

Pauli Koivisto

LÄMPÖSÄHKÖELEMENTIN KÄYTTÖ ELEKTRONIIKAN JÄÄHDYTYKSESSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Pauli Koivisto: Lämpösähkoelementin käyttö elektroniikan jäähdytyksessä (Thermoelectric cooling of electronic devices)

Tampereen yliopisto

Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2020

Teknologian ja valmistusmenetelmien kehittymisen ansiosta elektroniikkalaitteista on ollut mahdollista rakentaa tehokkaampia ja pienempiä. Laitteiden kuluttama sähköteho muuttuu lämmöksi, joten elektroniikkalaitteissa syntyvät lämpövirrantiheydet kasvavat, kun laitteet kehittyvät. Elektroniikkalaitteiden lämpökuormat heikentävät laitteiden suorituskykyä, minkä takia tehokkaiden jäähdytysjärjestelmien kehittäminen on tärkeää. Tässä työssä on tavoitteena tutkia kirjallisuudesta, miten lämpösähkoelementti toimii, miten lämpösähkoelementtejä voidaan hyödyntää elektroniikan jäähdytyksessä ja miten lämpösähkoelementtijäähdytyksen tehokkuutta voidaan parantaa.

Työssä selitetään lämpösähkoelementin toiminnan perusteena olevat fysikaaliset ilmiöt ja esitetään niitä kuvaavat yhtälöt. Yhtälöiden ja teorian avulla tutkitaan, miten lämpösähkoelementin tehokerrointa ja jäähdytystehoa voidaan mallintaa ja miten lämpösähkömateriaalien ominaisuudet vaikuttavat niihin. Lämpösähkömateriaalin laatuluku Z kertoo materiaalin lämpösähkösäätötehokkuudesta ja sen avulla voidaan selvittää materiaalista valmistetun elementin tehokerroin, kun toimintalämpötilat tunnetaan. Työssä tarkastellaan myös lämpösähkoelementtiä osana jäähdytysjärjestelmää, sekä sitä, mitkä asiat vaikuttavat lämpösähkoelementin jäähdytystehoon ja tehokertoimeen. Lämpönielun lämmönsiirtotehokkuutta parantamalla voidaan nostaa lämpösähkoelementin tehokerrointa. Lämpönieluna toimivan rivaston korvaaminen suljettuun fluidin kiertoon perustuvalla lämmönsiirtimellä parantaa jäähdytyksen tehokerrointa kyseisessä tapauksessa arvosta 0,4 arvoon 0,8.

Lämpösähkoelementti koostuu p- ja n-tyyppien puolijohteista, jotka on kytketty sähköisesti sarjaan ja termisesti rinnan, jolloin sähkövirta aiheuttaa puolijohteiden liitoksissa lämpenemistä ja jäähtymistä Peltierin ilmiön seurauksena. Kaskadikytkennän eli elementtien termisen sarjaankytkennän avulla on mahdollista jäähdyttää kohde ympäristön lämpötilan alapuolelle. Lämpösähkoelementin jäähdytyksen tehokerrointa saadaan parannettua kehittämällä materiaaleja, joilla on korkeampi laatuluku. Lämpösähkömateriaalien ominaisuuksissa painottuvat materiaalin Seebeckin kerroin, resistiivisyys ja lämmönjohtumisvastus. Seebeckin kertoimen itseisarvoa ja lämmönjohtumisvastusta pyritään lisäämään samalla, kun resistiivisyyttä pyritään pienentämään parempia lämpösähkömateriaaleja kehitettäessä. Tulevaisuudessa lämpösähkömateriaalien kehitys suuntautuu ohutkalvotekniikkaan, mikä mahdollistaa materiaalien helpomman seostamisen. Ohutkalvomateriaalien valmistustekniikoita tutkitaan ja pyritään löytämään yksinkertaisia ja skaalautuvia menetelmiä kalvojen valmistamiseen.

Lämpösähkoelementtejä käytetään tietokoneen prosessorien, valoherkkien kennojen, sensorien ja optiikan laitteiden, kuten tehokkaiden laserlaitteiden jäähdytyksessä. Lämpösähkoelementeillä on mahdollista muuttaa komponenttien hukkalämpöä sähköksi ja käyttää sitä jäähdytykseen. Tulevaisuudessa lämpösähkömateriaalitutkimuksen avulla kehitetään korkeamman laatuluvun materiaaleja, joiden avulla elementtien tehokerrointa on mahdollista kasvattaa.

Avainsanat: Lämpösähkoelementti, elektroniikan jäähdytys, Peltierin ilmiö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LÄMPÖSÄHKÖISEN JÄÄHDYTYKSEN TEORIA	2
2.1 Seebeckin ja Peltierin ilmiöt	2
2.2 Lämpösähköelementin matemaattinen mallinnus	4
2.3 Lämpönielu	9
2.4 Lämpösähköelementti osana jäähdytysjärjestelmää	11
3. LÄMPÖSÄHKÖELEMENTIN RAKENNE JA MATERIAALIT	13
3.1 Kaskadikytkentä	13
3.2 Väliaineet	16
3.3 Lämpösähkömateriaalit	17
4. LÄMPÖSÄHKÖELEMENTIN KÄYTTÖ	20
4.1 Transienttijäähdytys	21
4.2 Hukkalämmön hyödyntäminen	22
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	24
LÄHTEET	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CCD	Charge-coupled device, valoherkkä kenno
COP	Coefficient of performance, tehokerroin
α	Seebeckin kerroin [V/K]
ρ	Resistiivisyys [Ωm]
π	Peltierin kerroin [V]
A	Materiaalin poikkipinta-ala [m^2]
H	Konvektiivinen lämmönsiirtovastus [K/W]
h	Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
I	Sähkövirta
k	Lämmönjohtavuus [W/mK]
L	Materiaalin pituus
N	Lukumäärä, kokonaisluku [-]
P	Resistanssin aiheuttama häviöteho [W]
\dot{Q}	Lämpöteho [W]
R_s	Sähköinen resistanssi [Ω]
R_t	Terminen resistanssi [K/W]
T	Lämpötila
ΔT	Lämpötilaero
V	Jännite [V]
Z	Lämpösähkömateriaalin laatuluku [$1/\text{K}$]
ZT	Lämpösähkömateriaalin dimensioton laatuluku [-]
alaindeksit	
1	Lämpösähköelementin kylmä puoli
2	Lämpösähköelementin kuuma puoli
3	Lämpönielun reuna, joka on lämpösähköelementtiliitokselle vastakkainen
∞	Ympäristö
e	elementti
j	Lämmönjohtuminen
kok	Kokonaismäärä
MAX	Maksimiarvo
n	N-typin puolijohde
P	Peltier-ilmiö
p	P-typin puolijohde
pn	P- ja N-typin puolijohdeiden liitos
R	Radiation, jäähdytys
s	Sähköinen
t	Terminen

1. JOHDANTO

Elektroniikkalaitteiden kuluttama sähköenergia muuttuu lämpöenergiaksi laitteen komponenteissa. Teknologian kehittymisen myötä laitteista ja komponenteista on ollut mahdollista rakentaa pienempiä. Komponenttien integraation kehittymistä ennustavan Mooren lain mukaan laitteen komponenttien määrä suhteessa laitteen kokoon kasvaa kaksinkertaiseksi 1,5—2 vuoden välein (Lienig & Bruemmer 2017). Kun lämpöä tuottavia komponentteja on mahdollista integroida yhä pienemmälle alueelle, muodostuu suuria lämpövirrantiheyksiä. Suuret lämpövirrantiheydet aiheuttavat kuumenemistä laitteistossa. Kun lämpötila on riittävän korkea, komponenttiin voi aiheutua pysyvä vika, joka joko heikentää suorituskykyä tai rikkoo komponentin. On esitetty, että noin 10—15 °C:n nousu laitteen toimintalämpötilassa puolittaa laitteen käyttöiän (Tong 2011, s. 3—6). Lämpötilansäätö on siis tärkeää sekä laitteen suorituskyvyn, että kestävyuden kannalta.

Elektroniikkalaitteiden lämpötilanhallintaan on olemassa erilaisia jäähdytystekniikoita. Tässä työssä keskitytään erityisesti lämpösähköelementteihin. Niihin liittyvä tutkimus keskittyy parempien lämpösähkömateriaalien kehittämiseen elementtien hyötysuhteen nostamiseksi (DeLong et al. 2020). Tavoitteena on selvittää, miten lämpösähköelementti toimii ja miten lämpösähköelementtejä voidaan hyödyntää elektroniikan jäähdytyksessä. Työssä etsitään keinoja, joilla lämpösähköelementtijäähdytyksen tehokkuutta voitaisiin parantaa. Parannuskeinojen löytämiseksi on tärkeää ymmärtää elementin toiminnan teoreettinen tausta. Teorian ymmärtäminen auttaa myös hahmottamaan, millaisia ominaisuuksia hyvältä lämpösähkömateriaalilta vaaditaan. Lämpösähkömateriaalien ominaisuuksien tutkimisella saadaan selville, miten elementin tehokerrointa on mahdollista nostaa.

Luvussa 2 tutkitaan lämpösähköelementin toiminnan teoreettista taustaa. Luvussa 3 käsitellään lämpösähköelementin rakennetta ja materiaaleja. Luku 4 käsittelee lämpösähköelementtien käyttöä elektroniikan jäähdytyksessä. Luvussa 5 kootaan tärkeimmät johtopäätökset.

2. LÄMPÖSÄHKÖISEN JÄÄHDYTYKSEN TEORIA

Lämpösähköelementti koostuu lämpösähköpareista, joissa toinen materiaali on p- ja toinen n-tyyppin puolijohde. Puolijohteet on kytketty siten, että ne ovat sähköisesti sarjaankytketyt ja termisesti rinnankytketyt kuvan 1 mukaisesti. Tällöin samansuuruinen virta kulkee kummankin puolijohteen läpi ja lämpötilagradientti kunkin puolijohteen yli on yhtä suuri. Puolijohteiden liitoksissa tapahtuu jäähtymistä ja lämpenemistä, kun elementtiin kytketään jännite. Elementti kasataan siten, että jäähtyvät ja lämpenevät liitokset ovat eri puolilla elementtiä. Tällöin on muodostettu lämpöpumppu, jolla voidaan siirtää lämpöä kahden systeemin välillä. Lämmön siirtymisen suunta voidaan vaihtaa syöttävän jännitteen napaisuutta vaihtamalla (da Rosa 2013, s. 176).

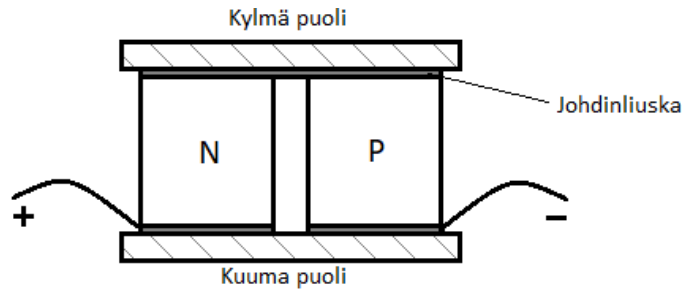
2.1 Seebeckin ja Peltierin ilmiöt

Vuonna 1834 ranskalainen kelloseppä Jean Charles Athanase Peltier havaitsi, että syötettäessä sähkövirtaa kahden eri metallin muodostaman liitoksen läpi liitos joko lämpenee tai viilenee sen mukaan, kumpaan suuntaan virta kulkee liitoksen läpi. Peltier yritti selittää ilmiötä Joulen lailla siinä onnistumatta. Myöhemmin havaittiin, että ilmiö ei liity Joulen lakiin, vaan se on täysin erillinen fysikaalinen ilmiö. Se nimettiin löytäjänsä mukaan Peltierin ilmiöksi. (Beretta et al. 2019, s. 212)

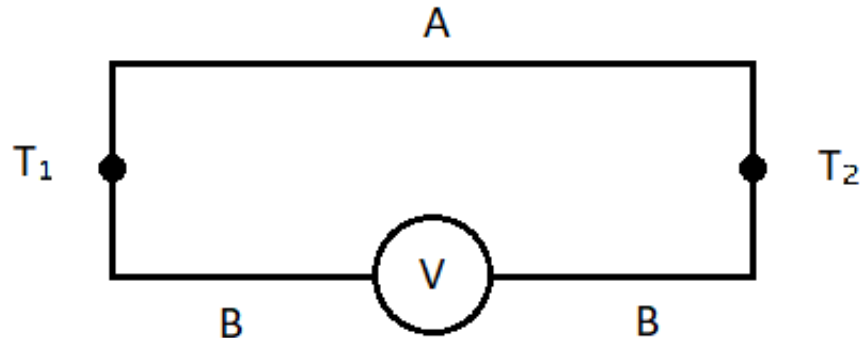
Seebeckin ilmiö löydettiin vuonna 1821. Se voidaan havaita kuvan 2 mukaisella kytkennällä. Siinä eri materiaaleista valmistetut johtimet A ja B liitetään molemmista päistä toisiinsa siten, että muodostuu silmukka. Silmukassa on tällöin kaksi liitosta. Johtimeen B kytketään jännitemittari siten, että silmukan liitosten välinen jännite voidaan mitata. Toista liitosta lämmitettäessä, eli kun lämpötila T_1 on suurempi kuin lämpötila T_2 , jännitemittarista voidaan mitata potentiaaliero. Tämä johtuu johdinmateriaalien erilaisista sähköisistä ominaisuuksista. Ilmiön voimakkuutta kuvataan Seebeckin kertoimella, jota merkitään kreikkalaisella kirjaimella α . Seebeckin kerroin määritellään yhtälöllä

$$\alpha_{pn} = \frac{V}{\Delta T}, \quad (1)$$

missä V on liitoskohtien lämpötilaeron ΔT aiheuttama potentiaaliero johtimien välillä. (Goldsmid 2010, s. 3) Seebeckin kerroin kertoo siis sen, kuinka suuren potentiaalieron 1 K:n lämpötilaero johtimien liitoksissa aiheuttaa johtimien välille.



Kuva 1. Lämpösähköparit on kytketty toisiinsa ohuilla johdinliuskoilla (perustuu Goldsmid 2010, s. 8).



Kuva 2. Kytkeä, jolla voidaan mitata Seebeckin kerroin

Peltierin ilmiön havainnollistamiseksi kuvan 2 kytkentää on muutettava siten, että jännitemittarin tilalle vaihdetaan tasajännitelähde kuvan 3 mukaisesti. Jännitelähteen vaikutuksesta virta I alkaa kiertämään silmukassa. Havaitaan, että johdinliitoksista toinen lämpenee vähemmän kuin toinen. Kuvan 3 mukaisessa kytkennässä siis sähkövirta aiheuttaa lämpötilaeron siten, että $T_1 < T_2$.

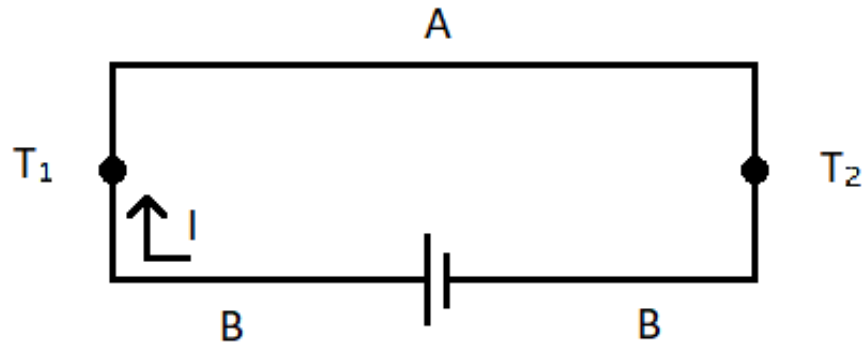
Ilmiön voimakkuutta tietyille johdinmateriaaliparille kuvataan Peltierin kertoimella, jota merkitään kreikkalaisella kirjaimella π . Peltierin kerroin määritellään yhtälöllä

$$\pi_{pn} = \frac{\dot{Q}_P}{I}, \quad (2)$$

missä \dot{Q}_P edustaa liitoksessa tapahtuvan lämpenemisen tai jäähtymisen lämpövirtaa ja I liitoksen läpi kulkevaa virtaa. (da Rosa 2013, s. 190) Peltierin ja Seebeckin kertoimilla on yhteys lämpötilassa T siten, että

$$\pi_{pn} = \alpha_{pn} T \quad (3)$$

(Thomson 1851, Apertet & Goupil 2016, s. 1 mukaan). Tämä tunnetaan myös Kelvinin toisena relaationa.



Kuva 3. Kytkenä, jolla voidaan havainnollistaa Peltierin ilmiö

Teoreettisissa tarkasteluissa on käytännöllisempää, jos Peltierin ja Seebeckin kertoimet voidaan esittää absoluuttisina arvoina. Absoluuttisten arvojen mittaaminen onnistuu suprajohteiden avulla. Kaikilla suprajohteilla on kriittisen lämpötilansa alapuolella nollaresistiivisyys.

Voidaan siis päätellä, että jos yritetään mitata edellä kuvatun koejärjestelyn avulla Seebeckin ilmiön voimakkuutta kahden eri suprajohteen muodostamalle lämpösähköparille, saadaan potentiaalieroksi nolla johtimien päiden välillä. Seebeckin kerroin on siis suprajohtelämpösähköpareille nolla, mikä mahdollistaa niiden käytön referenssijohteena, kun halutaan mitata absoluuttisia Seebeckin arvoja lämpösähkömateriaaleille (Goldsmid 2010, s. 4). Yhtälön (3) perusteella Seebeckin kertoimen ollessa nolla myös Peltierin kerroin on nolla.

Yhtälöissä (1) ja (2) esitetyt kertoimet lämpösähkömateriaalien liitoksille koostuvat materiaalien Seebeckin ja Peltierin kertoimista siten, että $\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$ ja $\pi_{pn} = \pi_p - \pi_n$. N-tyyppin puolijohteelle Seebeckin ja Peltierin kerroin on negatiivinen, joten liitoksen kertoimeksi saadaan materiaalien kertoimien itseisarvojen summa. (Goldsmid 2010, s. 9) Voidaan päätellä, että Seebeckin ja Peltierin ilmiöitä ei esiinny tai ne vaikuttavat heikosti, jos liitoksen molemmilla materiaaleilla on positiivinen tai negatiivinen Seebeckin ja Peltierin kerroin. Voimakkaimmillaan ilmiöt ovat silloin, kun materiaalien Seebeckin ja Peltierin kertoimet ovat itseisarvoltaan suuret, mutta vastakkaismerkkiset (da Rosa 2013, s. 187).

2.2 Lämpösähköelementin matemaattinen mallinnus

Seuraavaksi tarkastellaan lämmönsiirtoa lämpösähköelementin yhdessä lämpösähkömateriaaliparissa (engl. thermocouple) stationäärissä eli ajasta riippumattomassa tilanteessa. Saadut tulokset ovat yleistettävissä mielivaltaiselle

määrälle lämpösähkötalipareja, jotka on kytketty sähköisesti sarjaan ja termisesti rinnan. Näin voidaan määrittää kokonaisen lämpösähkötaliparin ominaisuudet.

Lämpösähkötaliparin läpi siirtyy lämpöä johtumalla. Tarkastellaan johtumista ainoastaan taliparin pintaan nähden kohtisuorassa suunnassa. Taliparin lämmönjohtavuutta kuvataan taliparille ominaisella vakiolla k . Lämmönjohtavuuden yksikkönä käytetään tässä $\frac{W}{m \cdot K}$. Lämpösähkötaliparin n- ja p-taliparin puolijohdetaliparit johtavat lämpöä eri tavalla. Kun tiedetään, että taliparit on kytketty termisesti rinnan, täytyy muodostaa molemmille taliparille johtumisvastukset erikseen. Levymäisen taliparin lämmönjohtumisvastusta kuvataan yhtälöllä

$$R_t = \frac{L}{kA}, \quad (4)$$

missä A on taliparin poikkileikkauksen pinta-ala kohtisuoraan lämmönjohtumista vastaan ja L on taliparin paksuus lämmönjohtumisen suunnassa.

Lämpösähkötaliparissa on ikään kuin kaksi lämmönjohtumisvastusta rinnankytkettyinä, joten kokonaisvastus saadaan ottamalla käänteisluku taliparin johtumisvastusten käänteislukujen summasta seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$R_{t,kok} = \frac{1}{\frac{1}{R_{tp}} + \frac{1}{R_{tn}}}. \quad (5)$$

Lämpösähkötaliparin läpi johtumalla siirtyvä lämpövirta saadaan jakamalla sen liitosten välinen lämpötilaero lämmönjohtumisen kokonaisvastuksella $R_{t,kok}$:

$$\dot{Q}_j = \frac{T_2 - T_1}{R_{t,kok}}. \quad (6)$$

Lämpösähkötaliparin läpi kulkeva virta aiheuttaa lämpenemistä kun se kohtaa resistanssia. Tämä resistanssi voidaan kuvata taliparin resistiivisyydellä siten, että

$$R_s = \frac{\rho L}{A}, \quad (7)$$

missä R on taliparin resistanssi ja ρ on taliparin resistiivisyys. Resistiivisyys on jokaiselle taliparille ominainen vakio ja se riippuu lämpötilasta siten, että resistiivisyys kasvaa, kun lämpötila kasvaa. Joulen laki sähköenergian muuttumisesta lämpöenergiaksi taliparin resistanssin vuoksi voidaan kuvata yhtälöllä $P = RI^2$, missä P on generoituva lämpöteho. Tästä lämpötehosta puolet siirtyy johtumalla jäähdytettävään kohteeseen ja loput siirtyy johtumalla jäähdytyslevyyn (Goldsmid 2010

s. 9). N- ja p-tyyppin puolijohteet ovat sarjaankytketyt ja niiden yhdistetty vastus kuvataan niiden vastusten summalla eli $R_{s,kok} = R_{sp} + R_{sn}$. Tällöin saadaan sähkövirran generoimaksi lämpötehoksi, joka siirtyy jäähdytettävään kohteeseen lämpösähkömateriaaliparista

$$P = \frac{I^2}{2} R_{s,kok}. \quad (8)$$

Peltierin ilmiön aiheuttama jäähtyminen lämpösähkömateriaaliparin liitoksessa kuvataan yhtälöllä

$$\dot{Q}_P = (\pi_p - \pi_n)I. \quad (9)$$

Sijoitetaan yhtälö (3) yhtälöön (9), jolloin yhtälö (9) saadaan muotoon

$$\dot{Q}_P = (\alpha_p - \alpha_n)IT. \quad (10)$$

Tämä muoto yhtälöstä on mallinnuksen kannalta parempi kuin yhtälö (9), koska materiaalin Seebeckin kerroin on helpompi määrittää kuin Peltierin kerroin (Goldsmid 2010, s. 4).

Peltierin ilmiö aiheuttaa lämmön siirtymisen jäähdytettävästä kohteesta lämpösähkömateriaaliparin yli lämpönieluun. Toisaalta lämpötilaero lämpösähkömateriaaliparin eri puolilla aiheuttaa lämmönjohtumisen lämpönielusta jäähdytettävään kohteeseen. Joulen lain mukainen lämpeneminen aiheuttaa myös lämmön siirtymistä jäähdytettävään kohteeseen. Lämpösähkömateriaaliparin tuottama jäähdysteho voidaan ilmaista yhtälön muodossa siten, että

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_P - \dot{Q}_j - P. \quad (11)$$

Sijoitetaan yhtälöön (11) edellä johdetut tulokset yhtälöistä (6), (8) ja (10). Tällöin N kappaletta lämpösähkömateriaalipareja sisältävä lämpösähköelementti siirtää lämpövirtaa seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$\dot{Q}_e = N \left[(\alpha_p - \alpha_n)IT_1 - \frac{T_2 - T_1}{R_{t,kok}} - \frac{I^2}{2} R_{s,kok} \right]. \quad (12)$$

Yhtälössä (12) lämpötilat pitää valita siten, että T_1 on elementin kylmän puolen ja T_2 elementin kuuman puolen lämpötila. Yhtälön (12) todentama jäähdytettävästä kohteesta poistettu lämpö saadaan aikaan kuluttamalla sähkötehoa, jonka määrää N :lle lämpösähkömateriaaliparille kuvaa yhtälö

$$W = N[(\alpha_p - \alpha_n)I(T_2 - T_1) + R_{s,kok}I^2]. \quad (13)$$

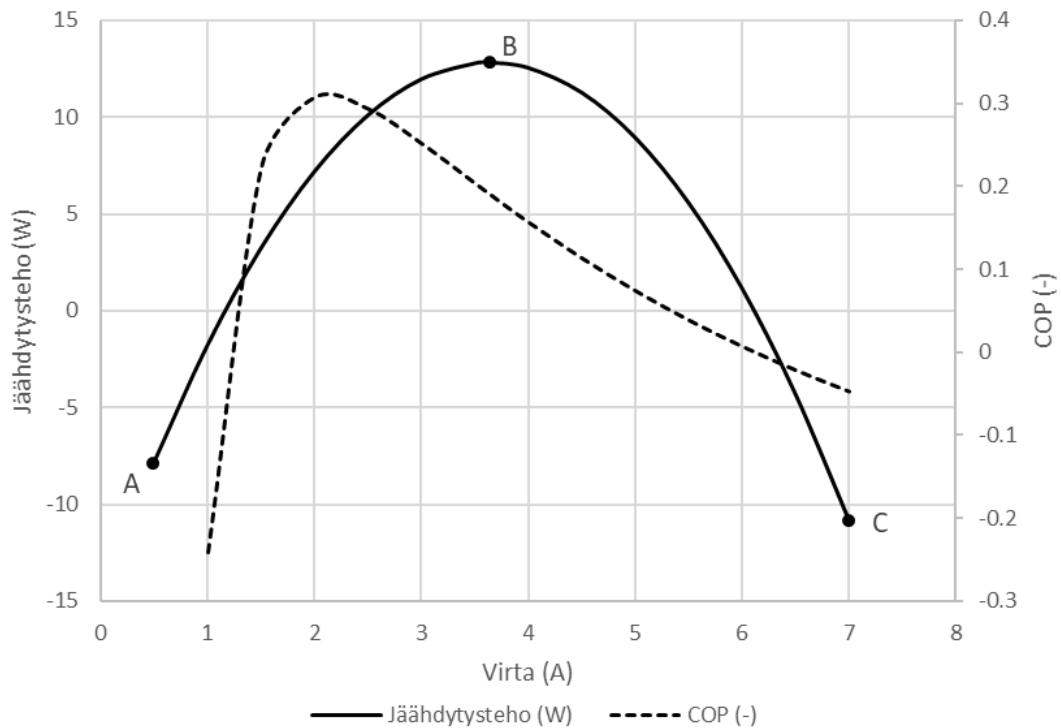
Yhtälön (13) oikealla puolella ensimmäinen termi kuvaa tehoa, joka kuluu Seebeckin ilmiöstä aiheutuvan, syöttävälle jännitteelle vastakkaismerkkisen jännitteen voittamiseen. Toinen termi yhtälössä kuvaa materiaalien resistiivisyyksistä aiheutuvaa häviötä. Jäähdytyksen tehokerroin COP_R (coefficient of performance) määritellään jäähdytystehon ja kulutetun sähkötehon suhteena siten, että

$$COP_R = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)IT_1 - \frac{T_2 - T_1}{R_{t,kok}} - \frac{I^2}{2}R_{s,kok}}{(\alpha_p - \alpha_n)I(T_2 - T_1) + R_{s,kok}I^2}. \quad (14)$$

Jäähdytyksen tehokerroin kuvaa sitä, kuinka monta yksikköä lämpöä siirtyy, kun kulutetaan yksi yksikkö sähköä. Kuvassa 4 on hahmoteltuna lämpösähköelementin siirtämä lämpö ja jäähdytyksen tehokerroin elementin sähkövirran funktiona. Kuvaajat on muodostettu käyttäen esimerkkiarvoja. (da Rosa 2013 s. 177) Lähtöarvoissa on huomioitu elementin sisältämien lämpösähköparien lukumäärä N . Jäähdytysteho on laskettu kaavalla (12) ja tehokerroin kaavalla (14).

Nähdään, että pienillä sähkövirran arvoilla, kuten pisteessä A, lämpösähköelementin jäähdytysteho on negatiivinen, eli se lämmitää jäähdytettävää kohdetta. Tämä johtuu siitä, että elementissä Joulen lain mukainen lämpeneminen on suurempaa kuin Peltierin ilmiön mukainen jäähdytys. Kun sähkövirtaa lisätään, jäähdytysteho saavuttaa maksimiarvon pisteessä B. Vielä sähkövirtaa lisättäessä jäähdytysteho kääntyy laskuun, kun kuljetaan käyrällä pistettä C kohti. Tämä johtuu siitä, että yhtälössä (12) Joulen lain mukaista lämpenemistä kuvaava termi riippuu sähkövirran toisesta potenssista, mutta Peltierin ilmiön mukainen jäähdytysteho riippuu vain sähkövirran ensimmäisestä potenssista. B-pisteen sähkövirtaa suuremmilla sähkövirran arvoilla Joulen lain termi yhtälössä (12) kasvaa nopeammin kuin Peltierin ilmiön termi. (Goldsmid 2010, s. 9) Sähkövirran kasvattaminen ei siis lisää jäähdytystehoa rajattomasti.

Kuvasta 4 huomataan myös, että paras jäähdytyksen tehokerroin saavutetaan pienemmällä sähkövirran arvolla kuin maksimijäähdytysteho. Kyseisen elementin tehokerroin laskee noin 0,1:llä kun sähkövirtaa lisätään optimitehokertoimen tilasta maksimijäähdytystehon virran arvoon. Mitoitettaessa elementtiä jäähdytettävään kohteeseen elementin koon valinnalla on vaikutusta kustannuksiin. Pienitehoisella elementillä on virrasta aiheutuvat suuremmat käyttökustannukset, mutta pienemmät hankintakustannukset. Suurempi elementti maksaa enemmän, mutta sitä voidaan käyttää pienemmällä virralla. (da Rosa 2013, s. 180)



Kuva 4. Elementin jäähdytystehon ja tehokertoimen tyypillinen käyttäytyminen sähkövirran funktiona. Elementin lämpösähkömateriaalien Seebeckin kerroimien erotus on 0,055 V/K, kokonaisresistanssi on 4,2 Ω , terminen resistanssi 0,25 W/K, kylmän puolen lämpötila 338 K ja kuuman puolen lämpötila 278 K (perustuu da Rosa 2013, s. 178).

Lämpösähköelementin ominaisuuksia tutkittaessa on kiinnostavaa tietää, millä sähkövirran arvolla elementti tuottaa maksimijäähdytystehon. Kuvassa 4 pisteen B x-koordinaatti saadaan siis hakemalla derivaattafunktion nollakohta yhtälölle (12). Maksimijäähdytystehon vaatima sähkövirta määritellään siten, että

$$I = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)T_1}{R_{s,kok}}. \quad (15)$$

Eliminoidaan yhtälöstä (14) sähkövirta I yhtälön (15) avulla ja saadaan jäähdytyksen tehokerroin siinä tilanteessa, kun sähkövirta tuottaa optimaalisen jäähdytystehon.

$$COP_{MAX} = \frac{\frac{1}{2}T_1^2 Z - (T_2 - T_1)}{T_1 T_2 Z}, \quad (16)$$

missä Z on lämpösähkömateriaaliparin laatuluku (engl. figure of merit), joka määritellään aineominaisuuksien avulla siten, että

$$Z = \frac{R_{t,kok}(\alpha_p - \alpha_n)^2}{R_{s,kok}}. \quad (17)$$

Yhtälöä (17) voidaan käyttää lämpösähkötaliparin lämpösähköisten ominaisuuksien arviointiin (da Rosa 2013, s. 159). Sen yksikkö on $\frac{1}{K}$, mutta yleisempää on käyttää dimensiotonta laatulukua ZT , joka saadaan kertomalla laatuluku lämpösähkötaliparin liitoksen lämpötilalla (Goldsmid 2010, s. 10). Näin saatu luku kuvaa lämpösähkötaliparin lämpösähköisiä ominaisuuksia tietyssä lämpötilassa. Z ja COP_{MAX} ovat suoraan verrannolliset, joten hyvän tehokertoimen omaavan liitoksen lämpösähkötalipaaleilla on suuret, mutta vastakkaismerkkiset Seebeckin kertoimet, suuret lämmönjohtumisvastukset sekä pienet resistanssit.

2.3 Lämpönielu

Lämpösähkötaliparissa lämpösähkötalipari toimii lämpöpumpuna, joka siirtää lämpöä elementin kylmältä puolelta lämpimälle puolelle. Lämpimältä puolelta lämpö siirtyy joko suoraan tai lämpönielun kautta ympäristöön. Lämpönielu voi olla esimerkiksi rivasto, mutta myös lämpöputkea tai suljettuun fluidin kiertoon perustuvia lämmönsiirtimiä voidaan käyttää.

Konvektiolla tarkoitetaan sellaista lämmönsiirtoa kahden aineen välillä, jossa aineilla on toisiinsa nähden suhteellista nopeutta (Tong 2011 s. 31). Lämmönsiirtoa lämpönielun ja ympäristön välillä kuvaa konvektiivinen lämmönsiirtovastus, joka määritellään yhtälöllä

$$H = \frac{1}{hA}, \quad (18)$$

missä h kuvaa tilanteesta riippuvaa konvektiivista lämmönsiirtokerrointa. Konvektiivisen lämmönsiirtovastuksen yksikkö on $\frac{K}{W}$. Yksikkö on sama kuin lämmönsiirron johtumisvastuksella, mikä helpottaa laskentaa. Konvektion voidaan ajatella olevan lämmönsiirtovastus, joka on tässä tapauksessa termisesti sarjaankytketty elementin ja lämpönielun lämmönjohtumisvastuksien kanssa. Lämpönielusta ympäristöön siirtyvä lämpövirta saadaan, kun jaetaan lämpönielun ja ympäristön välinen lämpötilaero konvektiivisella lämmönsiirtovastuksella seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$\dot{Q}_l = hA(T_3 - T_\infty). \quad (19)$$

Yhtälössä (19) T_3 ja T_∞ edustavat lämpönielun ja ympäristön lämpötiloja.

Lämmönsiirtyminen lämpönielusta ympäristöön tapahtuu yksinkertaisimmillaan luonnollisella konvektiolla. Luonnollinen konvektio tarkoittaa lämmönsiirtoa, jossa lämpönielu lämmittää lähellään olevaa ilmaa ja ilmaan syntyy tiheyseroja. Lämmin ilma on harvempaa kuin viileä ilma, joten elementin lämpimän puolen läheisyyteen syntyy virtaus, joka

pyrkii tasoittamaan ilman tiheyseroja. Virtauksen mukana lämpö siirtyy luonnollisin keinoin ympäristöön.

Luonnollinen konvektio soveltuu lämmönsiirtokeinoon passiivisiin jäähdytysjärjestelmiin. Passiivisilla jäähdytysjärjestelmillä tarkoitetaan järjestelmiä, joiden käyttäminen ei vaadi energiaa, vaan lämpö siirtyy systeemissä olevan lämpötilagradientin vaikutuksesta. Tyypillisiä luonnollista konvektiota hyödyntäviä lämpönieluja ovat alumiinista tai kuparista valmistetut levyt, jotka kasvattavat jäähdytettävän kohteen lämmönsiirtopinta-alaa ympäristön kanssa. (Tong 2011 s. 11)

Pakotettu konvektio eroaa luonnollisesta konvektiosta siinä, että pakotetussa konvektiossa väliaineen, esimerkiksi ilman, virtaus on aiheutettu kompressorilla tai tuulettimella. Väliaineen tilavuusvirta lämpönielun ohi on suurempi kuin luonnollisen konvektion tapauksessa. Tällöin lämmön siirtyminen lämpönielusta ympäristöön on tehokkaampaa. Pakotettua konvektiota käytetään pääasiassa aktiivisissa jäähdytysjärjestelmissä (Tong 2011 s. 31). Aktiivisella jäähdytysjärjestelmällä tarkoitetaan sellaista järjestelmää, joka käyttää energiaa jäähdyttämiseen.

Lämpönielun mitoittaminen oikein on tärkeää jäähdytystehon kannalta. Jos lämpönielu ei kykene siirtämään lämpöä lämpösähköelementistä ympäristöön tarpeeksi tehokkaasti eli lämpönielun konvektiivinen lämmönsiirtovastus H on suuri, lämpönielun lämpötila nousee. Tällöin myös lämpösähköelementin lämpimän puolen lämpötila nousee. Yhtälöstä (12) nähdään, että jos lämpösähköelementin lämpimän puolen lämpötila T_2 nousee, elementin kylmän puolen lämpötila T_1 nousee, jos sähkövirran I suuruutta ei kasvateta. Kylmän puolen lämpötilan nousun seurauksena myös jäähdytettävän kohteen lämpötila nousee. Kasvattamalla sähkövirran suuruutta T_1 saadaan pidettyä vakiona, mutta tällöin elementin tehokerroin laskee.

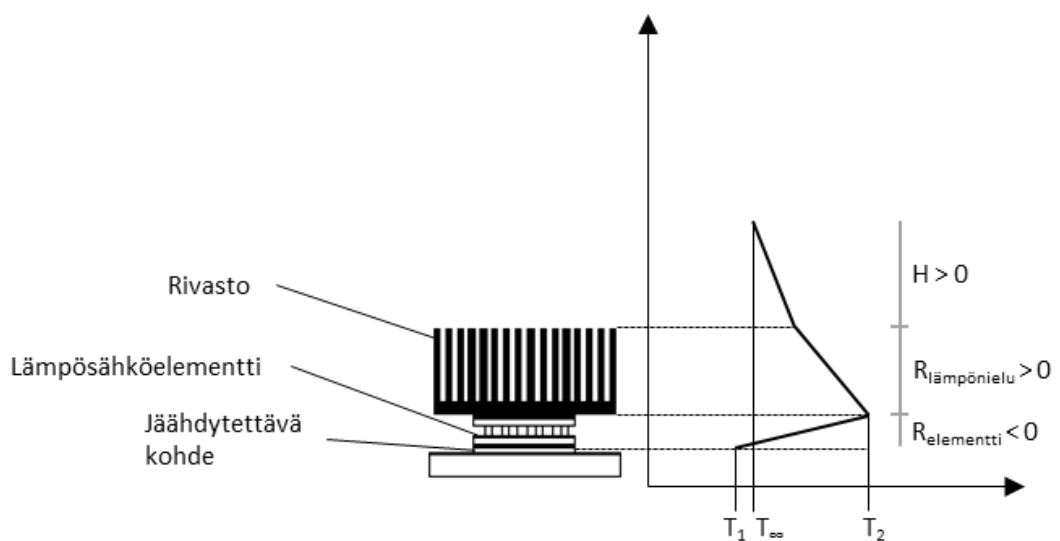
Lämpönielun lämmönsiirtotehokkuuden vaikutus koko jäähdytysjärjestelmän tehokertoimeen on merkittävä. Lämpönielun lämmönsiirtotehokkuutta parantamalla voidaan vaikuttaa lämpösähköelementin jäähdytystehoon ja tehokertoimeen. Esimerkiksi lämpösähköelementin tehokerroin voi olla ideaalitalanteessa 1,3, mutta alumiinista valmistettuun rivastoon kytkettynä pakotetulla konvektiolla tehokerroin laskee arvoon 0,4 samassa lämpötilassa. Ideaalitalanteella tarkoitetaan tässä tilannetta, jossa lämpönielun lämmönsiirtovastus on nolla ja vain elementin ominaisuudet vaikuttavat. Suljettuun fluidin kiertoon perustuvaa lämmönsiirintä käytettäessä tehokertoimen arvo on 0,8. (Attey 1998) Lämpöputken käyttämisen lämpönieluna on osoitettu nostavan lämpösähköelementin tehokertoimta 0,1:llä ja parantavan jäähdytystehoa 53 % verrattuna siihen, että lämpö siirtyisi suoraan elementin kuumalta puolelta ympäristöön. Parannus saavutettiin

4 lämpöputken avulla, joiden yhteistilavuus oli 400-kertainen verrattuna lämpösähköelementin tilavuuteen. (Liang et al. 2019) Vastaavia tehokertoimen parannuksia voi olla haasteellista saavuttaa laitteissa, joissa jäähdytysjärjestelmälle on vähän tilaa.

2.4 Lämpösähköelementti osana jäähdytysjärjestelmää

Lämpösähköelementtijäähdytyksessä esiintyviä termisiä resistansseja ovat elementin terminen resistanssi, lämpönielun johtumisvastus, lämpönielun ja ympäristön välinen konvektiivinen vastus sekä johtumisvastukset väliaineista, joilla lämpösähköelementti kiinnitetään jäähdytettävään kohteeseen ja lämpönieluun (Lienig & Bruemmer 2017, s. 116). Kuvassa 5 on havainnollistettu lämpötilan muutosta ja termisiä resistansseja jäähdytysjärjestelmän rakenteessa. Kuvasta huomataan, että lämmön siirtymisen suunnassa tarkasteltuna lämpötila lämpösähköelementin yli kasvaa. Yhtälöstä (6) nähdään, että lämpötehon \dot{Q} siirtymisen suunnassa, jossa siis \dot{Q} on positiivinen, lämpötilojen erotuksen ollessa negatiivinen termisen resistanssin yli, terminen resistanssi $R_{t,kok}$ on myös negatiivinen. Lämpösähköelementti on siis lämmönsiirron kannalta jäähdytysjärjestelmän termistä resistanssia pienentävä komponentti. Lämpönielun terminen resistanssi sisältää sekä lämmönjohtumisvastuksen, että konvektiivisen lämmönsiirtovastuksen.

Kuvan 5 esittämää periaatetta termisten resistanssien sarjaankytkennästä voidaan käyttää apuna jäähdytysjärjestelmää mitoitettaessa. Jäähdytysjärjestelmän kokonaisresistanssi saadaan laskemalla yhteen osaresistanssit. Jäähdytettävän kohteen luovutettava lämpöteho voidaan arvioida yhtä suureksi kuin sen sähköteho. Kun tiedetään



Kuva 5. Yksinkertainen lämpösähköelementillä toteutettu jäähdytysjärjestelmä. Lämpötilagradientti lämpösähköelementin yli on negatiivinen (perustuu Bachmann et al. 2007, s. 93).

kokonaisresistanssi ja kohteen luovuttama lämpöteho, voidaan laskea kaavan (6) periaatteen avulla, kuinka paljon korkeampi kohteen lämpötila tulee olemaan ympäristön lämpötilaan nähden. Ohjesääntönä voidaan pitää maksimilämpötiloja germaniumista valmistetuille komponenteille 60—100 °C ja piistä valmistetuille komponenteille 125—200 °C. (Lienig & Bruemmer 2017, s. 115—116)

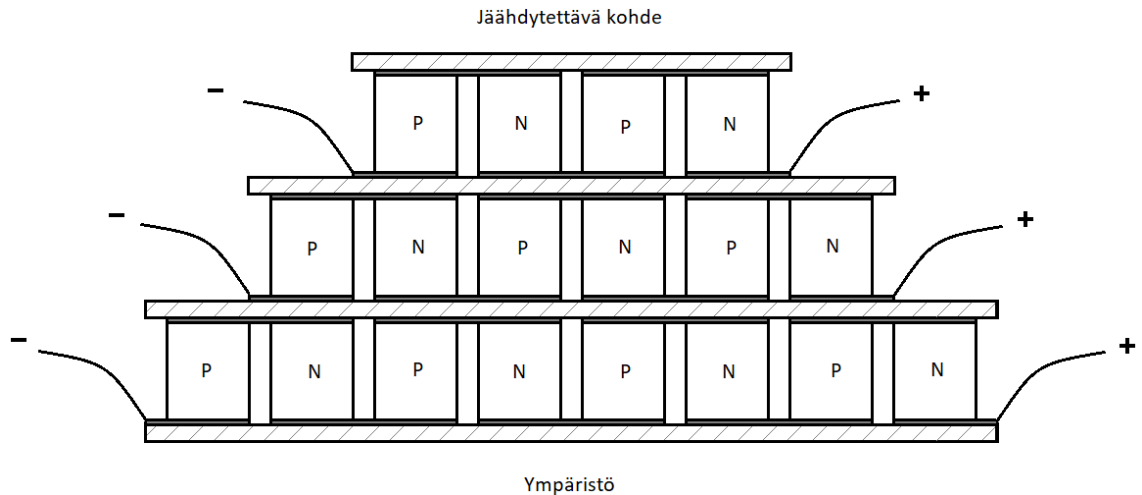
3. LÄMPÖSÄHKÖELEMENTIN RAKENNE JA MATERIAALIT

Lämpösähköelementtien käyttöalue on hyvin laaja, sillä niiden käyttökohteiden tarvitsemat jäähdytystehot vaihtelevat sadoista milliwateista kilowattiin (Pichanusakorn & Bandaru 2010). Lämpösähköelementtijäähdytyksen modulaarisuus mahdollistaa laajan käyttöalueen. Elementin teho ja koko kasvavat, kun sen sisältämien lämpösähkömateriaaliparien määrä kasvaa. Tyypillisesti lämpösähköelementtien koot vaihtelevat välillä 2 mm × 2 mm—62 mm × 62 mm ja korkeus 3 mm—16 mm (Laird thermal systems). Pienistä elementeistä voidaan valmistaa jäähdytystehotarpeen täyttävä kokonaisuus asentamalla niitä vierekkäin jäähdytettävään kohteeseen. Jos yksi elementti ei jäähdytä kohdetta tarpeeksi matalaan lämpötilaan, elementtejä voidaan pinota päällekkäin eli muodostaa kaskadikytkentä. Kaskadielementin kylmän ja kuuman puolen lämpötilaero voi olla kaupallisella elementillä 131 °C ja tavallisen yksikerroselementin 70 °C. Lämpötilansäätö on mahdollista 0,01 °C:n tarkkuudella (Laird thermal systems).

Lämpösähköelementin asennuksessa käytetään väliaineita, joilla elementti kiinnitetään jäähdytettävään kohteeseen ja lämpönieluun. Oikean väliaineen käyttö pidentää elementin käyttöikää ja mahdollistaa paremman lämmönsiirron. Lämpösähkömateriaalitutkimuksen avulla voidaan löytää energianmuuntotehokkuudeltaan paras materiaali tietylle käyttölämpötilalle.

3.1 Kaskadikytkentä

Lämpösähköelementtien kaskadikytkennässä on kaksi tai useampia elementtejä kytketty termisesti sarjaan kuvan 6 osoittamalla tavalla. Jäähdyttävä elementti siirtää lämpöä normaalisti kylmältä puolelta lämpimälle puolelle, mutta lämpönielun sijaan elementin lämpimälle puolelle on kytketty toisen elementin kylmä puoli. Systeemi täytyy suunnitella siten, että lämmön siirtymisen suunnassa elementtien jäähdytysteho kasvaa. Näin on tehtävä siksi, että jokainen elementti tuottaa lämpöä Joulen lain mukaisesti ja tästä lämmöstä puolet siirtyy seuraavan elementin siirrettäväksi. Kuten jo yhtälössä (12) todettiin, elementin siirtämä lämpövirta on suoraan verrannollinen sen sisältämien lämpösähkömateriaaliparien lukumäärään. Tämä lukumäärä vaikuttaa suoraan elementin kokoon. Seurauksena on pyramidin muotoinen rakenne, jossa pyramidin huipulla oleva elementti kytketään jäähdytettävään kohteeseen.



Kuva 6. Kolmikerroksisen kaskadikytkennällä toteutetun lämpösähköelementin kerrokset ovat sähköisesti eristettyjä toisistaan. Viivoitettu alue kuvaa tätä eristystä, jolla kuitenkin on hyvä lämmönjohtavuus. (perustuu Goldsmid 2010 s. 16)

Kaskadikytkennällä saavutetaan tiettyjä etuja. Kun asiaa tarkastellaan yhden elementin kannalta, huomataan, että rakenteessa seuraava elementti jäähdyttää edellisen elementin kuumaa puolta. Tällöin yhtälön (12) mukaan elementin siirtämä lämpövirta nousee, kun sen kuuman puolen lämpötilaa lasketaan ja oletetaan aineominaisuudet, sähkövirta ja kylmän puolen lämpötila vakioiksi. Toisaalta suurempi jäähdytysteho tarkoittaa tasapainotilanteessa matalampaa kylmän puolen lämpötilaa verrattuna yksittäisen elementin jäähdytykseen. Kaskadikytkentää voidaan siis käyttää suuremman jäähdytystehon tai matalamman lämpötilan saavuttamiseen verrattuna yhden elementin systeemiin, kun sähkövirran suuruus ja aineominaisuudet ovat vakioita.

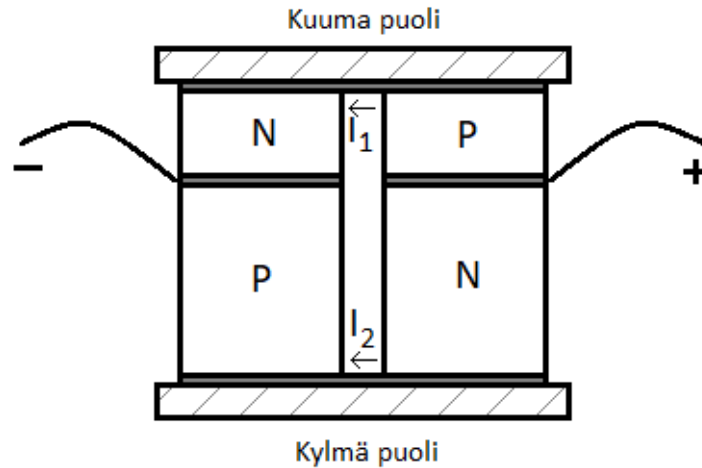
Kaskadikytkentä vaatii saman kokoista yksittäistä lämpösähköelementtiä enemmän sähkötehoa, koska kaskadikytkennässä on suurempi sähköinen resistanssi. Kaskadikytkennän yhden elementin kannalta vaadittava teho on kuitenkin pienempi kuin yksittäisen elementin tapauksessa, koska saman jäähdytystehon aikaansaamiseksi riittää pienempi sähkövirta. Yhtälöstä (13) nähdään, että mitä pienempi lämpötilaero elementin eri puolilla on, sitä pienempi teho kuluu Seebeckin ilmiön aiheuttaman vastajännitteen voittamiseen.

Tutkimuksessa, jossa on vertailtu muun muassa yhtä lämpösähköelementtiä ja kahden elementin kaskadikytkentää, esitetyistä tuloksista voidaan päätellä, että kaskadikytkentää kannattaa käyttää silloin, kun halutaan saada jäähdytettävän kohteen lämpötila alle ympäristön lämpötilan (Liang et al. 2019, s. 265). Kun jäähdytettävän kohteen lämpötila nousee korkeammaksi kuin ympäristön lämpötila, kannattaa käyttää yhden elementin ratkaisua, koska sillä on suurempi tehokerroin. Tutkimuksessa ei

pohdita syitä tälle ilmiölle, mutta selitys on helppo päätellä. Kaskadikytkentäisen elementin yhden kerroksen yli oleva lämpötilagradientti on pienempi kuin yhden yksittäisen elementin yli oleva lämpötilagradientti. Lämpövirta on sama sekä kaskadikytkennän yhdelle elementille, että yksinään toimivalle elementille. Yhtälöstä (12) voidaan päätellä, että tällöin kaskadielementin yksi osa käyttää vähemmän virtaa kuin yksinään toimiva elementti. Pienillä virran arvoilla Joulen lain mukainen lämpeneminen johteessa on hallitsemampi kuin Peltierin ilmiön aiheuttama jäähdytysteho. Tämä tarkoittaa sitä, että kaskadikytkentäisessä elementissä enemmän sähkötehoa kuluu häviöihin kuin yksinään toimivalla elementillä. Tämän takia kaskadikytkentäisen elementin tehokerroin on huonompi pienillä lämpötilaeroilla verrattuna yksinään toimivaan elementtiin. Kaskadikytkennällä varustetun lämpösähköelementin tyypillisiä käyttökohteita ovat infrapunasensorien, CCD-kennojen (Charge-coupled device) ja sähköoptiikan laitteiden jäähdytys (Liang et al. 2019).

Lämpösähköelementtien kaskadikytkentä on mahdollista toteuttaa myös ilman sähköistä eristystä kerrosten välillä kuvan 7 mukaisesti. Elementtiin syötetään virtaa vain yhdestä pisteestä ja virta jakautuu kerrokseen niiden resistanssien suhteessa. Tällaista elementtiä ei tarvitse rakentaa pyramidin muotoon, vaan häviöiden aiheuttama lämpövirta siirryttäessä kerroksesta toiseen saadaan siirrettyä tekemällä seuraavasta kerroksesta edellistä ohuempi. Tämä perustuu siihen, että elementin kerroksen lämmönsiirtokyky on kääntäen verrannollinen kerroksen paksuuteen. (Ma & Yu 2014, s. 354) Yhtälöstä (7) nähdään, että sähköinen resistanssi on suoraan verrannollinen kerroksen paksuuteen. Yhtälöstä (12) nähdään, että jos pienennetään sähköistä resistanssia $R_{s,kok}$, Joulen lain mukainen sähkövirran muuttuminen lämmöksi vähenee ja elementin siirtämä lämpövirta \dot{Q} kasvaa.

Kuvan 7 mukaisella lämpösähköelementtien kaskadikytkennällä on tiettyjä etuja verrattuna kuvassa 6 esitettyyn elementtiin, jossa kerrokset on eristetty toisistaan. Kuvan 7 kaskadikytkentäinen elementti on helpompi valmistaa, koska siinä ei ole eristemateriaaleja kerrosten välillä. Tästä seuraa, että lämpövuotoja ja lämmönjohtumisvastusta kerrosten välillä voidaan vähentää. Kompaktimpi elementin muotoilu mahdollistaa tiheän elementtien asennuksen. (Ma & Yu 2014, s. 354)



Kuva 7. Periaatekuva 2-vaiheisesta lämpösähköelementistä ilman sähköistä eristystä kerrosten välillä. (perustuu Ma & Yu 2014, s. 354)

Edellä kuvatun lämpösähköelementtien kaskadikytkennän ominaisuuksia on tutkittu ja verrattu tavallisen yksikerroksisen lämpösähköelementin ominaisuuksiin (Ma & Yu 2014). Kaksikerroksisella elementillä päästään matalampiin kylmän puolen lämpötiloihinkuin yksikerroksisella elementillä. Lisäksi kaksikerroksisessa elementissä kylmän puolen lämpötila on sitä matalampi, mitä ohuempi ensimmäinen kerros on verrattuna koko elementin paksuuteen. Ensimmäisellä kerroksella tarkoitetaan kuvassa 7 sitä kerrosta, joka siirtää lämmön ympäristöön. Tutkimuksen mukaan suurimman jäädytystehon tuottaa tietyille kylmän puolen lämpötilalle tilanne, jossa ensimmäisen kerroksen paksuus on 10 % koko elementin paksuudesta. Tutkimuksen mittaustuloksista (s. 356) nähdään, että kaksikerroksinen lämpösähköelementti toimii yksikerroksista paremmalla tehokertoimella ja suuremmalla jäädytysteholla riippumatta lämpötiloista. Välillä 50 °C—65 °C elementillä, jossa ensimmäisen kerroksen paksuus oli 30 % koko elementin paksuudesta tehokerroin oli 21—102 % parempi verrattuna yksikerroksiseen elementtiin. Lämpötilaeron ollessa suurempi eli 65 °C tehokertoimissa oli eroa 0,1. Toisin sanoen niilläkin lämpötila-alueilla, joilla yksikerroksinen elementti toimii hyvin, kaksikerroksinen toimii vielä paremmin.

3.2 Väliaineet

Käyttökohteessaan lämpösähköelementti kiinnitetään jäädytettävään kohteeseen ja lämpönieluun väliaineella. Väliaineen on tarkoitus tehostaa lämmönjohtumista kahden kappaleen liitoksessa. Väliaineen hyöty perustuu siihen, että se täyttää yhteenliitettävien pintojen epätasaisuuksia. Ilman väliainetta nämä epätasaiset kohdat täyttyisivät ilmalla, jolla on kaasuseoksena huonompi lämmönjohtavuus kuin kiinteällä väliainemateriaalilla. Tyypillisesti todellinen pinta-ala, jonka kautta pinnat koskettavat toisiaan on 1—2 % siitä pinta-alasta, josta ne on liitetty toisiinsa (Tong 2011, s. 306).

Väliaine on yleensä tahnaa, juotosmetallia tai liimaa. Lämpösähköelementtien asennuksessa voidaan käyttää liimaa tai juotosta, kun kyseisen elementin sivunpituus on enintään 19 mm. Tätä suuremmalle elementille suositellaan lämpötahnaa ja puristusliitosta, koska lämpötahna ei siirrä lämpörasituksia, yhtä tehokkaasti kuin liima ja juottamalla tehty liitos. (Tong 2011, s. 491) Lämpögradieniteista yhteenliitetyissä pinnoissa aiheutuvat lämpörasitukset saattavat aiheuttaa lämpösähköelementtiin vääntäviä voimia, jotka rikkovat elementin.

Suurin osa väliaineista on yhdistelmämaterialleja, joissa pohjana toimii polymeerien seos, johon on lisätty jotain hyvin lämpöä johtavaa materiaalia. Tyypillisiä lämmönjohteita polymeerimateriaaleissa ovat alumiinioksidi, boorinitridi ja alumiininitridi. Polymeeriseos voi olla epoksihartsia, jos halutaan kiinnittää pinnat toisiinsa tai silikonipohjaista ainetta, jos tarvitaan kykyä poistaa lämpörasituksia. Lämmönjohtomateriaali lisätään polymeeriin jauheena, jolloin tuloksena on hyvin pintoihin imeytyvä väliaine, jolla on hyvä lämmönjohtavuus. (Tong 2011, s. 363—364) Tällaisten väliaineiden lämmönjohtavuus on pääasiassa alle 5 W/mK. Metallijuotoksella päästään paljon tätä korkeampiin lämmönjohtavuuksiin. Esimerkiksi puhtaan indiumliitoksen lämmönjohtavuus on 86 W/mK (Tong 2011, s. 314—315).

3.3 Lämpösähkömateriaalit

Hyvät lämpösähkömateriaalit ovat seostettuja puolijohteita. P-typin puolijohde on puhdas puolijohdemateriaali, jota on seostettu akseptoriepäpuhtausatomeilla. Akseptoriatomin elektronirakenne on sellainen, että kun se sitoutuu kovalenttisilla sidoksilla puolijohteen kidehilaan, se sitoo puolijohteen valenssivyöltä elektronin päästäkseen oktettiin eli matalimmalle energiatasolle. Elektronivajeen takia puolijohteen valenssivyölle jää tyhjiä kohtia, joita kutsutaan aukoiksi. Aukot ovat apukäsite elektronivajeen mallintamiseen ja ne voivat liikkua vapaasti puolijohdemateriaalin valenssivyöllä.

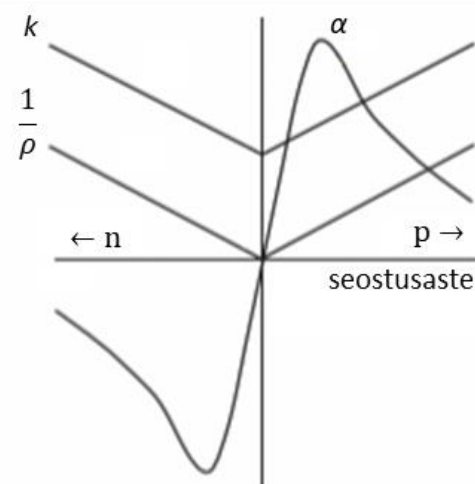
N-typin puolijohde on puhdas puolijohdemateriaali, jota on seostettu donoriepäpuhtausatomeilla. Donoriatomien ulkoelektronirakenne on sellainen, että kun se sitoutuu kovalenttisilla sidoksilla puolijohteen kidehilaan, se luovuttaa samalla ylimääräisen ulkoelektronin puolijohteen kidehilaan johtavuusvyölle. Johtavuusvyöllä elektronit pääsevät liikkumaan vapaasti puolijohdemateriaalissa.

Lämpösähköelementissä sähkökenttä saa elektronit liikkumaan. Lämpösähköelementin lämpimällä puolella lämpenevissä puolijohdeliitoksissa elektronit siirtyvät matalammalle energiatasolle ja luovuttavat osan energiastaan lämpönä. Vastaavasti kylmällä puolella kylmenevissä liitoksissa elektronit siirtyvät korkeamman energian tilaan ja ottavat

siirtymiseen tarvittavan energian ympäristöstään, jolloin liitos kylmenee. (Goldsmid 2010, s. 2)

Kuvassa 8 on esitetty, miten puhtaan puolijohteen sähkönjohtavuus $\frac{1}{\rho}$, lämmönjohtavuus k ja Seebeckin kerroin α muuttuvat puolijohteen seostusasteen muuttuessa. Nähdään, että puhtaalle puolijohteelle sähkönjohtavuus on nolla, eli se on eriste. Tällöin puolijoh-teessa ei ole vapaita varauksenkuljettajia, eikä siihen silloin voi syntyä potentiaalieroja. Siksi myös Seebeckin kerroin on nolla. Seostusasteen kasvaessa varauksenkuljettajien määrä kasvaa, jolloin Seebeckin kertoimen itseisarvo kasvaa ja saavuttaa huippuarvonsa. Seostusastetta edelleen kasvattamalla Seebeckin kertoimen itseisarvo pienenee, sähkönjohtavuus kasvaa lisääntyneiden varauksenkuljettajien myötä, mutta myös lämmönjohtavuus kasvaa, mikä heikentää termistä resistanssia ja materiaalin laatulu-kua, kuten yhtälöstä (17) voidaan nähdä.

Bulkki-vismuttiteluurille tehdyn herkkyytarkastelun perusteella Seebeckin kertoimella on noin 5-kertainen ja resistanssilla 4,3-kertainen vaikutus jäähtytyksen tehokkuuteen suhteessa lämmönjohtavuuden vaikutukseen tyypillisillä elektroniikan lämpövirrantiheyden suuruuksilla (40—150 W/cm²). Superkiteiselle vismutteluurille vastaavat luvut ovat 6 Seebeckin kertoimelle ja noin 4 resistanssille. (Harsha Choday & Roy 2013) Tämä osoittaa sen, että jäähdystehokkuuden kannalta ei lämmönjohtavuudella ole niin suurta merkitystä kuin Seebeckin kertoimella ja sähköisellä resistanssilla.



Kuva 8. Seebeckin kerroin puhtaalle puolijohdemateriaalille on nolla, mutta sen itseisarvo kasvaa nopeasti huippuarvoonsa seostusasteen kasvaessa (muokattu lähteestä da Rosa 2013, s. 168).

Luvussa 2.2 todettiin yhtälön (17) perusteella, että hyvällä lämpösähkämateriaalilla on suuri Seebeckin kertoimen itseisarvo, pieni sähköinen resistanssi ja suuri terminen resistanssi. Laatuluvun kasvattamisessa on kuitenkin haasteita liittyen siihen, miten materiaalin eri ominaisuudet kytkeytyvät toisiinsa. Sähköisen resistanssin eli materiaalin resistiivisyyden pienentäminen johtaa yleensä Seebeckin kertoimen pientymiseen ja lämmönjohtavuuden kasvamiseen (Qiao et al. 2019).

Elektroniikan sovelluskohteissa lämpösähkoelementit toimivat 60—200 °C:n lämpötiloissa komponentista riippuen (Lienig & Bruemmer 2017, s. 115—116). Elementtien valmistusmateriaaleina käytetään sellaisia lämpösähkämateriaaleja, joilla on mahdollisimman korkea ZT :n arvo kyseessä olevalla lämpötilavälillä. Lämpösähkötäydähdyksessä yksi käyttökelpoisimmista materiaaleista on vismuttiteelluuri (Bi_2Te_3) koska sen ZT :n arvo on korkeampi kuin muilla lämpösähkämateriaaleilla huoneen lämpötilasta 200 °C:een asti (Freer & Powell, 2020).

Vismuttiteelluurin metalliseoksilla on päästy ZT :n arvoihin 1.4 p-tyyppin ja 1.2 n-tyyppin bulkkimateriaalille 300 K:n lämpötilassa (Yamashita & Tomiyoshi 2004). Vismuttiteelluurin kehitys painottuu nykyään kolmeen pääkohtaan: nanomateriaalit, seostus ja valmistusmenetelmät (Chen et al. 2018). Nanorakenteisia materiaaleja ovat esimerkiksi superkiderakenteiset materiaalit, nanojohtimet ja nanokomposiitit (Harsha Chodary & Roy 2013).

Ohutkalvo on nimensä mukaisesti ohut kerros materiaalia, joka voidaan valmistaa sputteroinnilla eli eräänlaisella suihkutustekniikalla alustan päälle. Bulkkimateriaali valmistetaan sen sijaan yleensä sintraamalla jauhetusta materiaalista. Ohutkalvojen valmistustekniikan etu on se, että sillä voidaan tarkemmin vaikuttaa materiaalin kiderakenteeseen ja myös seostaa metalliseoksia, joita ei ole bulkkimateriaalina mahdollista valmistaa. (Adachi & Wasa 2012)

Ohutkalvotekniikkaa pidetään lämpösähkämateriaalien kehityssuuntana, mutta sitä on tutkittu vasta vähän verrattuna siihen, miten kauan bulkkimateriaaleja on tutkittu. Haasteina ohutkalvomateriaalien valmistuksessa on se, että tasalaatuista ja skaalautuvaa valmistusta ei ole kehitetty tarpeeksi. (DeLong et al. 2020) Ohutkalvotekniikalla on kuitenkin saavutettu lupaavia tuloksia. Vismuttiteelluuri-ohutkalvomateriaalilla on päästy 300 K:n lämpötilassa ZT :n arvoon 2.4 materiaalin lämmönjohtavuutta pienentämällä (Venkatasubramanian et al. 2001).

4. LÄMPÖSÄHKÖELEMENTIN KÄYTTÖ

Elektroniikkalaitteiden lämpökuormista aiheutuu sähköisiä häviöitä komponenteissa ja piireissä, sillä aineen lämpötilan kasvu kasvattaa resistiivisyyttä, mikä edelleen kasvattaa resistanssia yhtälön (7) mukaisesti. Sähköisten häviöiden lisääntyminen tarkoittaa laitteiston suorituskyvyn heikkenemistä. Suurentuneet lämpövirrantiheydet aiheuttavat myös kuumia kohtia (engl. hotspot) elektroniikkakomponentteihin. Komponentin kuumassa kohdassa tapahtuu paljon toimintoja yhtäaikaaisesti ja se käyttää paljon sähkövirtaa. Tällainen kohta voi olla esimerkiksi tietokoneen prosessorin ydin. Kuumassa kohdassa lämpövirrantiheys voi olla $300 \frac{W}{cm^2}$ tai enemmän (Tong 2011 s. 4). Tämän takia tarvitaan tehokkaasti lämpöä siirtävä jäähdytysjärjestelmä.

Elektroniikan laitteiden jäähdytyksessä voidaan erottaa kolme eri tasoa, jotka ovat mikrosirun jäähdytys, piirilevyn jäähdytys ja järjestelmätason jäähdytys. Järjestelmätason jäähdytyksen tarkoituksena on kerätä ja siirtää koko järjestelmän tuottama lämpö lämmönsiirtimille ja sitä kautta ympäristöön. Järjestelmätason jäähdytyksessä voidaan hyödyntää pakotettua konvektiota suljetussa vesikierrrossa tai puhaltimia ja rivastoja. Piirilevyn jäähdytyksessä hyödynnetään hyvin lämpöä johtavia materiaaleja, kuten kuparia ja alumiinia, siirtämään lämpöä pois kuumista komponenteista. Mikrosirun tasolla jäähdytyksessä voidaan käyttää hyvin lämpöä johtavia materiaaleja lämmönsiirtoon kuumista pisteistä laajemmalle alueelle. Jos tarvitaan tehokkaampaa lämmönsiirtoa, voidaan käyttää mikrokanavaisia lämmönvaihtimia tai lämpösähköelementtejä, jotka asennetaan suoraan mikrosiruun. (Tong 2011, s. 9—10)

Elektroniikan jäähdytyksessä passiiviset järjestelmät ovat tulleet tiensä päähän, koska elektroniikan lämpökuormien kasvun takia passiivisten järjestelmien jäähdytysteho ei riitä jäähdyttämään tehokkaita elektroniikkalaitteita tarpeeksi (Liang et al. 2019, s. 266). Passiivisia jäähdytysjärjestelmiä ovat erilaiset luonnollisella konvektiolla lämpöä siirtävät ilma- ja vesijäähdytysjärjestelmät, sekä lämpöputki (engl. heat pipe), jonka toiminta perustuu kapillaari-ilmioon. Passiivisten jäähdytysjärjestelmien tilalle on vaihtoehtoina tehokkaampia järjestelmiä, kuten lämpösähköelementit ja kompressorijäähdytys. Näitä, lämpöputkea sekä paria muunnelmaa lämpösähköelementistä elektroniikan jäähdytyksessä on vertailtu tutkimuksessa (Liang et al. 2019). Vertailun perusteella kompressorijäähdytys on paljon parempi hyötysuhteeltaan ja jäähdytysteholtaan kuin lämpösähköelementti. Lämpösähköelementillä voidaan jäähdyttää 20 °C:n lämpötilassa

olevaa kohdetta 15 W:n teholla, mutta kompressorijäähdytyksellä jäähdytysteho on noin 380 W. Samassa lämpötilassa tehokerroin lämpösähköelementille on 0,8 ja kompressorijäähdytykselle 3,2. Kompressorijäähdytyksen tehokerroin on siis 4-kertainen verrattuna lämpösähköelementin tehokertoimeen ja kompressorijäähdytysjärjestelmä tuottaa myös enemmän jäähdytystehoa samassa lämpötilassa kuin lämpösähköelementti. Lämpösähköelementti on kuitenkin kompressorijäähdytysjärjestelmää pienempi ja yksinkertaisempi, joten se on parempi vaihtoehto kannettaviin ja pienikokoisiin laitteisiin.

Puolijohteesta valmistettujen teholaserlaitteiden lämpötilan ei tulisi ylittää 60 °C:ta puolijohteiden liitoksessa. Korkeammasta lämpötilasta aiheutuvat lämpökuormat lyhentävät laitteiden elinikää. Laserlaitteiden toiminta on muutoinkin herkkää lämpötilavaihteluille. Esimerkiksi galliumarsenidista valmistetun puolijohdelaserin säteen aallonpituus muuttuu lämpötilan muuttuessa $0.27\text{--}0.29 \frac{\text{nm}}{\text{K}}$. (Bachmann et al. 2007, s. 34—35) Lisäksi puolijohdelaserin elektro-optinen hyötysuhde heikkenee noin 2 prosenttiyksikköä 10 K:n lämpötilannousua kohden (Bachmann et al. 2007, s. 85—86).

Lämpösähköelementtien käytössä tarkka lämpötilansäätö on ominaisuus, josta on erityisesti hyötyä laserlaitteiden jäähdytyksessä. Mittaamalla lämpönielun lämpötila voidaan laskea lämpötila laserlaitteen puolijohteiden liitoksessa. Tämän tiedon perusteella voidaan säätää lämpösähköelementin jäähdytystehoa sähkövirran avulla, mikä puolestaan muuttaa laserlaitteen lämpötilaa ja emittoimaa valon aallonpituutta haluttuun suuntaan. (Bachmann et al. 2007, s. 92)

4.1 Transientijäähdytys

Edellä on tarkasteltu lämpösähköelementin toimintaa jatkuvassa tilassa. Siinä elementtiin syötetään vakioarvossa pysyvää tasavirtaa ja se aikaansaa elementin siirtämän vakiona pysyvän lämpövirran. Vakiona pysyvä lämpövirta aiheutuu Peltierin ilmiöstä ja sen vaikutuksia heikentävästä Joulen lain mukaisesta lämpenemisestä. Elementin jäähdytystehoa voidaan kuitenkin hetkellisesti kasvattaa syöttämällä elementtiin lyhyen aikaa kestävä, vakiovirtaa suurempi virtapulssi. Tutkimuksessa on havaittu optimaalisen virtapulssin amplitudin olevan noin 3-kertainen vakiotilan arvoon nähden (Snyder et al. 2002). Virtapulssi aiheuttaa elementin jäähdytyksen tilassa aikariippuvuuden, eli transientin tilan. Tämä voidaan havaita nopeana lämpötilan laskuna elementin kylmällä puolella ja nousuna kuumalla puolella. Lämpötilapiikin jälkeen lämpötilat kylmällä ja kuumalla puolella nousevat jatkuvan tilan arvoa korkeammiksi, minkä jälkeen lämpötilat laskevat jatkuvan tilan arvoon. (Mao et al. 2012)

Elementin kylmän puolen lämpötilamuutokset virtapulssin seurauksena johtuvat siitä, että Peltier-jäähdytys ja Joulen lain mukainen lämpeneminen tapahtuvat eri kohdissa elementin rakennetta: Joulen lain mukainen lämpeneminen puolijohdemateriaaleissa ja Peltier-jäähdytys materiaalien liitoksissa. Sähkövirtaa lisättäessä kylmän puolen puolijohdeliitos jäähtyy välittömästi, mutta Joulen lain lämpeneminen seuraa myöhemmin, sillä lämpö kehittyy tasaisesti puolijohteissa ja siirtyy johteita pitkin johtumalla elementin kylmälle puolelle. Joulen lain vaikutus alkaa näkyä selkeästi yli 15 s kestäville pulsseilla. Tutkimuksen mukaan 15 s kestäväällä pulssilla on mahdollista saavuttaa 4,5 °C:n lämpötilan lasku kylmän puolen lämpötilassa ja systeemi palaa jatkuvan tilan arvoihin 24–30 sekunnin kuluttua (Mao et al. 2012).

Transientijäähdytystä voidaan soveltaa kohteissa, joissa vaaditaan jäähdytykseltä nopeaa vastetta lämpötilamuutoksiin sekä hetkellistä matalaa lämpötilaa. Esimerkiksi laserlaitteissa tarvitaan tarkkaa lämpötilansäätöä, jolloin niissä on perusteltua käyttää lämpösähköelementtejä. Lämpösähköelementillä voidaan jäähdyttää laseria ja aiheuttaa tarvittaessa nopeita muutoksia lasersäteen aallonpituuteen, joka on riippuvainen toimintalämpötilasta. (Snyder et al. 2002; Mao et al. 2012) Virtapulssin syöttäminen elementtiin aiheuttaa kuitenkin sen, että elementin tehokerroin laskee huomattavasti. Esimerkiksi maksimitehokertoimella 0,5 toimivan elementin tehokerroin laskee 0,2:n tasolle tai alemmas pulssin kestosta riippuen (Mao et al. 2012).

4.2 Hukkalämmön hyödyntäminen

Aiemmin todettiin, että lämpösähköelementtijäähdytys ei ole hyötysuhteen kannalta paras mahdollinen jäähdytystekniikka. Lämpösähköelementti on kuitenkin komponenttina sellainen, että sillä pystytään myös tuottamaan sähkövirtaa. Kun lämpösähköelementin puolten välillä on lämpötilaero, syntyy sen johtimien päiden välille potentiaaliero Seebeckin ilmiön mukaisesti. Kun elementti kytketään vielä ulkoiseen kuormaan, sillä voidaan tuottaa sähkötehoa. Sähkötehoa tuottavilla lämpösähköelementeillä voidaan ottaa talteen hukkalämpöä, jota syntyy esimerkiksi tietokoneen prosessorin viileämmissä kohdissa. Kerätyllä energialla voidaan käyttää esimerkiksi prosessorin kuumaan kohtaan asennettua jäähdytyslementtiä lämpötilaerojen vähentämiseksi. Näin saadaan eliminoitua lämpösähköelementtijäähdytyksen huono tehokerroin, sillä kokonaisuutena tarkasteltuna jäähdytysjärjestelmä ei tarvitse ulkoista virtalähdettä toimiakseen, vaan se hyödyntää hukkalämpöä.

Tällaisen systeemin toteuttamista ja mallinnusta on tarkasteltu tutkimuksessa (Al-Shehri 2019, 9124–9125), jossa 15 mm × 15 mm kokoisen prosessorin 3 mm × 3 mm kokoisen

kuuman kohdan jäähdyttämistä tutkittiin käyttäen prosessorin hukkalämpöä hyödyksi. Kuuman kohdan lämpötila oli maksimissaan ilman jäähdytystä 167 °C ja sen lämpöteho oli 30 W. Hukkalämpöenergiaa kerättiin talteen 24:n jäähdyttävän elementin kanssa identtisen elementin avulla prosessorin pinnalta kuumaa kohtaa lukuunottamatta. Hukkalämpöä muodostui 240 W, josta saatiin keräävillä lämpösähköelementeillä talteen vain noin 3.8 W. Tutkimus kuitenkin osoitti, että kerätty hukkalämpöenergia riitti jäähdyttämään kuuman kohdan maksimilämpötilan noin 82 °C:een.

Lee et al. (2016) tutkivat samaa aihetta. Tutkimuksessa prosessorin pintaan viileämmille välimuistialueille asennettiin hukkalämpöä kerääviä elementtejä ja kuumaan kohtaan liukuluku- ja kokonaislukualueella asennettiin jäähdyttäviä elementtejä. Lämmönkeruun ansiosta kuumia kohtia voitiin jäähdyttää noin 63 °C:sta hieman alle 48 °C:een. Lämmönkeruun haittapuolena on kuitenkin keräysalueiden lämpötilan nousu prosessorissa. Tämä johtuu siitä, että kun pintaan asennetaan lämpösähköelementti, terminen resistanssi ympäristön ja prosessorin välillä kasvaa. Yhtälöstä (6) nähdään, että kun terminen kokonaisresistanssi kasvaa, prosessorin pinnan lämpötilan (tässä tapauksessa T_1) on kasvettava, jotta siirtyvä lämpöteho pysyy vakiona. Lämpötilan nousu ei ole tutkimuksen mukaan ongelma, sillä lämpötila pysyy kuumien kohtien lämpötilan alapuolella.

Hukkalämpöä hyödyntävä jäähdytysjärjestelmä vaatii lämpösähköelementtien lisäksi ohjausjärjestelmän. Energiaa keräävät elementit kytketään systeemissä sarjaan, jolloin jäähdyttävää elementtiä syöttävä jännite on keräävien elementtien jännitteiden summa. Tämä jännite vaihtelee ympäristön ja prosessorin lämpötilojen muuttuessa yhtälön (1) periaatteen mukaisesti. Jos jäähdyttävään elementtiin syötetty sähköteho vaihtelee, vaihtelee myös kuuman kohdan jäähdytysteho, mikä tekee systeemistä epävakaa. Tämän takia tarvitaan jäähdytys-elementin jännitettä ja virtaa säätelevä piiri (Lee et al. 2016).

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Jäähdytystehon tarve elektroniikassa korostuu laitteiden jatkuvan tehokuuden kasvun ja koon pienentymisen seurauksena. Lämpösähköelementit ovat potentiaalinen vaihtoehto erilaisten elektroniikan komponenttien ja laitteiden jäähdyttämiseen, koska ne ovat pienikokoisia ja niillä on mahdollista säätää kohteen lämpötilaa tarkasti $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$:n tarkkuudella. Elementti asennetaan suoraan kiinni jäähdytettävään kohteeseen, mikä tekee jäähdytyksestä helposti kohdennettavan. Parhaiten lämpösähköelementti soveltuu jäähdytystekniikkana kannettaviin elektroniikan laitteisiin, sekä sellaisiin laitteisiin, joissa tarvitaan tarkkaa lämpötilansäätöä tai tilaa jäähdytysjärjestelmälle on vähän. Lämpösähköelementtejä voidaan käyttää CCD-kennojen, sensorien, sähköoptiikan laitteiden ja tietokoneen prosessorin jäähdytykseen. Lämpösähköelementin transientti-jäähdytysominaisuutta voidaan käyttää erikoistapauksissa esimerkiksi sähköoptiikan laitteiden jäähdytyksessä, mutta tällöin jäähdytyksen tehokerroin laskee huomattavasti. Kaskadikytkentäelementillä on mahdollista laskea jäähdytettävän kohteen lämpötila ympäristön lämpötilan alapuolelle. Lämpösähköelementeillä on myös mahdollista toteuttaa jäähdytysjärjestelmä, joka kerää hukkalämpöenergiaa ja käyttää sitä kuuman kohdan jäähdyttämiseen komponentissa.

Lämmönsiirron kannalta lämpösähköelementti toimii negatiivisena termisenä resistanssina. Tämä lisää jäähdytettävästä kohteesta poistettavan lämmön määrää. Lämpösähköelementin kuumalle puolelle voidaan asentaa lämpönielu. Tutkimusten mukaan lämpöputken käyttö lämpönieluna voi lisätä tehokerrointa $0,1$:llä ja siirtyvän lämpötehon määrää 53% . Lämpönieluna voidaan käyttää myös rivastoa tai suljettuun fluidin kiertoon perustuvaa lämmönsiirintä. Tällöin lämmönsiirto tapahtuu pakotetulla konvektiolla. Tutkimusten mukaan rivaston korvaaminen suljetun kierron systeemillä voi nostaa tehokerrointa $0,4$:llä. Lämpönielut voivat parantavaa lämpösähköelementin tehokerrointa merkittävästi, mutta lisäävät jäähdytysjärjestelmän kokoa.

Mikäli laitteessa ei ole tilaa lämpönielulle, kuten voi olla esimerkiksi kannettavissa elektronisissa laitteissa, jää vaihtoehdoksi parantaa elementin omaa tehokerrointa. On osoitettu, että elementin optimaalinen jäähdytyksen tehokerroin saavutetaan pienemmällä virrankulutuksella kuin maksimijäähdytysteho. Tässä työssä käytetyssä esimerkitapauksessa ero tehokertoimissa oli noin $0,1$. Tulos ei ole yleistettävissä, mutta siitä voidaan päätellä, että elementti tulee mitoittaa siten, että kohteen tarvitsema jäähdytysteho normaalitilanteessa vastaa elementin tuottamaa jäähdytystehoa maksimitehokertoimella. Näin jäähdytystehoa on mahdollista lisätä, jos kohteen tuottama lämpöteho kasvaa

tavanomaisesta arvosta. Elementin tehokertoimeen vaikuttavat myös elementissä käytettyjen lämpösähkömateriaalien ominaisuudet. Jäähdytyskäytössä suurin merkitys on lämpösähkömateriaalin Seebeckin kertoimella ja sähkönjohtavuudella. Lämmönjohtavuudella on vähemmän merkitystä. Tutkimusten mukaan materiaalin tehokkuuden kannalta Seebeckin kertoimen nostamisella on noin 5- ja sähkönjohtavuuden lisäämisellä noin 4-kertainen vaikutus verrattuna lämmönjohtavuuden pienentämisen vaikutukseen. Ohutkalvomateriaaleilla Seebeckin kertoimen vaikutus on 6-kertainen verrattuna lämmönjohtavuuteen.

Seebeckin kertoimen parantaminen onnistuu seostamalla uusia lämpösähkömateriaaleja. Pitkään tutkimuksen kohteena on ollut vismuttitelluuri, jonka lämpösähköiset ominaisuudet ovat huoneenlämpötilassa paremmat kuin muilla lämpösähkömateriaaleilla. Siksi vismuttitelluuri sopii hyvin jäähdytyssovelluksiin. Lupaavia parannuksia vismuttitelluurin lämpösähköisiin ominaisuuksiin on saavutettu hyödyntämällä ohutkalvotekniikkaa. Ohutkalvotekniikalla on pystytty valmistamaan vismuttitelluuria, jonka ZT on 2,4 300 K:n lämpötilassa, kun bulkki-vismuttitelluurilla on päästy samassa lämpötilassa ZT :n arvoihin 1,2—1,4. Ohutkalvotekniikka mahdollistaa lämpösähköelementtien koon pienentämisen ja uudenlaisten materiaalien kehittämisen. Lämpösähköelementtien tehokkuuden parantamiseksi on tulevaisuudessa lisättävä ohutkalvotekniikan tutkimusta laadukkaampien lämpösähkömateriaalien ja valmistustekniikan kehittämiseksi.

LÄHTEET

Adachi, H. and Wasa, K. (2012), 1 - Thin Films and Nanomaterials, Handbook of Sputtering Technology (Second Edition) William Andrew Publishing, Oxford, pp. 3-39.

Al-Shehri, S. (2019), Cooling Computer Chips with Cascaded and Non-cascaded Thermoelectric Devices, Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 44, Iss. 11, pp. 9105—9126.

Apertet, Y. and Goupil, C. (2016), On the fundamental aspect of the first Kelvin's relation in thermoelectricity, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 104, pp. 225—227.

Attey, G. S., (1998), Enhanced thermoelectric refrigeration system COP through low thermal impedance liquid heat transfer system, Seventeenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings ICT98, IEEE, pp. 519—524.

Bachmann, F., Loosen, P. and Poprawe, R. (2007), High Power Diode Lasers Technology and Applications, 1st ed., Springer New York.

Beretta, D., Neophytou, N., Hodges, J.M., Kanatzidis, M.G., Narducci, D., Martin-Gonzalez, M., Beekman, M., Balke, B., Cerretti, G., Tremel, W., Zevalkink, A., Hofmann, A.I., Müller, C., Dörfling, B., Campoy-Quiles, M. and Caironi, M., (2019), Thermoelectrics: From history, a window to the future, Materials Science & Engineering R, Vol. 138, pp. 210—255.

Chen, Y., Hou, X., Ma, C., Dou, Y. and Wu, W. (2018), Review of Development Status of BiTe-Based Semiconductor Thermoelectric Power Generation, Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2018, 1210562.

Delong, L., Chen, Y., Khan, Q., Zhang, Y., Li, Y., and Zhang, H. (2020), Recent Progress of Two-Dimensional Thermoelectric Materials. Nano-Micro Letters, Vol. 12, Iss. 1, 36.

Freer, R. and Powell, A.V., (2020), Realising the potential of thermoelectric technology: a Roadmap, Journal of Materials Chemistry C; Vol. 8, Iss. 2, pp. 441-463.

Goldsmid, H. J., (2010), Introduction to Thermoelectricity, 1st ed., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Harsha Choday, S. and Roy, K. (2013), Sensitivity analysis and optimization of thin-film thermoelectric coolers, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, Iss. 21, 214906.

Laird Thermal Systems, Thermoelectric coolers, verkkosivu, saatavissa (viitattu 24.4.2020): <https://www.lairdthermal.com/products/thermoelectric-cooler-modules>

Lee, S., Pandiyan, D., Seo, J., Phelan, P. E., and Wu, C., (2016), Thermoelectric-based sustainable self-cooling for fine-grained processor hot spots, 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), pp. 847—856.

Liang, K., Li, Z., Chen, M. and Jiang, H. (2019), Comparisons between heat pipe, thermoelectric system, and vapour compression refrigeration system for electronics cooling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 146, pp. 260—267.

Lienig, J. & Bruemmer, H., (2017), *Fundamentals of Electronic Systems Design*. 1st ed. Springer International Publishing.

Ma, M. and Yu, J. (2014), An analysis on a two-stage cascade thermoelectric cooler for electronics cooling applications, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 38, Iss. 1, pp. 352-357.

Mao, J.N., Chen, H.X., Jia, H. and Qian, X.L. (2012), The transient behavior of Peltier junctions pulsed with supercooling, *Journal of Applied Physics*, Vol. 112, 014514.

Pichanusakorn, P. and Bandaru, P. (2010), Nanostructured thermoelectrics, *Materials Science & Engineering R*, Vol. 67, No. 2, pp. 19-63.

Qiao, J., Zhao, Y., Jin, Q., Tang, J., Kang, S., Qiu, J. and Tai, K. (2019), Tailoring Nanoporous Structures in Bi₂Te₃ Thin Films for Improved Thermoelectric Performance, *Acs Applied Materials & Interfaces*, Vol. 11, Iss. 41, pp. 38075—38083.

da Rosa, A.V., (2013), *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, Elsevier Inc.

Snyder, G.J., Fleurial, J., Caillat, T., Yang, R. and Chen, G. (2002), Supercooling of Peltier cooler using a current pulse, *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, Iss. 3, pp. 1564—1569.

Tong, X.C. (2011), *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging*, 1st ed., Springer New York, New York.

Venkatasubramanian, R., Siivola, E., Colpitts, T. and Brooks O'Quinn, (2001), Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit, *Nature*, Vol. 413, pp. 597—602.

Yamashita, O. and Tomiyoshi, S. (2004), Effect of annealing on thermoelectric properties of bismuth telluride compounds doped with various additives, *Journal of Applied Physics*, Vol. 95, No. 1, pp. 161—169.