehittyä. Tätä kutsutaan positiiviseksi Thomsonin-ilmiöksi. Rautatangossa lämpöä kehittyä A–C pisteen välillä ja absorboituu C–B pisteen välillä. Tätä kutsutaan negatiiviseksi Thomsonin-ilmiöksi. (Thomson effect)

## 4 Lämpösähköisten laitteiden rakenne

### 4.1 Materiaalit ja Hyvyysluku ZT

Lämpösähköisissä laitteissa käytetään materiaaleina puolijohteita. Materiaalityypit voidaan jakaa kahteen ryhmään. N- ja P-tyyppin materiaaleihin. Näiden materiaalien käyttäytyminen altistettaessa lämpötilaerolle on toisiinsa nähden täysin vastainen. N-tyyppin materiaalit sisältävät suuren negatiivisen varauksen eli suuren määrän vapaita elektroneja, jotka ovat vapaita liikkumaan. P-tyyppin materiaalit sisältävät suuren määrän positiivisia varauksia eli ”reikiä”. Reijät on materiaalin epäpuhtauksien aiheuttamia tyhjiä paikkoja, johon kuuluisi elektroni, mutta se on jäänyt sieltä puuttumaan. Reikien liike on elektronien kulkusuunnan vastainen. Todellisuudessa vain elektronit liikkuvat hyppien reiästä seuraavaan edeten materiaalissa. Tämä näyttää kuitenkin reikien liikkeeltä elektronien liikkeen vastakkaiseen suuntaan. (Vaidyanathan 2022; Electrons and “holes”; What is N-type and P-type semiconductor?) N- ja P-tyyppin materiaaleja yleensä käsitellään ja niiden kemialla muokataan, jotta niihin saadaan N-tyyppin materiaalissa enemmän vapaita elektroneja ja P-tyyppin materiaalissa enemmän reikiä. Tällöin niille saadaan suurempi Seebeckin-kerroin ja ne

tuottavat enemmän sähköä. (Meng, Liu & Wang 2020; What is Thermoelectric Generator : Working & Its Uses).



Kuvio 5. N- ja P-tyyppin puolijohdeet. (Yazawa, Je-hyeong & Asli 2021, 72-74.)

Kuviossa viisi on esitelty lämpösähköisen laitteen yhden N- ja P-tyyppin materiaaliparin kytkentä. Vasemmalla puolella on N-tyyppin materiaali ja oikealla P-tyyppin materiaali. Kun kuvassa yläpuolelta tuodaan lämpöä materiaalipariin, N-tyyppin materiaalissa elektronit liikkuvat alaspäin kohti viileää. Tällöin N-tyyppin materiaalin viileään päähän syntyy negatiivinen varaus eli siitä tulee piirin negatiivinen napa. P-tyyppin materiaalissa positiiviset varaukset eli reiät liikkuvat alaspäin kohti viileää muodostaen piirin positiivisen navan. Piirin napojen välille on siis syntynyt potentiaaliero, joka voidaan mitata jännitteenä. Kun napoihin kytketään kuorma, sähkövirta virtaa kuorman läpi.

Lämpösähköisten materiaalien hyvyyden mittaamiseen esitteli Edmund Altenkirch vuonna 1911 ZT-hyvyydsluvun, jolla voitiin esittää eri materiaalien suorituskykyä. Hyvällä lämpösähköisellä materiaalilla on hyvä sähkönjohtavuus sekä hyvä Seebeckin-kerroin, mutta matala lämmönjohtavuus. ZT-hyvyydsluku saadaan kaavasta:

$$ZT = \frac{\sigma S^2 T}{k}$$

jossa,

$\sigma$  = sähkönjohtavuus ( $\Omega \cdot \text{mm}^2$ )

$S$  = Seebeckin kerroin ( $\mu\text{V}/\text{K}$ )

$T$  = lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

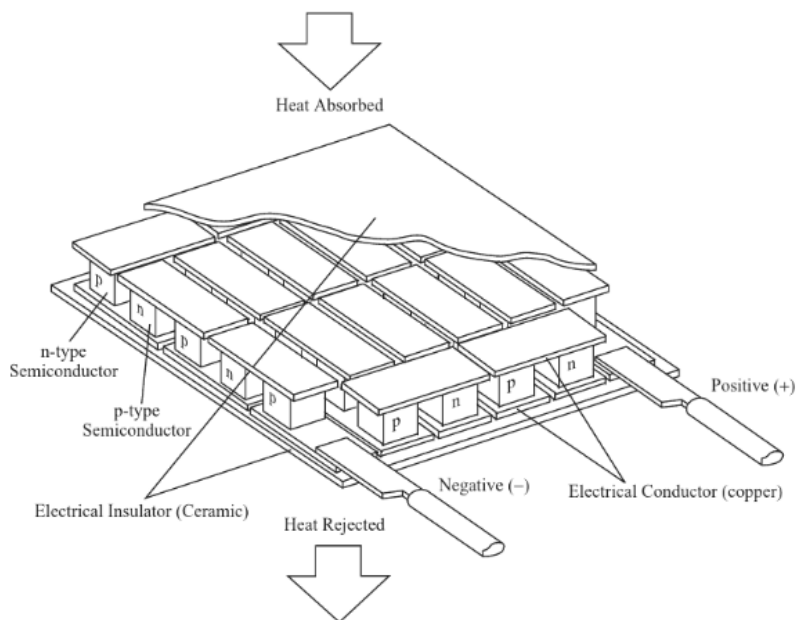
$k$  = materiaalin lämmönjohtavuus ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )

(Abdel-Motaleb & Qadri 2017, 3)

## 4.2 TEG-moduulit

Thermoelectric generator eli lämpösähköinen generaattori on tyypillisesti litteä laattamainen levy, jossa puolijohteet ovat yhdessä kerroksessa. Kerros koostuu useista aikaisemmin esitellyistä N- ja P-typin materiaalipareista, koska yhden liitoksen tuottama sähkön määrä on hyvin vähäinen. Materiaaliparit on kytketty keskenään sähköisesti sarjaan. Materiaalien molemmiin puolin on litteä yleensä keraaminen levy, joka johtaa lämpöä ja toimii samalla sähköisenä eristeenä (ks. kuvio 6).

(Lee 2010, 100–102)



Kuvio 6. TEG-moduulin rakenne. (Lee 2010, 100–102)

Moduulien suurin heikkous on niiden matala energiamuunnoksen hyötysuhde. Yleensä hyötysuhde on alle 20 %. Moduuleiden etuina voidaan pitää niiden äänetöntä toimintaa, ne eivät sisällä liikkuvia osia eikä niitä tarvitse huoltaa. Moduuleita on myös saatavilla taipuvina, jolloin ne soveltuvat käytettäväksi myös kaarevilla pinnoilla. Moduuleiden skaalaus on myös helppoa kytkemällä useita moduuleita sarjaan ja rinnan, suuremman pinta-alan peittämiseksi. (Yazawa ym. 2021, 15–17)

Yhtenä materiaalitieteiden kehittämisen etuna moduuleiden toimintalämpötiloja on saatu laajennettua eri käyttötarkoituksiin. Matalimmillaan moduulit voivat toimia kehonlämmöllä. Esim. tulevaisuudessa älykello voi tuottaa oman sähkönsä ranteen lämmöstä. Toisessa ääripäässä on teollisuudessa esiintyvät jopa noin 1500 °C lämpötilat. (Yazawa ym. 2021, 15–17) Kuviossa seitsemän on esitelty eri materiaalien ominaisuuksia mm. materiaalin lämpötiloja ja ZT-hyvyyslukuja.

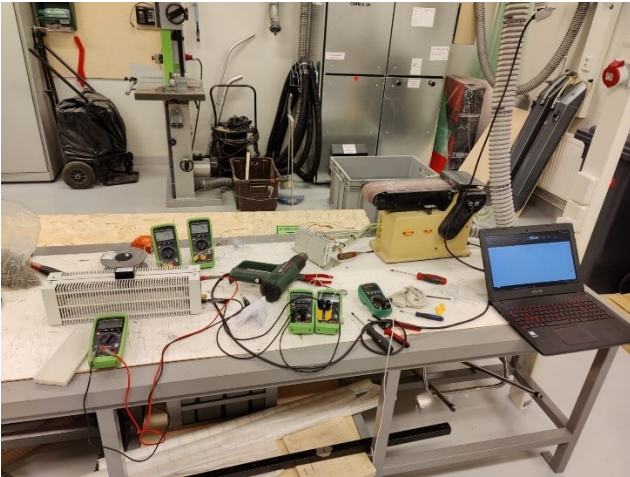
Material	Type	Temperature (°C)	Figure of merit $Z (K^{-1})$
$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	<i>p</i>	25	$2.5 \times 10^{-3}$
$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	<i>n</i>	25	$2.5 \times 10^{-3}$
$\text{SbBiTeSe}$	<i>p</i>	70	$3.0 \times 10^{-3}$
$\text{Bi SbTe}$	<i>p</i>	150	$2.5 \times 10^{-3}$
$\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-}74\text{Sb}_2\text{Te}_3$	<i>n</i>	150	$3.0 \times 10^{-3}$
$\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-}25\text{Bi}_2\text{Se}_3$	<i>p</i>	150	$2.7 \times 10^{-3}$
$\text{PbTe}$	<i>n, p</i>	450 (325–625)	$1.3 \times 10^{-3}$
$\text{ZnSb}$	<i>p</i>	175	$1.4 \times 10^{-3}$
$\text{SiGe}$	<i>p</i>	1,000	$0.4 \times 10^{-3}$
$\text{SiGe}$	<i>n</i>	1,000	$0.8 \times 10^{-3}$
$\text{GeTe}$	<i>p</i>	450	$1.7 \times 10^{-3}$
$\text{MnTe}$	<i>p</i>	900	$0.4 \times 10^{-3}$
$\text{CeS}_{1.4}$	<i>n</i>	1,100	$1.8 \times 10^{-3}$
$\text{AgSbTe}_2$	<i>p</i>	400	$1.3 \times 10^{-3}$
$\text{InAs}$	<i>n</i>	700	$0.7 \times 10^{-3}$

Kuvio 7. Taulukko P- ja N-tyypin materiaaleista. (Lee 2010, 105)

## 5 Alustavat pienoiskoon testit

Ennen varsinaista testilaitteen rakentamista ja suunnitelmien lukkoon lyömistä TEG-moduuleita testattiin pienessä mittakaavassa. Tässä testissä käytössä oli kaksi moduulia. Lämmönlähteenä toimi kuumailmapuhallin ja jäähdytyksenä toimi kylmä vesi. Testissä haluttiin kokeilla moduulien sähköntuottoa yksittäisellä moduulilla, kahdella sarjaan kytketyllä moduulilla ja kahdella rinnankytketyllä moduulilla. Moduuleiden kuormitusta kasvatettiin vähitellen säätövastuksen avulla. Alustavan testin tuloksiksi saatiin noin 1 W/moduuli pintojen lämpötilaeron ollessa noin 60 °C. Moduulien kytkentä ei vaikuttanut yksittäisen moduulin tuottaman tehon määrään (ks. Liite 1).





Kuvio 8. Pienois-koon testijärjestelyt.

## 6 Testilaite

### 6.1 Asennuspaikka

Saarijärven Kaukolämpö Oy on Saarijärven alueella toimiva kaukolämmön toimittaja, joka on toiminut vuodesta 1961 lähtien. Heillä on kuusi lämpökeskusta, joista kolme on kiinteään polttoaineen laitoksia. Saarijärven kaukolämpö palvelee 192 asiakasta ja noin 823 000 m<sup>3</sup> lämmitettävää rakennustilavuutta. (Historia ja toimintakertomukset)

Testilaitteen asennuspaikaksi valikoitui Tarvaalan lämpölaitos sen hyvän sijainnin, sopivien lämpötilojen ja sopivan asennuspaikan vuoksi. Tarvaalan lämpölaitos sijaitsee JAMK:n Biotalousinstituutin kampuksen välittömässä läheisyydessä. Laitos valmistui vuonna 2020 ja on kooltaan 1 MW. Pääpolttoaineenaan laitos käyttää puuhaketta. (Kaukolämpötuotanto ja verkosto)

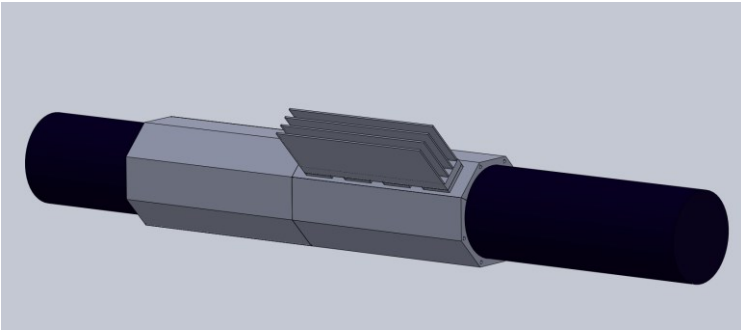


Kuvio 9. Tarvaalan lämpölaitos.

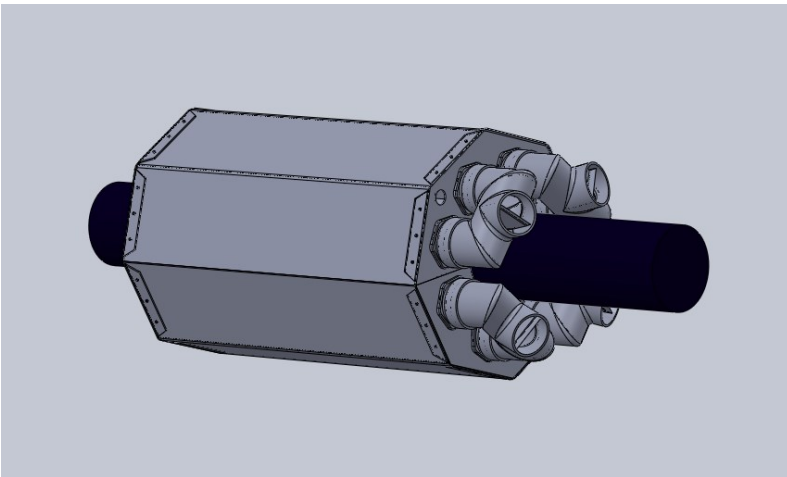
## 6.2 Testilaitteen suunnittelu

Tarvaalan lämpölaitokselta löytyi sopiva asennuskohde testilaitteelle kattilan kierron paluuputkistosta. Asennuspaikassa on noin puolitoista metriä putkea, jonka pintaan elementit kiinnitetään. Putkiston lämpötila on noin 75–80 °C. TEG-moduulien jäähdytykseen käytetään viileää ulkoilmaa, joka johdetaan ilmastointikanavien kautta testilaitteen läpi. Huomioitavaa on ulkolämpötilan vaihtelu, joka vaikuttaa suoraan moduulien pintojen lämpötilaeron suuruuteen ja sitä kautta tuotetun sähköenergian määrään. Laitteen rakennusmateriaaliksi valittiin alumiini sen hyvän lämmönjohtavuuden ja helpon työstämisen vuoksi.

Testilaitteen suunnitteluvaiheessa osat testilaitteeseen mallinnettiin SolidWorks 3D-mallinnusohjelmalla. Näin saatiin osat helposti visualisoitua ja esitettyä myös muulle projektitiimille. Suunnittelun edetessä muokkauksia kuviin oli helppo tehdä ja kokonainen testilaitte saatiin myös kasattua ohjelmalla, varmistaaksemme osien yhteensopivuuden enne varsinaista osien valmistusta. Kun suunnittelun lopputulos oli mieleinen, saatiin osien piirustukset helposti tulostettua ja lähetettyä valmistajille valmistusta varten.

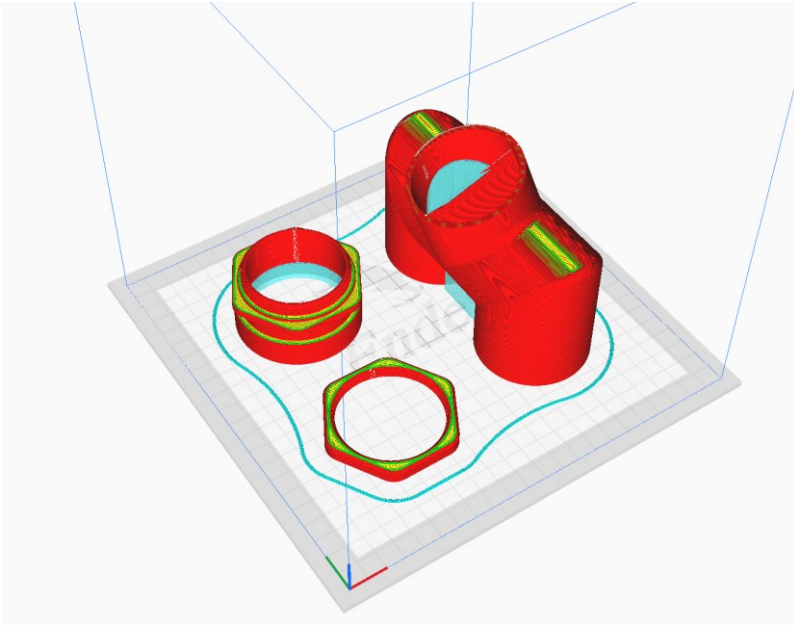


Kuvio 10. Testilaitteen osia 3D-mallinnettuna.



Kuvio 11. Testilaitteen kokonaisuus 3D-mallinnettuna.

Jäähdytysilman ohjaamiseen tasaisesti kaikille moduuleille suunniteltiin adapterit, jotka jakavat ilmaa mahdollisimman tasaisesti. Nämä osat 3D-mallinettiin myös, jotta ne saadaan helposti 3D-tulostukseen. 3D-tulostus valikoitui valmistustavaksi näille osille, niiden uniikin muodon ja muuten hankalan valmistuksen vuoksi. 3D-tulostusta käytettäessä saadaan nopeasti tulostettua mallikapale ja kokeiltua sopivuutta ennen usean osan tulostusta.

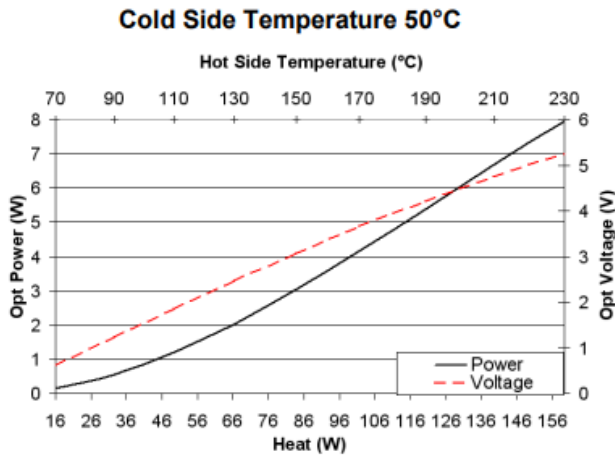


Kuvio 12. Jäähdytysilmanjakajat valmiina tulostukseen.

### 6.2.1 TEG-moduulit

TEG-moduulien valintaa tehdessä vertailtiin useiden valmistajien eri moduuleja ja pyrittiin löytämään sopiva malli etenkin asennuskohteen lämpötilan mukaan. Tällaisten moduulien löytäminen osoittautui kuitenkin haastavaksi, eikä markkinoilta löytynyt juuri näihin lämpötiloihin tarkoitettuja moduuleja. Tarkasteltujen vaihtoehtojen optimilämpötilat olivat paljon korkeammat, kuin testilaitteen asennuspaikan lämpötilat. Haastetta lisäsi vielä tekohetkellä saatavuusongelmat. Loppujen lopuksi moduuliksi valittiin Marlow Industries TG12-8-01LS. Näitä moduuleja asennettiin testilaitteeseen yhteensä 64 kappaletta. Kytkennässä 16 moduulia kytkettiin sarjaan. Näitä 16 moduulin sarjoja kytkettiin neljä rinnankytkentään sopivan jännitteen ja virran saavuttamiseksi.

Moduulin datalehdeltä kerättyjen tietojen mukaan moduulia voidaan jatkuvassa käytössä käyttää maksimissaan 200 °C lämpötiloissa. Datalehdellä esitetään tuottolukemia viivakaaviona. Viileän puolen lämpötila on aina sama 50 °C ja lämpimän puolen lämpötilaa esitetään X-akselilla 70–230 °C (ks. kuvio 13).



Kuvio 13. Marlow Industries TG12-8-01LS (TG12-8)

Moduulin tuottoa arvioidessa voimme hyödyntää datalehdeltä löytyvää viivakaaviota sähköntuotannosta eri lämpötiloilla. Vaikka kaaviossa on käytetty viileän puolen lämpötilana 50 °C voidaan arvioida tuotantoa pintojen lämpötilaeron avulla. Asennuskohteen putkiston lämpötila on noin 80 °C. Jäähdytysilman ollessa 0–10 °C lämpötilaeroksi tulee noin 80–70 °C. Moduuleiden pintojen välille tätä ei kuitenkaan voida saavuttaa, koska jäähdytyksen energian siirto vaatii toimiakseen lämpötilaeron lämmön liikkumiseksi pois testilaitteesta. Voidaan kuitenkin arvioida 60–50 °C lämpötilaeron olevan mahdollinen saavuttaa pintojen välille. Viivakaaviosta voidaan nähdä tämän lämpötilaeron mahdollistavan noin 1 W/moduuli sähkötehon.

## 7 Mittaukset

### 7.1 Mittausten suunnittelu

Testilaitteesta tärkeimmät mitattavat suureet liittyvät suorituskykyyn ja olosuhteisiin, joissa suorituskykylukemat saatiin. Olosuhteiden mittaaminen on tärkeää, koska moduulien tuottamaan sähköiseen tehoon vaikuttaa suoraan moduulin pintojen välinen lämpötilaero. Muita mitattavia asioita on lämmön johtuminen putkesta moduuleille, jäähdytyksen tehokkuus ja hyötysuhteen arvioiminen. Lämmön johtumista ja jäähdytyksen tehokkuutta mittaamalla voidaan todeta kuinka onnistunut ja toimiva testilaitte on. Näistä mittauksista selviää myös, jos testilaitteessa on selviä suorituskykyyn vaikuttavia ongelmakohtia. Kaikki testilaitteen lämpötila-, jännite- ja virtamittauksista tulevat arvot tallennetaan käyttäen dataloggeria. Tällöin usean mittauksen tallentaminen samanaikaisesti ja tarkasti onnistuu. Tämä poistaa myös mahdolliset inhimilliset virheet, joita mitaustuloksiin voisi muuten päästä johtuen useasta samanaikaisesta mittauksesta. Näiden

mittausten lisäksi mitataan ilmastointikanavan virtaus virtausmittarilla. Kuorman resistanssi tullaan laskemaan dataloggerin toimesta, virta- ja jännitemittauksia hyödyntäen.

### 7.1.1 Tehon mittausta ja resistanssin laskeminen

Moduulien tuottaman tehon mittausta varten tarvitaan jännite- ja virtamittaus. Jännitemittaus toteutetaan kytkemällä mittajohtimet rinnan testilaitteen syöttöliittimien kanssa. Virtamittaus toteutetaan kontaktittomalla silmukka-anturilla positiivisesta syöttöjohdosta, jolloin mittaus ei vaikuta piiriin. Teho saadaan laskettua näistä kaavalla:

$$P = U * I$$

jossa,

$U = \text{Jännite (V)}$

$I = \text{Virta (A)}$

(Valtanen 2016, 1020)

Kuorman resistanssin laskemisessa käytetään samoja jännite ja virtamittauksen arvoja. Resistanssi saadaan laskettua kaavalla:

$$R = \frac{U}{I}$$

jossa,

$U = \text{Jännite (V)}$

$I = \text{Virta (A)}$

(Valtanen 2016, 1020)

### 7.1.2 TEG- moduulien pintojen lämpötilaero ( $\Delta T$ )

Pintojen lämpötilaeron mittausta varten tarvitaan kaksi lämpötilamittaus, joista toinen sijoitetaan moduulin lämpimän puolen läheisyyteen ja toinen kylmän puolen läheisyyteen. Näistä mittaustuksista voidaan laskea, millainen lämpötilaero moduulin pintojen välillä on kaavalla:

$$\Delta T = T_h - T_c$$

jossa,

$T_h =$  lämpimän puolen lämpötila

$T_c =$  kylmän puolen lämpötila

### 7.1.3 Lämmön johtumisen mittaaminen

Lämmön johtumisen mittarina käytetään kattilan kiertoputken lämpötilamittausta ja moduulin lämpimän puolen lämpötilamittausta. Näistä mittauksista selviää, kuinka hyvin lämpö johtui putkesta moduuleille. Toisena testilaitteen toimivuutta kuvaavana mittarina käytetään moduulin kylmän pinnan lämpötilamittausta ja tulevan jäähdytysilman lämpötilamittausta. Näistä mittauksista selviää jäähdytysratkaisun toimivuus ja riittävyys moduulien jäähdytyksessä.

### 7.1.4 Hyötysuhteen laskeminen

Testilaitteen hyötysuhde halutaan myös laskea. Tämän laskun onnistumisen kannalta pitää ottaa huomioon testilaitteen koko ja mittausvirheet. Testilaitteen koko ja sen ottama lämpöenergia on pieni verrattuna kattilan kiertoputkistossa virtaavaan energiaan. Kattilan kiertoputken lämpötilan putoamisen arvioidaan olevan pientä ja se voi hukkuu mittavirheiden sekaan ja testilaitteen ottaman energian määrän mittaaminen ei onnistu riittävän tarkasti. Tästä huolimatta paluuputken lämpötilat mitataan molemmin puolin testilaitetta ja varaudutaan hyötysuhteen laskemisessa käyttämään toista menetelmää. Tässä menetelmässä hyötysuhteen laskemista varten mitataan tulevan-, lähtevän jäähdytysilman ja jäähdytysilman virtauksen arvot. Näistä mittauksista pystytään laskemaan lämpöenergian määrä, joka poistuu testilaitteesta jäähdytysilman mukana. Yhdessä näiden mittausten ja sähköisen tehon kanssa, pystytään hyötysuhde laskemaan seuraavasti:

Lasketaan ensin poistuvan lämpöenergian määrä kuutiota ilmaa kohden.

$$Q = mc_p \Delta T$$

jossa,

$Q =$  siirtyvä lämpöenergia (J/m<sup>3</sup>)

$m = \text{massa (kg)}$

$c_p = \text{ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa } \left(\frac{\text{J}}{\text{Kg}} * \text{K}\right)$

$\Delta T = \text{lämpötilan muutos (K)}$

(Valtanen 2016, 410)

Lasketaan seuraavaksi jäähdytysilman virtaus kuutioina.

$$v = \frac{\pi d^2 h}{4}$$

jossa,

$v = \text{virtaus (m}^3/\text{s)}$

$d = \text{jäähdytiskanavan halkaisija (m)}$

$h = \text{ilman virtaus (m/s)}$

(Valtanen 2016 ,23)

Näistä saadaan laskettua teho, jolla lämpöenergian poistuu kaavalla:

$$P_h = Q \left(\frac{\text{J}}{\text{m}^3}\right) * V \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$$

jossa,

$P_h = \text{teho, jolla lämpöenergiaa poistuu (W)}$

Hyötysuhde saadaan laskettua, kun tiedetään moduulien tuottama sähköinen teho ja jäähdytyksen mukana poistuvan lämpöenergian teho kaavalla:

$$\eta = \frac{P}{P_h + P} * 100 \%$$

jossa,

$P = \text{moduulien tuottama sähköinen teho (W)}$

$P_h = \text{Jäähdytyksen mukana poistuva häviöteho (W)}$

(Valtanen 2016 ,184)



## 7.2 Mittauksissa käytettävät laitteet

### 7.2.1 Datalogger DataTaker DT80W ja DataTaker CEM20 laajennusmoduuli

Mittausten tallentamiseen käytetään DataTaker DT80W dataloggeria ja DataTaker CEM20 laajennusmoduulia. Dataloggerissa on viisi analogiatulokanavaa, jotka tukevat 4-, 3- tai kahta 2-johdin anturikytkentää. Analogiatulot ovat ohjelmoitavissa ja niillä voidaan mitata jännitettä, virtaa, resistanssia ja taajuutta. Mittausalueet ovat  $\pm 50$  V, 0,3–30 mA, 0–10 k $\Omega$  ja 0,1–10 kHz. Analogisten tulosten lisäksi laitteessa on kahdeksan digitaalista tulokanavaa, neljä laskurikanavaa ja sarjaportti. Laite tallentaa mittaustulokset sisäiseen muistiinsa tai muistitikulle. Kommunikointia varten laitteessa on Ethernet-portti ja WiFi-yhteys. Datalehden mukaan analogiatulokanavien tarkkuus on 18 bittiä. (DataTaker DT80W)



Kuvio 14. Datalogger (DataTaker DT80W)

CEM 20 laajennusmoduulilla voidaan laajentaa yksi dataloggerin analogiatulokanavista 20:ksi analogiatulokanavaksi. Laajennusmoduulin analogiatulokanavissa on samat ominaisuudet kuin dataloggerissa. (DataTaker CEM20)



Kuvio 15. DataTaker CEM20 laajennusmoduuli (DataTaker CEM20)

### 7.2.2 Lämpötila-anturi

Kaikissa lämpötilamittauksissa käytetään samanlaisia K–tyypin termopareja, jolla pyritään pitämään mittausten välinen virhe mahdollisimman pienenä. Termoparit ovat kooltaan myös pieniä, joten ne saadaan helposti aseteltua paikoilleen pieniinkin väleihin. Virheenä normaalilla K-tyypin termoparilla voidaan käyttää  $\pm 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$  tai  $0,75 \%$  (Thermocouple Accuracies).

### 7.2.3 Virta-anturi

Testilaitteen virran mittaamiseen käytetään kosketuksetonta virtamittausta, jotta mittaus ei vaikuta piirin toimintaan. Anturiksi valikoitui Seneca T201DCH-virta-anturi, joka pystyy mittaamaan molemmat vaihtovirran ja tasavirran. Anturi muuttaa mittaamansa virran jänniteviestiksi 0–10 V. Mitta-alueeksi voidaan valita joko 25 A tai 50 A anturissa olevilla DIP-kytkimillä. Tarkkuusluokaltaan anturi on 0,5 %. (Seneca T201DCH) Virta-anturin kytkennässä mitattava johdin pujotetaan viisi kertaa anturin mittaussilmukan läpi. Tällöin mitta-alueeksi saadaan 10 A ja samalla anturin tarkkuus paranee.

### 7.2.4 Virtausanturi, Pitot-putki

Ilmavirtauksen mittaamiseen käytetään Pitot-putkea. Pitot-putken toiminta perustuu kahteen painemittaukseen. Toinen painemittaus mittaa ilmanavassa olevaa staattista ilmanpainetta ja toinen mittaa kokonaispainetta. (Boyes 2010, 64)

Näistä kahdesta paineesta voidaan laskea virtaus kaavalla:

$$v = \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}}$$

jossa,

$v$  = *virtaavan kaasun nopeus*

$\Delta p$  = *kokonaispaineen ja staattisen paineen ero*

$\rho$  = *virtaavan kaasun tiheys*

(Valtonen, 189)

Pitot-putken tarkkuus vaihtelee 0,5–5 % välillä. Tässä virheenä käytetään 5 % matalan virtausnopeuden ja ei täydellisen mittaustaikan takia. (An Introduction to Pitot Tubes and Probes.)

### 7.3 Mittausten käytännön toteutus

Mittaukset suoritettiin 13.6.2022 klo 11:30–16:00 välisenä aikana Tarvaalan lämpölaitoksella. Mittauspäivän ulkolämpötila oli noin 20 °C. Mittauksia suoritettiin yhteensä kuusi. Mittausten aikana säätövastuksen resistanssia laskettiin pykälittäin, kasvattaen moduulien kuormitusta vähitellen huipputehon löytämiseksi. Mittausten välillä jäähdytyspuhaltimen nopeutta säädettiin eri arvoihin parhaan hyötysuhteen ja riittävän jäähdytystason löytämiseksi.

Dataloggerin mittaukset ja niille annetut nimet:

AI-01 mittasi moduulien tuottamaa virtaa,

VI-01 mittasi moduulien tuottamaa jännitettä,

TI-01 mittasi moduulien lämpimän puolen lämpötilaa,

TI-02 mittasi moduulien viileän puolen lämpötilaa,

TI-03 mittasi lähtevän jäähdytysilman lämpötilaa,

TI-04 mittasi tulevan jäähdytysilman lämpötilaa,

TI-05 mittasi kattilan kiertoputken tulevan veden lämpötilaa ja

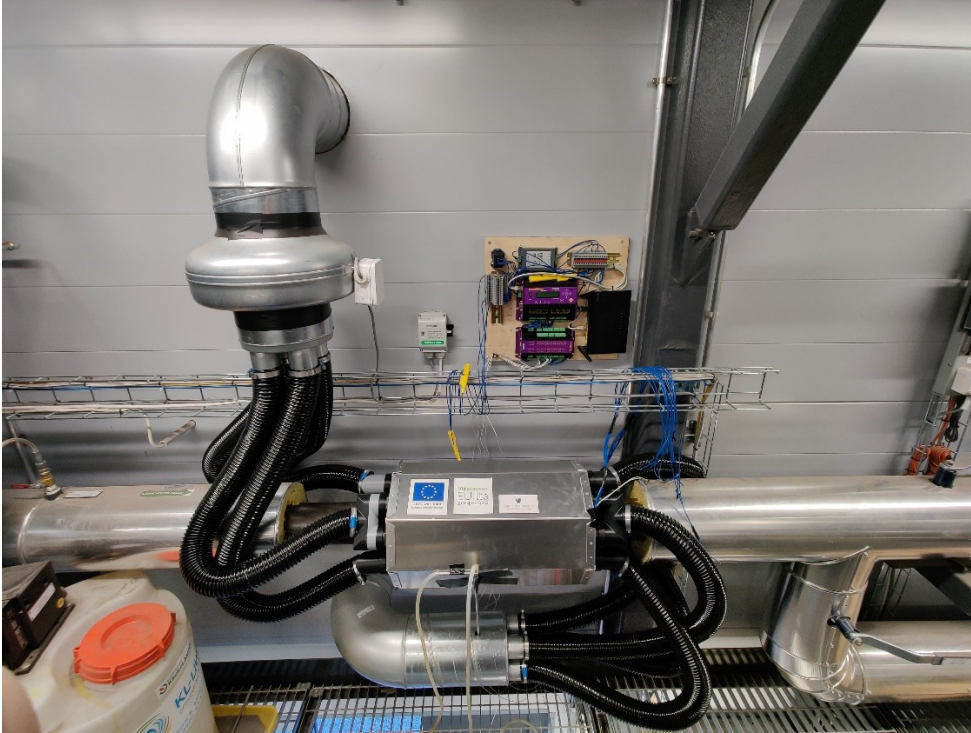
TI-06 mittasi kattilan kiertoputken lähtevän veden lämpötilaa.

Datalogger ohjelmoitiin myös laskemaan näistä arvoista teho ja kuorman resistanssi. Jäähdytysilman virtausta mittasi Pitot-putkeen kytketty paine-eromittari, jonka lukema luettiin testin aikana mittarin näytöltä ja kirjattiin mittauspöytäkirjaan. Yleismittari kytkettiin mittaamaan jäähdytysilmapuhaltimen ottamaa virtaa, jonka arvo luettiin sen näytöltä testin aikana ja kirjattiin mittauspöytäkirjaan.

Tarkoituksena oli tallentaa mittaukset jäähdytysilmapuhallin 100 %, 75 %, 50 % ja 25 % teholla.

Kesken mittausten ulkoilman lämpötila laski pilvisyyden ja sateen takia, joten mittaukset aloitettiin alusta. Jäähdytyspuhaltimen ilmanvirtausta ei myöskään pystytty mittaamaan luotettavasti 50 %

teholla ja sitä pienemmillä arvoilla. Näistä syistä mittauspöytäkirjaan kirjattuja ”Mittaus 1” ja ”Mittaus 2” ei käytetä ja hyötysuhteen arvioinnissa käytetään ainoastaan mittauspöytäkirjaan kirjattuja ”Mittaus 3” ja ”Mittaus 4” arvoja (ks. Liite 3).

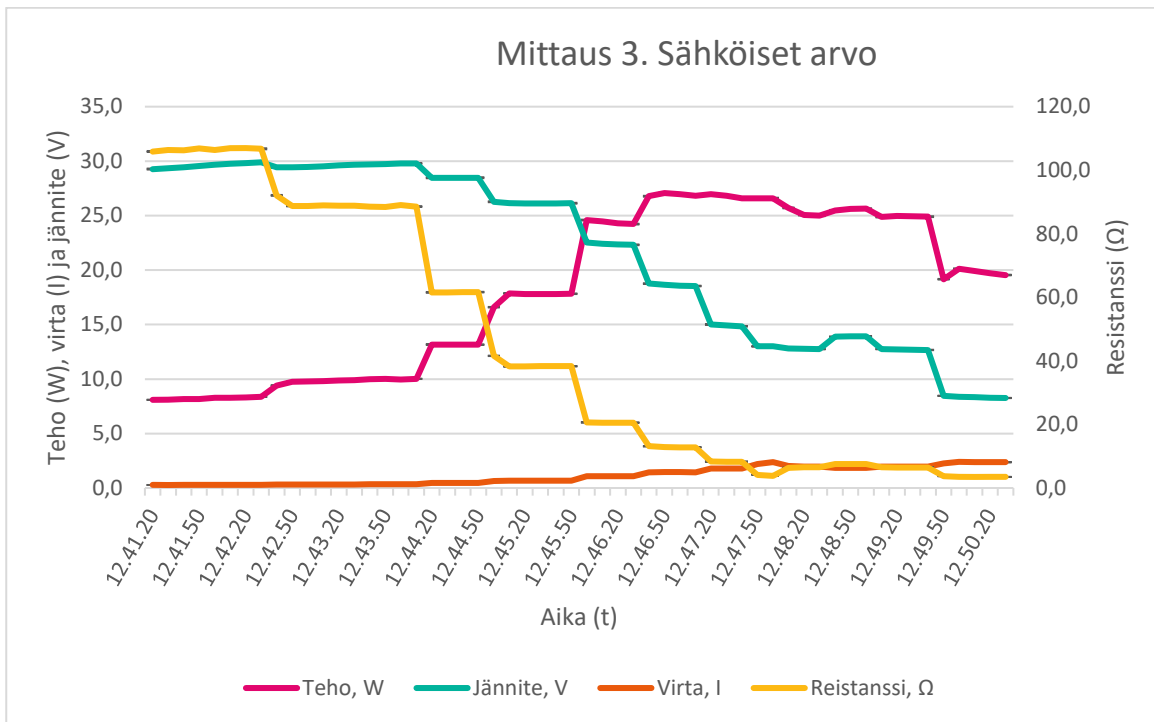


Kuvio 16. Testilaitte asennettuna lämpölaitoksella.

## 8 Saatujen tulosten tarkastelu

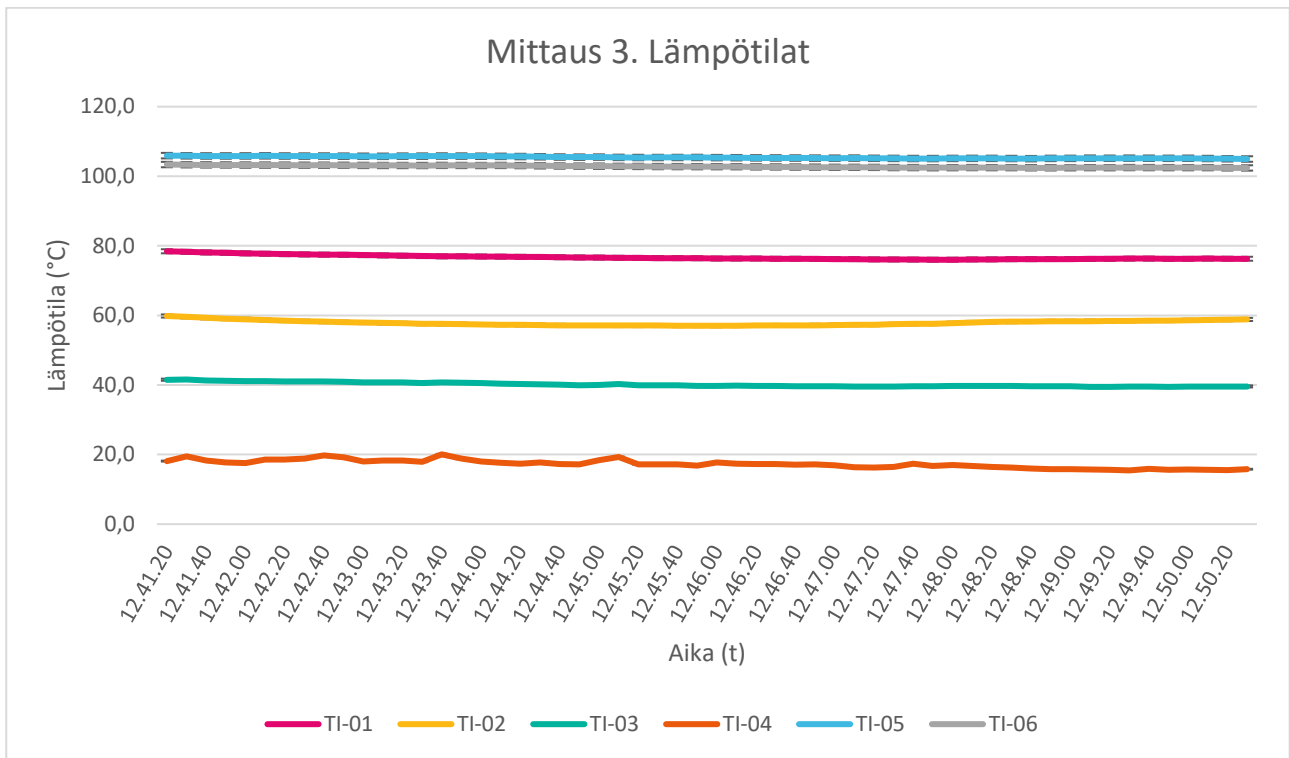
### 8.1 Mittaus 3

Tässä mittauksessa jäähdytyspuhallin oli aseteltu 100 % puhallusteholle. Tarkastellaan ensimmäisenä moduulien tuottamaa tehoa, virtaa, resistanssia ja jännitettä (ks. kuvio 17). Kuten kuviosta 17 nähdään, resistanssia testin aikana laskettiin pykälittäin noin 100  $\Omega$  aina noin 4  $\Omega$  asti. Kun resistanssia laskettiin virta ja teho kasvoivat. Samaan aikaan kasvava kuormitus laski jännitettä. Kuvion loppua kohden teho kääntyy laskuun. Tämä johtuu moduulien ylikuormituksesta, jonka seurauksena jännite laskee niin paljon, että saatu teho kääntyy myös laskuun. Tämä pitää ottaa moduuleja kuormitettaessa huomioon, jotta ne tuottavat maksimaalisen tehon. Mittauksen maksimi teho oli noin 27 W eli 0,42 W/moduuli.

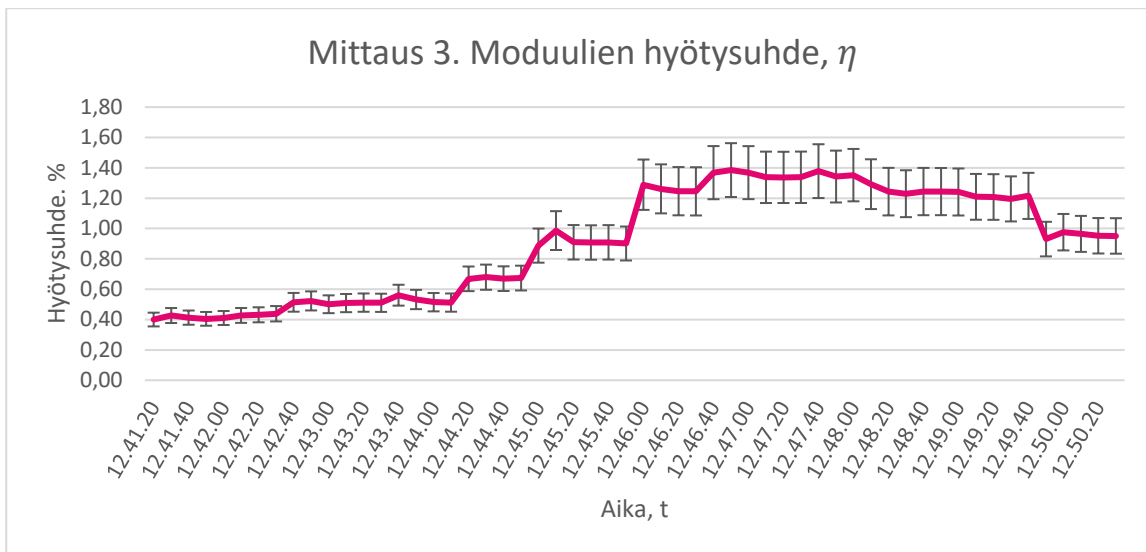


Kuvio 17. Mittaus 3. Teho, virta, jännite ja resistanssi.

Tarkastellaan seuraavaksi lämpötiloja (ks. kuvio 18). Kuten kuviosta 18 nähdään, lämpötilat pysyivät mittauksen aikana melko tasaisina. Mittauksessa tulevan jäähdytysilman lämpötilassa (TI-04) on nähtävissä pientä vaihtelua testin aikana, mutta ei mitään suurempaa testiin vaikuttavaa muutosta. Mittauksessa moduulit saavuttivat hetkellisen hyötysuhteen  $\eta = 1,39 \% \pm 0,18 \% @ \Delta T \approx 19$  °C (ks. kuvio 19).



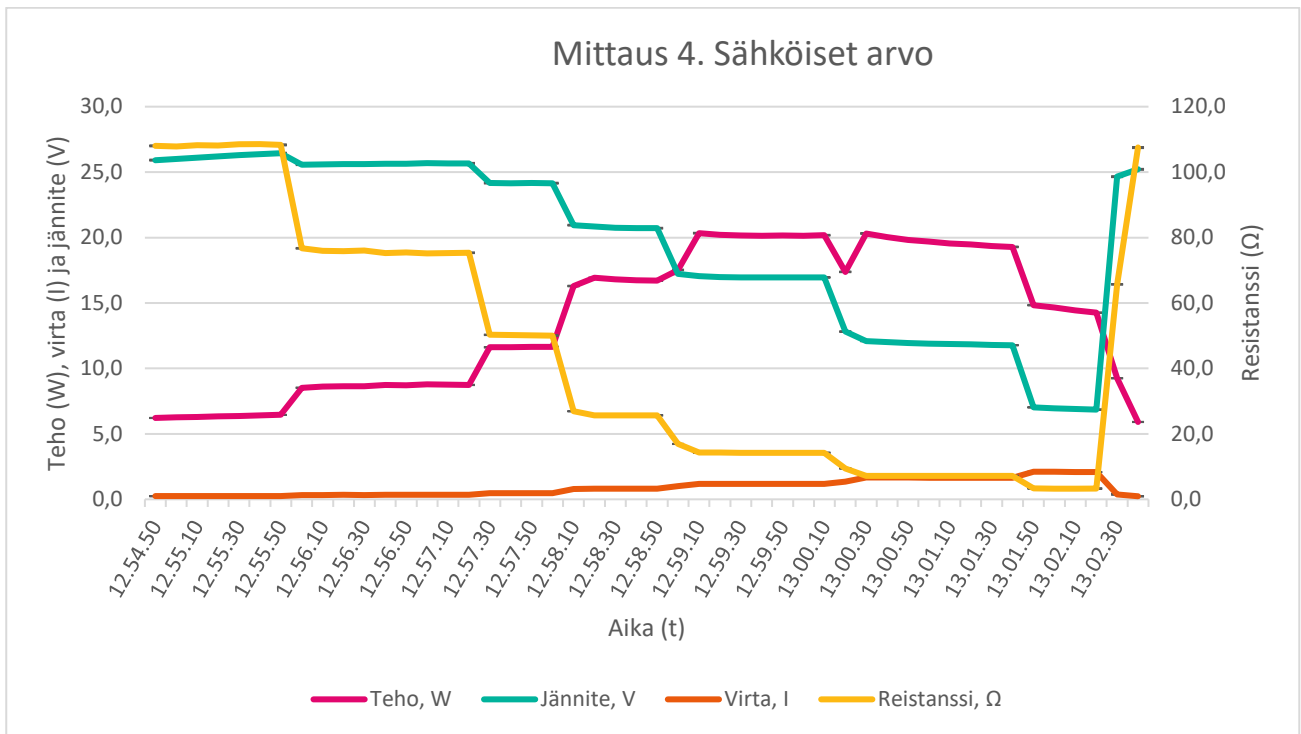
Kuvio 18. Mittaus 3. Lämpötilat.



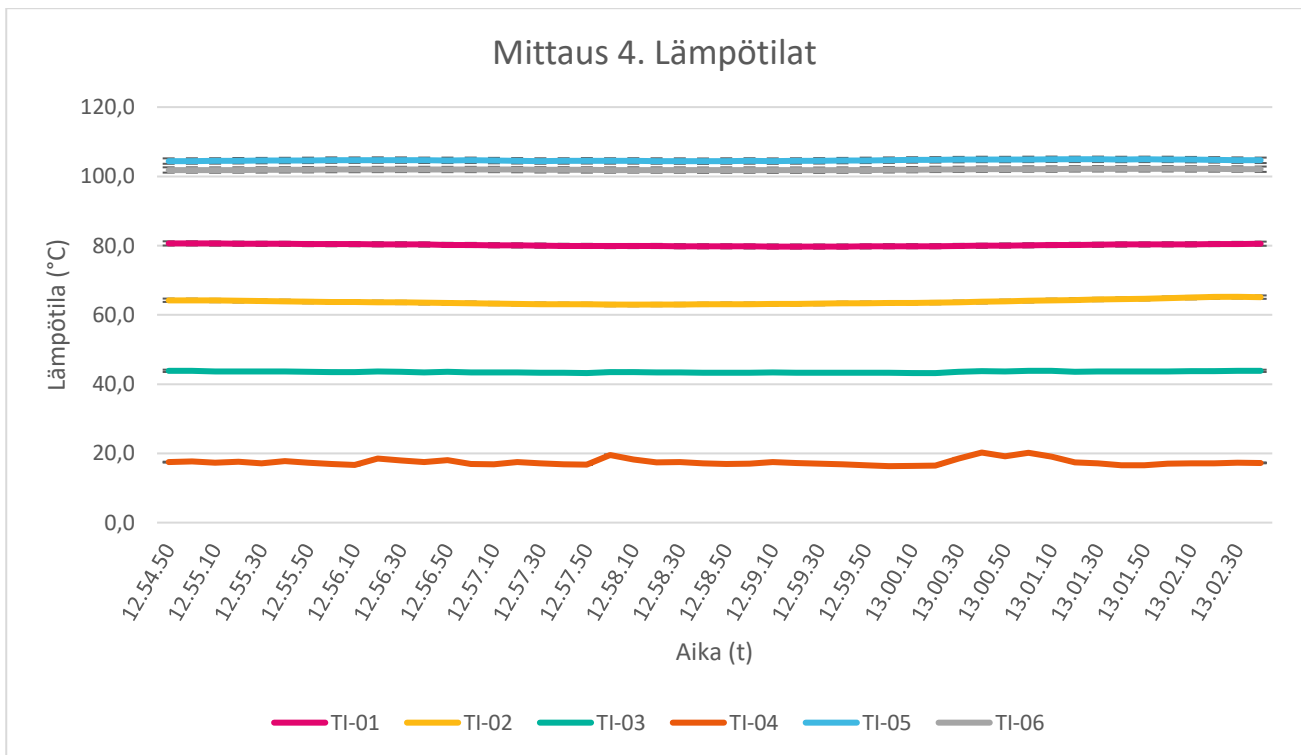
Kuvio 19. Mittaus 3. Hyötysuhde.

## 8.2 Mittaus 4

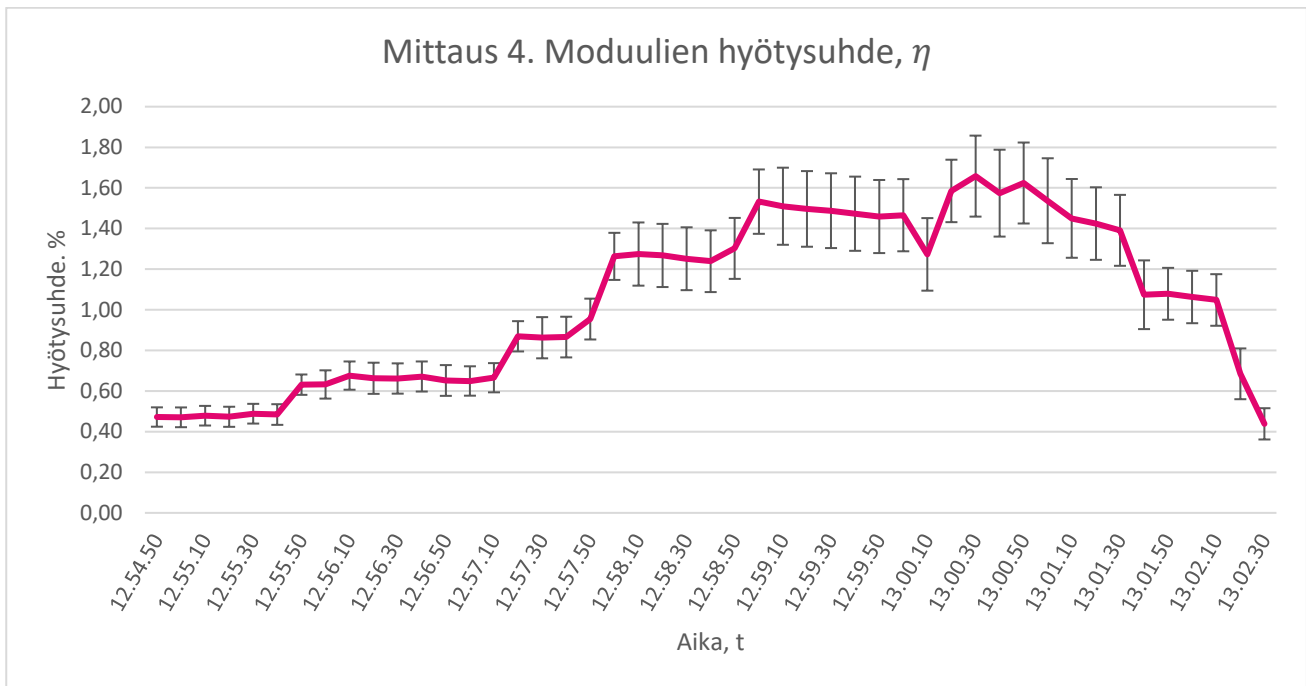
Tässä mittauksessa jäähdytyspuhallin aseteltiin 75 % teholle. Mittauksen huipputeho oli 20 W eli 0,31 W/moduuli (ks. kuvio 20). Lämpötiloissa ei tapahtunut suuria muutoksia mittauksen aikana (ks. kuvio 21). Hetkelliseksi hyötysuhteeksi saavutettiin  $\eta = 1,66 \% \pm 0,21 \% @ \Delta T \approx 16 \text{ }^\circ\text{C}$ , joka on hieman parempi kuin mittauksessa kolme (ks. kuvio 22).



Kuvio 20. Mittaus 4. Teho, virta, jännite ja resistanssi.



Kuvio 21. Mittaus 3. Lämpötilat

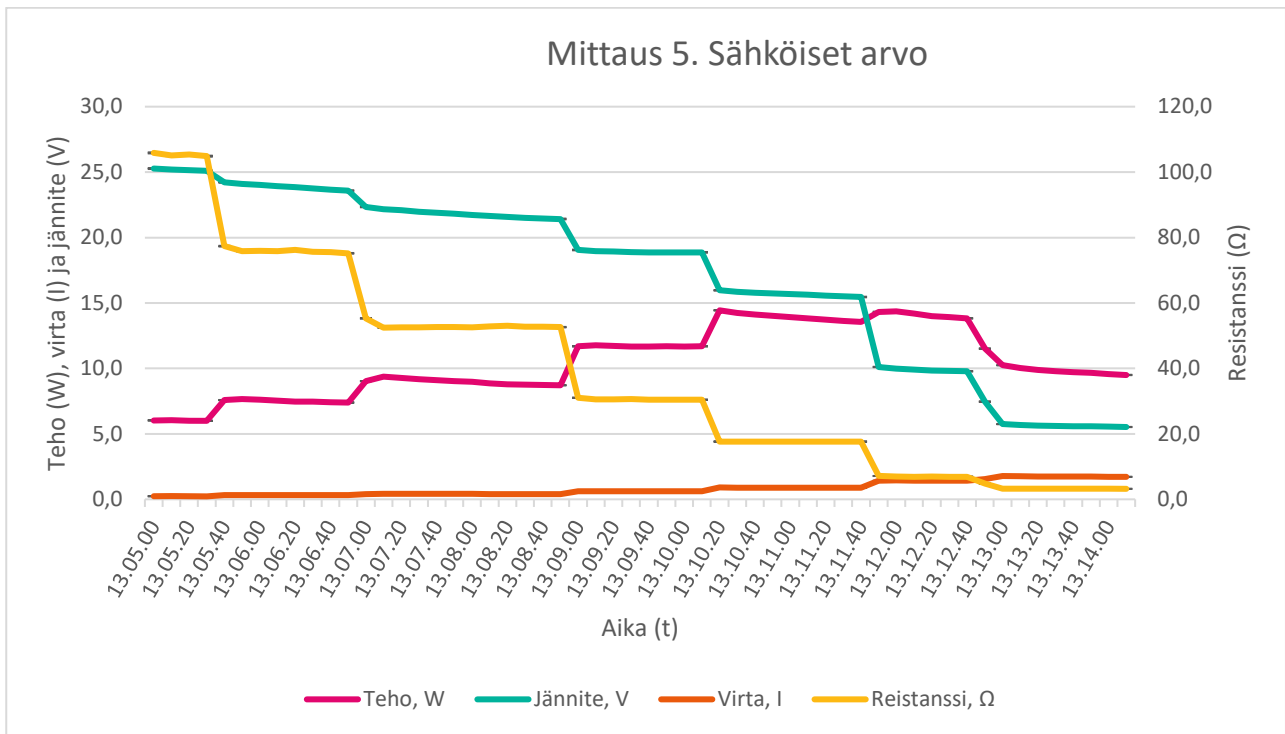


Kuvio 22. Mittaus 4. Hyötysuhde

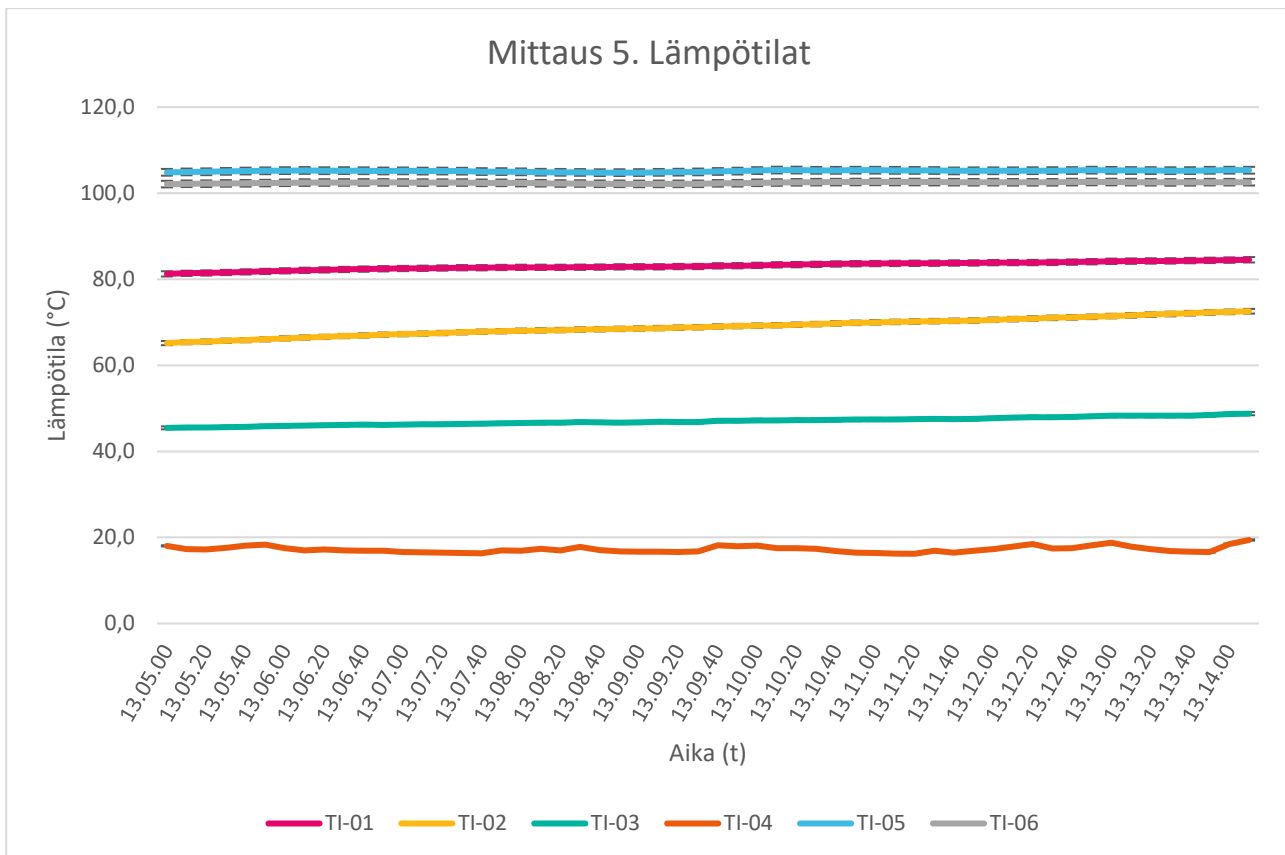
### 8.3 Mittaus 5

Tässä mittauksessa jäähdytyspuhallin aseteltiin 50 % teholle. Mittauksessa jäähdytysilman nopeutta ei pystytty luotettavasti mittaamaan. Mittauksen huipputeho oli 14 W eli 0,21 W/moduuli (ks. kuvio 23). Mittauksen lämpötiloja tarkastellessa nähdään moduulien lämpimän puolen (TI-01), moduulien kylmän puolten (TI-02) ja lähtevän jäähdytysilman (TI-03) lämpötilojen kasvavan tasaisesti mittauksen aikana. Muissa lämpötilamittauksissa ei tapahdu muutosta. Tämä lämpötilojen muutos voi johtua liian lyhyestä ajasta testien välillä. Kun puhaltimen nopeutta pudotettiin ei odotettu riittävästi testilaitteen lämpötilojen tasaantumista. Lämpötilaero muuttui noin 4 °C (ks. kuvio 24). Tämä vääristää tuloksia hieman, vaikkakin mittauksen huipputeho saavutettiin mittauksen lopulla, jolloin lämpötilat olivat ehtineet jo liikkua kohti niiden tasaantumista.





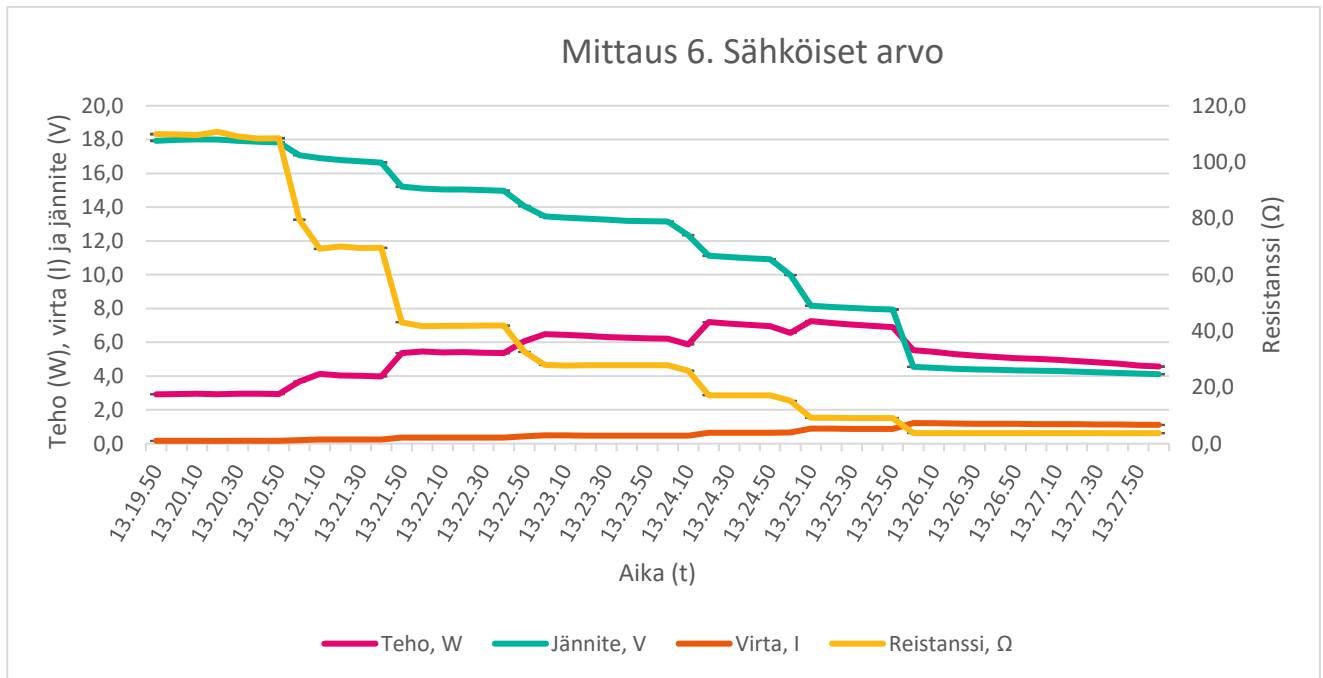
Kuvio 23. Mittaus 4. Teho, virta, jännite ja resistanssi.



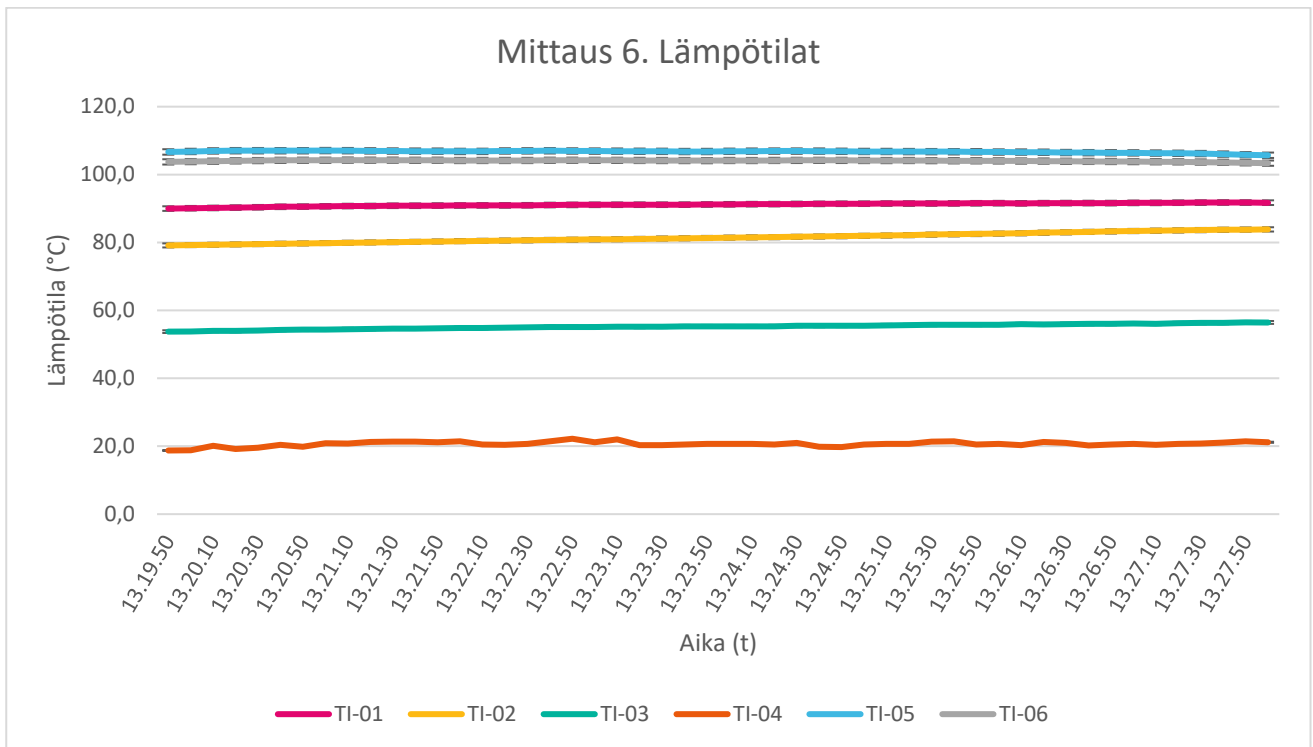
Kuvio 24. Mittaus 5. Lämpötilat

## 8.4 Mittaus 6

Tässä mittauksessa jäähdytyspuhallin aseteltiin 25 % teholle. Mittauksen huipputeho oli 7 W eli 0,10 W/moduuli (ks. kuvio 25). Tässäkin mittauksessa nähdään moduulien kylmän puolten (TI-02) ja lähtevän jäähdytysilman (TI-03) lämpötilojen liikkuvan hieman mittauksen aikana samasta syystä kuin aikaisemmassa mittauksessa (ks. kuvio 26).



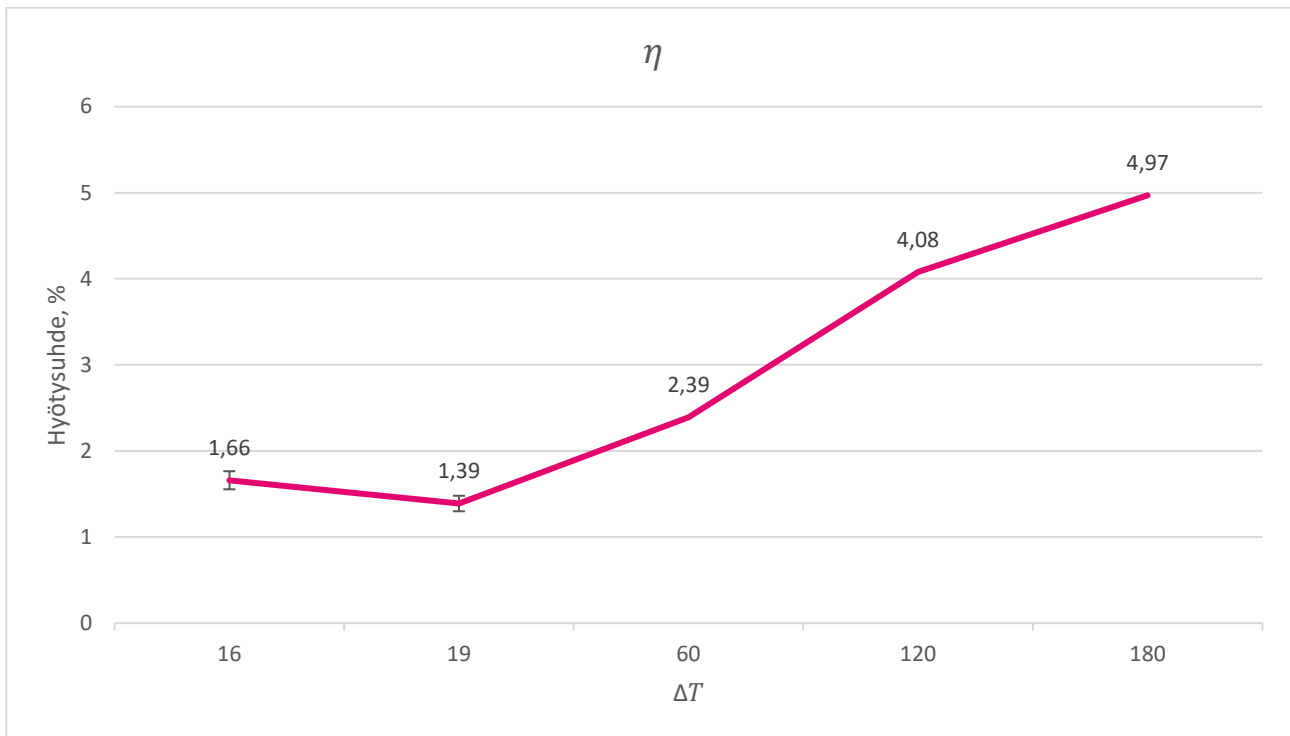
Kuvio 25. Mittaus 6. Teho, virta, jännite ja resistanssi.



Kuvio 26. Mittaus 6. Lämpötilat

## 9 Pohdintaa mittaustuloksista

Suunnitteluvaiheessa arvioidusta 1 W/moduuli tuotosta jäätiin selvästi sen alle. Ajateltu puhaltimen tehon säätö optimaalisen toiminnan löytämiseksi epäonnistui osittain jäähdytyksen riittämättömyyden sekä käytettävissä olevan virtausmittarin pienten virtausten mittauskyvyn puutteen vuoksi. Mittauksissa huipputehoksi saatiin 0,42 W/moduuli. Hyötysuhde saavutti noin 1,39–1,66 %, mikä on saavutetuilla lämpötilaeroilla kuitenkin hyvä. Kun sijoitetaan mittausten hyötysuhde moduulien datalehdeltä saatujen hyötysuhteiden kanssa kuvaajaan, nähdään että mittauksista saatu hyötysuhde on linjassa moduulien datalehdillä esitettyjen hyötysuhteiden kanssa. Datalehdellä ilmoitetut hyötysuhteet eivät riittäneet tarpeeksi pienille lämpötilaeroille, jotta suoraa vertailua olisi voitu tehdä (ks. kuvio 27).



Kuvio 27. Mittausten hyötysuhde verrattuna datalehden hyötysuhteisiin

Suurin yksittäinen ongelmakohta on testilaitteen jäähdytyksessä. Moduulien hyötysuhteen ollessa alhainen ja hukkaan menevän lämpöenergian määrä on suuri verrattuna tuotettuun sähköiseen tehoon. Lämpö muodostuu pienellä alueella moduulien koon vuoksi, joka vaikeuttaa riittävän kokoisen jäähdytysratkaisun kiinnittämistä niiden pintaan. Ilmajäähdytystä käytettäessä jäähdytysilmaa tarvitaan myös paljon, joka vaatii suuren puhaltimen, joka taas puolestaan kuluttaa paljon sähköä. Lisäksi vuodenajasta riippuen, lämmin ulkoilma jäähdytyksessä ei ole optimaalista. Näiden syiden takia ilmajäähdytys ei tässä testilaitteessa ollut riittävä. Testien aikana jäähdytyspuhaltimen ottama teho oli 100 % puhallusteholla noin:

$$P = U * I * \cos\varphi = 230 \text{ V} * 1,30 \text{ A} * 0,85 \approx 254 \text{ W}$$

jossa,

$P = \text{teho (W)}$

$U = \text{verkon jännite (V)}$

$I = \text{puhaltimen ottama virta (A)}$

$\cos\varphi = \text{tehokerroin (arvioitu puhaltimen tehokerroin)}$

(Valtonen 2019, 1030)

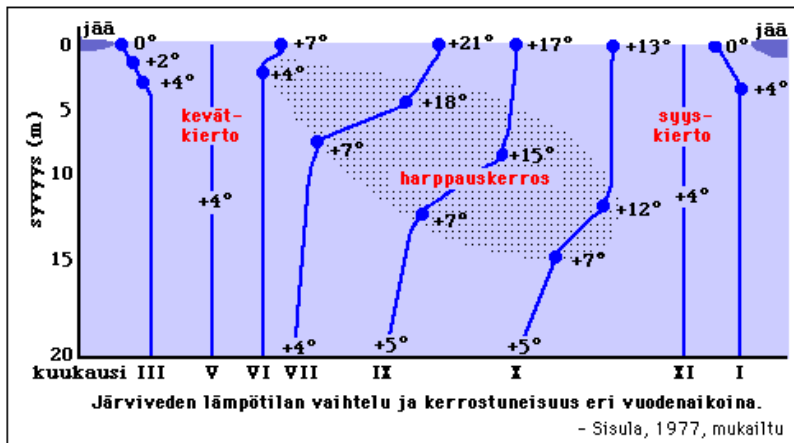
Jäähdytykseen käytettiin siis lähes kymmenkertainen teho mitä testilaitteesta saatiin ulos. Paremmiin virtaavilla kanavilla ja muilla ilmanvirtausta tehostavilla toimilla voitaisiin nykyistä testilaitetta parantaa, mutta niilläkään ei saada näin suurta tuotannon ja kulutuksen välistä eroa kiinni.

Tulevan veden lämpötilaa (TI-05) ja moduulien lämpimän pinnan (TI-01) lämpötilaa tarkastellessa näemme noin 30 °C pudotuksen. Lämpötilan johtumista rajoittaa liitoskohdat materiaalien välillä. Testilaitteessa käytettiin lämmönjohtotahnaa kaikissa liitoksissa, mutta silti pudotus lämpötilassa on huomattava. Voimakkaammalla kappaleiden puristusvoimalla pudotusta voisi saada pienennettyä. Tätä ei kuitenkaan kokeiltu testilaitteella.

## **10 Kehitysehdotus**

### **10.1 Jäähdytyksen toteutus**

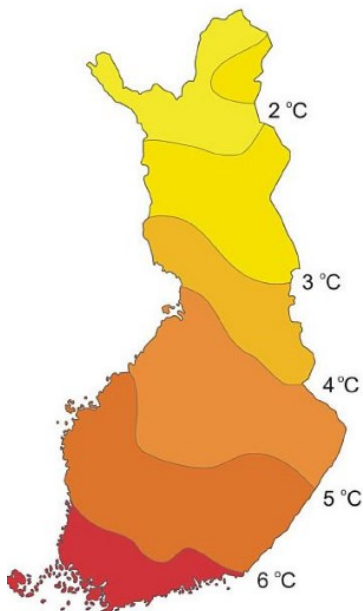
Kehityskohtia on erityisesti riittävän jäähdytyksen toteutuksessa. Jäähdytin pitäisi olla pieni kooltaan, jotta se on helposti kiinnitettävissä moduulin pintaan. Sen pitäisi kuluttaa vähän sähköä ja pystyä siirtämään suhteellisen suuria määriä energiaa verrattuna moduulien sähköntuotantoon. Vesijäähdytyksellä voitaisiin saavuttaa paremmin annetut vaatimukset tässä tapauksessa. Vesijäähdytys on pienempi kooltaan ja siten helpommin kiinnitettävissä moduuleihin. Kiertovesipumpulla nesteen kierrättäminen suljetussa putkistoissa ei vaadi suuria tehoja. Jotta vesijäähdytys toimisi pitäisi jäähdyttimelle löytää sopiva paikka, jotta se saataisiin jäähtymään passiivisesti, jotta tehonkulutus saadaan pidettyä matalana. Vesistö tai muu vastaava olisi optimaalinen tapa jäähdyttää jäähdytintä passiivisesti, jolloin myös tulevan nesteen lämpötila saataisiin pidettyä matalana. Järvivedet pysyttelevät 20 m syvyydessä ympäri vuoden noin 4 °C ja jo 10 m syvyydessä vesi pysyy noin 10 °C ympäri vuoden (ks. kuvio 28). (Pohjoisen luontomme talvi)



Kuvio 28. Veden lämpötilan vaihtelut ja kerrostuminen (Pohjoisen luontomme talvi)

Toisena vaihtoehtona voisi olla maahan kaivettu putki jäähdyttimenä. Tämä mahdollistaisi moduulien käytön muuallakin kuin vesistöjen välittömässä läheisyydessä. Jo 80 cm syvyydessä lämpötila pysyttelee vuodenajasta riippuen 1–15 °C välillä (Maan lämpötilat, routa 2010). Syvemmälle noin 15 m mentäessä maan lämpötila vakiintuu noin 5 °C lämpötilaan (Geoenergia 2019). Jo noin 1-2 m syvyyteen sijoitettu putki mahdollistaa viileän tulevan jäähdytysnesteen lämpötilan.

### Maanpinnan lämpötila



Kuvio 29. Maan lämpötila noin 15 m syvyydessä (Geoenergia 2019).

## 10.2 Moduulien kiinnitys

Moduulien kiinnitysratkaisussa hukattiin lämpötilaa materiaalien liitoskohdissa. Moduulien kiinnitystä tulisi kehittää siten että, lämmön lähteen ja moduulin väliin jäävien materiaalien vaihdosten määrä saadaan mahdollisimman pieneksi. Näin moduuleille saadaan johdettua mahdollisimman paljon lämpöä ja siten kasvatetaan tuottomahdollisuuksia. Optimaalisin vaihtoehto sähköntuotannon kannalta olisi kiinnittää moduulit suoraan putken pintaan ja kehittää tapa tuottaa riittävä puristusvoima pintojen välille.

## 11 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa testilaitte, joka tuottaa lämmöstä sähköä hyödyntäen lämpösähköistä ilmiötä ja kerätä mittaustietoja testilaitteen toiminnasta. Testipaikaksi valikoitunut Tarvaalan lämpölaite osoittautui hyväksi paikaksi testilaitteen testaamiseen. Se sijaitsi lähellä koulua, josta työkaluja ja muita tarvikkeita oli helposti saatavilla. Testipaikka ja ympäristö oli myös rauhallinen, joten laitteen asennuksen ja testauksen sai tehdä rauhassa häiritsemättä muuta laitoksen toimintaa. Testilaitteelle annettuihin tavoitteisiin päästiin osittain. Laitteella onnistuttiin tuottamaan sähköä lämmöstä lämpösähköistä ilmiötä hyödyntäen. Opinnäytetyön alkuvaiheessa arvioidusta 1 W /moduuli tuottoarviosta jäätiin reilusti. Tämä johtui jäähdytyksen alimitoituksesta ja ulkoilman lämpötilasta, joka johti matalaan lämpötilaeroon moduulien pintojen välillä. Myös parempi kuumien pintojen eristäminen olisi voinut auttaa jäähdytyksessä, kun muita paljaita lämpimiä pintoja ei olisi tullut kosketuksiin jäähdytysilman kanssa.

Rajauksena opinnäytetyöllä oli pysytellä kaupallisesti saatavilla olevien moduulien parissa. Tämä osoittautui haasteelliseksi tekoajankohdan saatavuusongelmien vuoksi, mutta lopulta testilaitte saatiin kokonaisuudessaan kasaan ja toimintaan. Tämä työ oli yhdessä LäSä- hankkeen kanssa vasta ensimmäinen askel lämpösähköisiin laitteisiin, eikä tarkoituksena ollutkaan rakentaa valmista tuotetta tai saada koko laitetta jäähdytyksineen toimimaan pelkällä moduulien tuottamalla teholla.

Tulevaisuuden laitteita ja koko laitteiston ml. jäähdytys toimimista pelkällä moduulien tuottamalla sähköllä ajatellen, jäähdytysratkaisuksi pitää valita tehokkaampi ja vähäkulutteinen ratkaisu. Lisäksi materiaalien liitoskohdissa tapahtuvaa lämpötilan alenemaa on syytä rajoittaa maksimaalisen

tuoton saavuttamiseksi ja koko laitteiston toiminnan sen omalla tuottamallaan teholla saavuttamiseksi.

Todellisia käyttökohteita moduuleille on vaikea löytää tämän työn tulosten pohjalta. Aihe vaatii lisää tutkimusta ja kehitystä, jotta moduuleilla saadaan tuotettua riittävästi tehoa laitteen omiin tarpeisiin ja muiden laitteiden käyttövoiman lähteeksi. Jatkuvasti kehittyvä materiaalitekniikka voi tuoda markkinoille lähivuosina uusia materiaaleja, jotka mahdollistavat paremmat edellytykset tässä onnistumiselle ja lämpösähköiselle ilmiölle olla varteenotettava vaihtoehto hukkalämpöjen hyödyntämiseksi.



## Lähteet

Abdel-Motaleb, I. & Qadri, S. 2017. Thermoelectric Devices: Principles and Future Trends. Artikkele arxiv.org sivustolla. Viitattu 2.4.2023. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1704/1704.07742.pdf>

An Introduction to Pitot Tubes and Probes. Omega.com sivustolla oleva artikkeli. Viitattu 15.3.2023. <https://www.omega.com/en-us/resources/pitot-tube>

Arar, S. 2022. Thermocouple Principles-the Seebeck Effect and Seebeck Coefficient. Julkaisu All about circuits sivustolla. Viitattu 4.9.2022. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/thermocouple-principles-seebeck-effect-seebeck-voltage-seebeck-coefficients/>

Auparay, N. 2013. Room Temperature Seebeck Coefficient Measurement of Metals and Semiconductors. Kandidaatin työ. Oregonin osavaltioyliopisto. Fysiikan kandidaatti. Viitattu 4.9.2022. [http://sites.science.oregonstate.edu/~tatej/TateLabWiki/lib/exe/fetch.php?media=theses:auparay\\_bs\\_2013.pdf](http://sites.science.oregonstate.edu/~tatej/TateLabWiki/lib/exe/fetch.php?media=theses:auparay_bs_2013.pdf)

Awati, R. 2021. Seebeck effect. Julkaisu TechTarget sivustolla. Viitattu 4.9.2022. <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/Seebeck-effect>

Boyes, W. 2010. Instrumentation reference book. 4 uud. p. Amsterdam; Boston: Butterworth-Heinemann. Viitattu 2.4.2023. <https://janet.finna.fi/>, ProQuest E-book Central.

Dataker CEM20. Dataloggerin laajennusmoduulin datalehti pdf tiedostona. jsinstruments.com sivustolla. Viitattu 2.4.2023. <http://www.jsinstruments.com/files/dataker-cem20.pdf>

DataTaker DT80W. Dataloggerin datalehti pdf tiedosto. sataloggerinc.com sivustolla. Viitattu 2.4.2023. [https://www.dataloggerinc.com/wp-content/uploads/2017/06/dataTaker\\_DT80W.pdf](https://www.dataloggerinc.com/wp-content/uploads/2017/06/dataTaker_DT80W.pdf)

Electrons and "holes". Internetjulkaisu allaboutcircuits.com- sivustolla. Viitattu 5.4.2023. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-2/electrons-and-holes/>

Energiatohokkuusdirektiivin mukainen selvitys hukkalämmön potentiaalista ja kustannus-hyötyanalyysi tehokkaasta lämmittämisestä. Afryn raportti työ- ja elinkeinoministeriölle. Viitattu 25.9.2022. [https://tem.fi/documents/1410877/2897650/EEDselvitys+l%C3%A4mmityksest%C3%A4\\_loppuraportti+2020.pdf/88a0e63b-e2b6-eef9-1b4c-8c5411a0e531/EEDselvitys+l%C3%A4mmityksest%C3%A4\\_loppuraportti+2020.pdf?t=1601627038073](https://tem.fi/documents/1410877/2897650/EEDselvitys+l%C3%A4mmityksest%C3%A4_loppuraportti+2020.pdf/88a0e63b-e2b6-eef9-1b4c-8c5411a0e531/EEDselvitys+l%C3%A4mmityksest%C3%A4_loppuraportti+2020.pdf?t=1601627038073)

Freire, L., Navarrete, L., Corrales, B. & Castillo, J. 2021. Efficiency in thermoelectric generators based on peltier cells. ScienceDirect sivustolla luettavissa oleva artikkeli. Viitattu 4.9.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721007022>

Geoenergia. 2019. Artikkelele Geoenergiasta geologia.fi sivustolla. Viitattu 1.4.2023. <https://www.geologia.fi/2019/12/31/geoenergia/>

Historia ja toimintakertomukset. Saarijärven kaukolämpö Oy kotisivut. Viitattu 25.9.2022. <https://saaveka.fi/kaukolampo/kaukolampotuotanto-ja-verkosto/>

Kaukolämpötuotanto ja verkosto. Saarijärven kaukolämpö Oy kotisivut. Viitattu 25.9.2022. <https://saaveka.fi/kaukolampo/kaukolampotuotanto-ja-verkosto/>

Lee, H.S. 2010. Thermal design heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells. Hoboken, N.J: Wiley. Viitattu 21.9.2022. <https://janet.finna.fi/>, ProQuest E-book Central.

Lindell, I. 1994. Sähkötekniikan historia. Espoo: Otatiето Oy

LäSä – Lämpösähköiset ratkaisut energiatehokkuuden lisääjinä. Jyväskylän ammattikorkeakoulun LäSä- projektin kuvaus. Viitattu 25.9.2022. <https://www.jamk.fi/fi/tutkimus-ja-kehitys/tki-projektit/lasa-lamposahkoiset-ratkaisut-energiatehokkuuden-lisaajina>

Maan lämpötilat, routa 2010. yrityksen MR soft Tmi verkkosivuilta löytyvää mittausdataa. Viitattu 1.4.2023. <https://www.mrsoft.fi/routa2010.htm>

Mardi-Bovea, J., Torres-Diaz, G., Sabau, M., De-la-Hoz-Franco, E., Nino-Moreno, Jose. & Pacheco-Torres, P. 2019. A review to refrigeration with thermoelectric energy based on the Peltier effect. Artikkelit scielo.org.co sivustolla. Viitattu 2.4.2023. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532019000100009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532019000100009)

Meng, B., Liu, J. & Wang, L. 2020. Recent development of n-type thermoelectric materials based on conjugated polymers. ScienceDirect sivustolla luettavissa oleva artikkeli. Viitattu 4.9.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589965120300544>

Opinnäytetyön eettiset suositukset. N.d. Ammattikorkeakoulujen opinnäytetyön eettiset suositukset pdf- tiedosto arene.fi- sivustolla. Viitattu 4.4.2023. <https://www.arene.fi/julkaisut/raportit/opinnaytetoiden-eettiset-suositukset/>

Opinnäytetyö – kehittämisprojekti. Kurssimateriaali tutkimus ja kehitys- kurssilta. Viitattu 4.4.2023

Pernaa, J. N.d. Kehittämistutkimus tutkimusmenetelmänä. pdf- artikkeli kehittämistutkimusten tutkimusmenetelmistä Helsingin yliopiston helsinki.fi- sivustolla. Viitattu 4.4.2023. [https://tuhat.helsinki.fi/ws/files/127650174/2013\\_Pernaa\\_KT\\_tutkimusmenetelmana\\_KT\\_kirj](https://tuhat.helsinki.fi/ws/files/127650174/2013_Pernaa_KT_tutkimusmenetelmana_KT_kirj)

Pohjoisen luontomme talvi. Internet sivusto oulu.fi. Viitattu 1.4.2023. <https://www oulu.fi/northnature/finnish/Suomi/talvikansio/talviymp4.html>

Seneca T201DCH. Virtaanturin datalehti pdf tiedosto. Myyjän elfadistelec.fi sivustolla. Viitattu 2.4.2022. [https://www.elfadistelec.fi/Web/Downloads/t/ds/T201\\_eng\\_tds.pdf](https://www.elfadistelec.fi/Web/Downloads/t/ds/T201_eng_tds.pdf)

TG12-8. TEG-moduulin datlehti Digikey.com- sivustolla. Viitattu 5.4.2023. <https://www.digikey.com/en/products/detail/marlow-industries-inc/TG12-8-01LS/6159120>

The Fundamentals of Thermoelectrics. Pdf artikkeli uni.muenchen.de- sivustolla. Viitattu 5.4.2023. [https://www.nano.physik.uni-muenchen.de/nanophotonics/as-sets/pdf/f1/K3\\_Thermoelectrics.pdf](https://www.nano.physik.uni-muenchen.de/nanophotonics/as-sets/pdf/f1/K3_Thermoelectrics.pdf)

THE HEATSINK GUIDE: Peltier Guide, Part 1. Artikkeli heatsink-guide.com sivustolla. Viitattu 2.4.2023. <http://www.heatsink-guide.com/peltier.htm>

Thermocouple Accuracies. Thermocoupleinfo.com sivustolla. Viitattu 12.2.2023. <https://www.thermocoupleinfo.com/thermocouple-accuracies.htm>

Thomson effect. Artikkeli brainkart.com sivustolla. Viitattu 2.4.2023. [https://www.brainkart.com/article/Thomson-effect\\_38436/](https://www.brainkart.com/article/Thomson-effect_38436/)

Vaidyanathan, V. 2022. Thermoelectric Generator: Principle, Mechanism And Materials. Julkaisu ScienceABC sivustolla. Viitattu 4.9.2022. <https://www.scienceabc.com/innovation/thermoelectric-generator-principle-mechanism-materials.html>

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. 21. uud. p. Mikkeli:Genesis-Kirjat Oy

What are Seebeck Effect and Seebeck Coefficient?. Electricalvolt.com sivustolla oleva kirjoitus. Viitattu 1.4.2023. <https://www.electricalvolt.com/2022/05/seebeck-effect-seebeck-coefficient/>

What is N-type and P-type semiconductor?. Internetjulkaisu. shindengen.com- sivustolla. Viitattu 5.4.2023. [https://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/rectifying\\_action.html](https://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/rectifying_action.html)

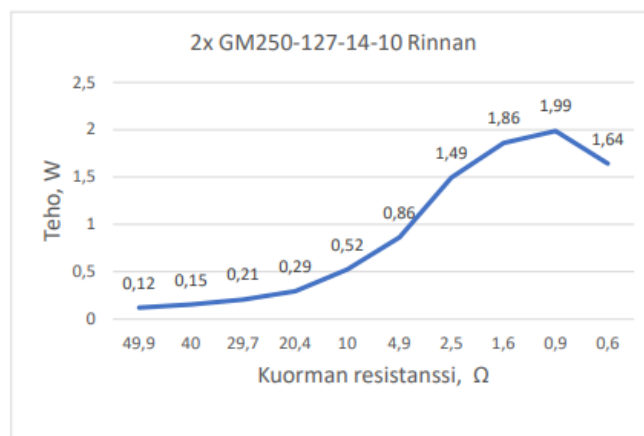
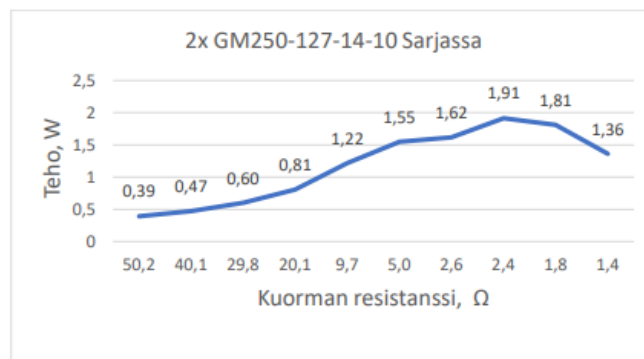
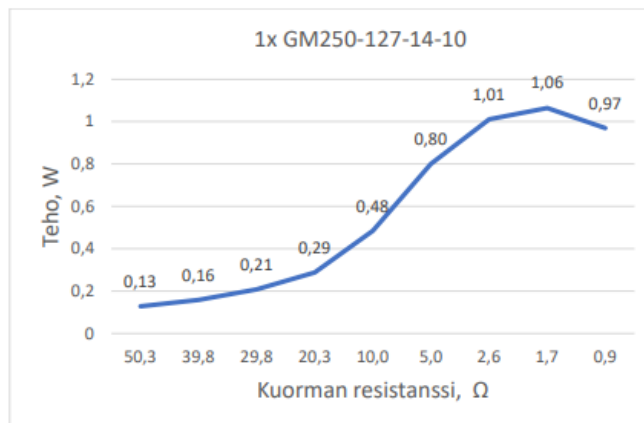
What is Thermoelectric Generator : Working & Its Uses. Internet julkaisu elprocus.com sivustolla. Viitattu 5.4.2023. <https://www.elprocus.com/why-thermoelectric-generator-is-most-used-working-uses-and-benefits/>

Yazawa, K., Je-hyeong, B. & Asli, S. 2021. Thermoelectric Energy Conversion Devices And Systems. Singapore: World Scientific Publishing Company. Viitattu 16.10.2022. <https://janet.finna.fi/>, VleBooks

## Liitteet

### Liite 1. Alustavan testin tulokset

#### TEG-moduulien alustavien testien tulokset

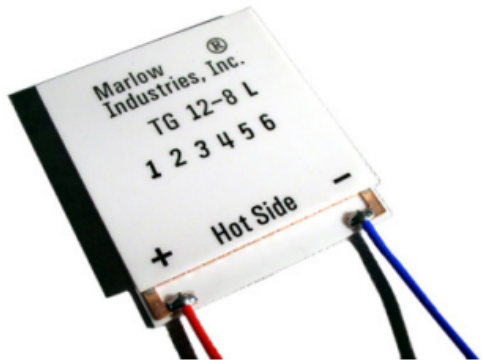


## Lite 2. Marlow Industries TG12-8-01LS



# Technical Data Sheet for TG12-8

## Single-Stage Thermoelectric Generator



### NOMINAL PERFORMANCE IN NITROGEN

Cold Side Temperature (°C)	27±2
AC Resistance (ohms):	1.36 – 1.69
Device ZT	0.73

### PRODUCT FEATURES

- RoHS EU Compliant
- Rated operating temperature of 200°C.
- Ceramic Material: Aluminum Oxide
- Porch configuration for high strength leadwire connection.
- Superior nickel diffusion barriers on elements.
- High strength for rugged environment.
- RTV sealing option available.
- Lapped option available for multiple module applications.

### ORDERING OPTIONS

Model Number	Description
TG12-8-01	Leadwires
TG12-8-01L	Leadwires, Lapped
TG12-8-01S	Leadwires, Sealed
TG12-8-01LS	Leadwires, Lapped, Sealed
TG12-8-01G	Leadwires, Graphite Pads
TG12-8-01LG	Leadwires, Lapped, Graphite Pads
TG12-8-01SG	Leadwires, Sealed, Graphite Pads
TG12-8-01LSG	Leadwires, Lapped, Sealed, Graphite Pads

### OPERATION CAUTIONS

For maximum reliability, continuous operation below 200°C (cold side and hot side) is recommended. Intermittent operation up to 230°C on the hot side of the TG is permissible.

### INSTALLATION

Recommended mounting methods: Clamp with uniform pressure to a flat surface with thermal interface material. Recommended 1.4 MPa (200 psi) with thermal grease or flexible graphite pads. For additional information, please contact an applications engineer.

II-VI Marlow – Dallas, TX USA  
214-340-4900  
877-627-5691  
marlow.sales@ii-vi.com

Marlow Industries Europe  
GmbH - Germany  
+49 (0) 6150 5439 - 403  
info@marlow-europe.eu

II-VI Japan Inc.  
81 43 297 2693 (tel)  
center@ii-vi.co.jp  
www.ii-vi.co.jp

II-VI Singapore Pte., Ltd.  
(65) 6481 8215 (tel)  
info@ii-vi.com.sg

Marlow Industries China, II-VI  
Technologies Beijing  
86-10-643 98226  
info@iivbj.com

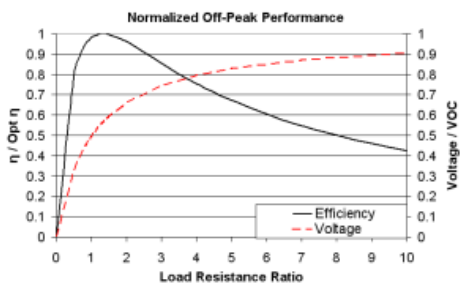
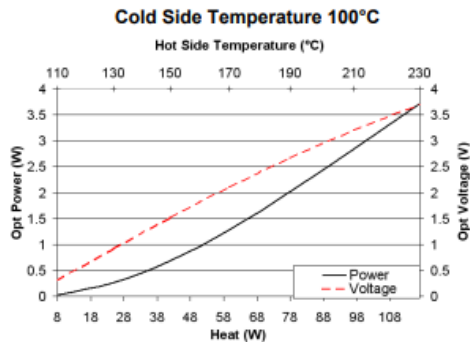
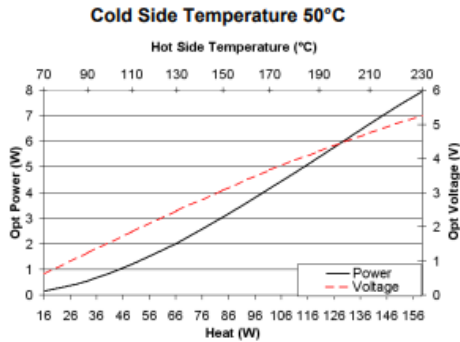
MI Form 005-0691 Rev. 5

[www.marlow.com](http://www.marlow.com)

DOC # 102-0344 REV T - PAGE 1 OF 2

**TYPICAL PERFORMANCE CURVES**

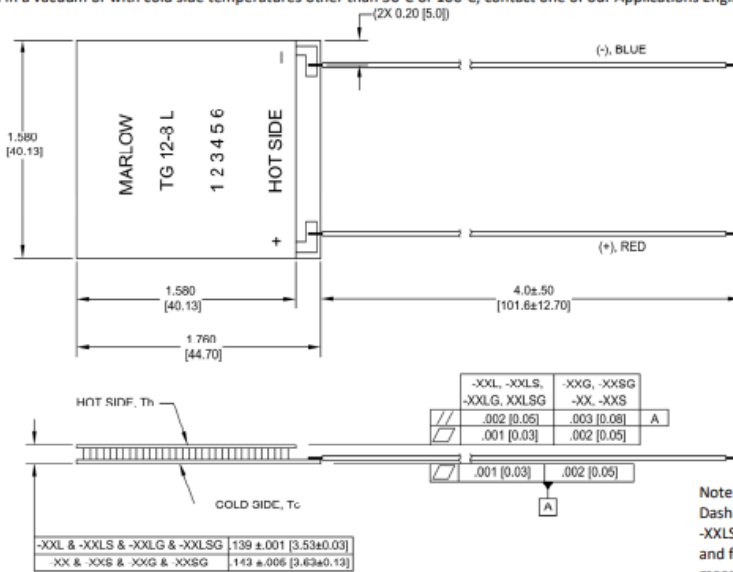
**POWER GENERATION PERFORMANCE CURVES**  
ENVIRONMENT: ONE ATMOSPHERE DRY NITROGEN



Hot Side Temperature (°C)	230	170	110
Cold Side Temperature (°C)	50	50	50
Optimum Efficiency, $\eta$ (%)	4.97	4.08	2.39
Optimum Power (W)	7.95	4.17	1.19
Optimum Voltage (V)	5.25	3.65	1.86
Load Resistance for Opt $\eta$ ( $\Omega$ )	3.46	3.20	2.90
Open Circuit Voltage, VOC (V)	9.43	6.48	3.27
Closed Circuit Current (A)	3.38	2.60	1.48
Thermal Resistance (°C/W)	1.13	1.17	1.20

For performance information in a vacuum or with cold side temperatures other than 50°C or 100°C, contact one of our Applications Engineers at 877-627-5691.

**MECHANICAL CHARACTERISTICS**



Note:  
Dash -XXG, -XXLG, -XXSG,  
-XXLSG: Height, parallelism,  
and flatness dimensions are  
measured before adding  
graphite pads.

All units are in inches. All units in [ ] are in millimeters.

For customer support or general questions please contact a local office or visit our website at [www.marlow.com](http://www.marlow.com).  
Marlow reserves the right to make product changes without notice.

## Liite 3. Mittauspöytäkirja



**jamk.fi**

### **Mittauspöytäkirja**

**LäSä**

Lauri Olin

Mittauspöytäkirja  
Kesäkuu 2022  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikan-ohjelma

Jyväskylän ammattikorkeakoulu  
JAMK University of Applied Sciences

**Sisältö**

<b>1</b>	<b>Yleistä .....</b>	<b>2</b>
1.1	Mittalaitteet (merkki, malli, sarjanumero).....	2
1.2	Mittaukset .....	2
<b>2</b>	<b>Mittaukset.....</b>	<b>3</b>
2.1	Mittaus 1.....	3
2.2	Mittaus 2.....	4
2.3	Mittaus 3.....	5
2.4	Mittaus 4.....	6
2.5	Mittaus 5.....	7
2.6	Mittaus 6.....	8



## 1 Yleistä

Mittaukset suoritettiin 13.6.2022 klo 11.30 – 16.00 Tarvaalan lämpölaitoksella. Mittausten suorittaja Lauri Olin.

### 1.1 Mittalaitteet (merkki, malli, sarjanumero)

Datalogger (DataTaker, DT80W,114926)

Laajennusmoduuli (DataTaker, CEM20, 106696)

Virtausmitari (KIMO, MP 200, 09095706)

Virta-anturi (Seneca, T201DCH, 176956\_0297)

### 1.2 Mittaukset

TI-01, TEG-moduulin lämmin puoli

TI-02, TEG-moduulin viileä puoli

TI-03, lähtevän jäähdytysilman lämpötila

TI-04, tulevan jäähdytysilman lämpötila

TI-05, Kattilankiertoputken tuleva lämpötila

TI-06, kattilankierron lähtevä lämpötila

## 2 Mittaukset

Mittaus 1 jäähdytysilmapuhallin 100% teholla. Mittaus 2 jäähdytysilmapuhallin 75% teholla. Mittaus 3 jäähdytysilmapuhallin 50% teholla. Mittaus 4 jäähdytysilmapuhallin 25% teholla. Mittaus 5 jäähdytysilmapuhallin 0% teholla

### 2.1 Mittaus 1

Ilman virtauksen lukema (m/s)

1. 2.1 m/s
2. 2.3 m/s
3. 2.0 m/s
4. 2.2 m/s
5. 1.9 m/s
6. 2.2 m/s
7. 2.2 m/s
8. 2.1 m/s
9. 2.4 m/s
10. 2.2 m/s

Virta mittauksen lukema (A)

1. 1,33 A
2. 1,32 A
3. 1,34 A
4. 1,34 A
5. 1,34 A

Dataloggerin tiedoston nimi: Mittaus1.csv

Kommentteja: -

Puhallin asetettu 100 %

## 2.2 Mittaus 2

Ilman virtauksen lukema (m/s)

1. 1,4 m/s
2. 1,5 m/s
3. 1,3 m/s
4. 1,3 m/s
5. 1,3 m/s
6. 1,5 m/s
7. 1,3 m/s
8. 1,6 m/s
9. 1,1 m/s
10. 1,4 m/s

Virta mittauksen lukema (A)

1. 0,49 A
2. 0,49 A
3. 0,50 A
4. 0,51 A
5. 0,50 A

Dataloggerin tiedoston nimi: Mittaus 2.csv

Kommentteja: -

Puhallin aseteltu 75 %

### 2.3 Mittaus 3

Ilman virtauksen lukema (m/s)

1. 2,4 m/s
2. 2,1 m/s
3. 2,0 m/s
4. 2,1 m/s
5. 2,0 m/s
6. 2,1 m/s
7. 2,1 m/s

Virta mittauksen lukema (A)

1. 1,31 A
2. 1,33 A
3. 1,34 A
4. 1,33 A
5. 1,34 A
6. 1,35 A
7. 1,33 A

Dataloggerin tiedoston nimi: Mittaus3.csv

Kommentteja: Ulkoilman viilettyä ensimmäinen mittaus uusittiin.

Puhallin asetettu 100 %

## 2.4 Mittaus 4

Ilman virtauksen lukema (m/s)

1. 1,2 m/s
2. 1,1 m/s
3. 1,2 m/s
4. 1,2 m/s
5. 1,3 m/s
6. 1,2 m/s
7. 1,4 m/s
8. 1,3 m/s
9. 1,2 m/s
10. 1,3 m/s

Virta mittauksen lukema (A)

1. 0,50 A
2. 0,50 A
3. 0,50 A
4. 0,49 A
5. 0,50 A
6. 0,50 A
7. 0,50 A

Dataloggerin tiedoston nimi: Mittaus4.csv

Kommentteja: Ulkoilman viilettyä uusittiin mittaus 2

Puhallin asetettu 75 %

## 2.5 Mittaus 5

Ilman virtauksen lukema (m/s)

-

Virta mittauksen lukema (A)

1. 0,16 A
2. 0,15 A
3. 0,15 A
4. 0,15 A
5. 0,15 A
6. 0,15 A
7. 0,15 A
8. 0,15 A
9. 0,15 A

Dataloggerin tiedoston nimi:

Kommentteja: Ilmanvirtausta ei pystytty mittarilla havaitsemaan luotettavasti

Puhallin asetettu 50 %

## 2.6 Mittaus 6

Ilman virtauksen lukema (m/s)

-

Virta mittauksen lukema (A)

1. 0,06 A
2. 0,06 A
3. 0,06 A
4. 0,06 A
5. 0,06 A
6. 0,06 A

Dataloggerin tiedoston nimi: Mittaus6.csv

Kommentteja: Ilmanvirtausta ei pystytty mittarilla havaitsemaan

Puhallin asetettu 25 %