

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Jaana Jahkonen

LED-VALAISIMEN JÄÄHDYTYS

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Espoossa 6.3.2009.

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja TkT Eino Tetri

Tekijä:	Jaana Jahkonen
Työn nimi:	LED-valaisimen jäähdytys
Päivämäärä:	6.3.2009
Sivumäärä:	98
Laitos:	Elektroniikan laitos / Valaistusyksikkö
Professori:	S-118 Valaistustekniikka
Työn valvoja:	Professori Liisa Halonen
Työn ohjaaja:	TkT Eino Tetri
Tiivistelmäteksti:	<p>Tässä työssä tutustutaan LED-valaisinten jäähdytysuunnittelun teoriaan sekä erilaisiin käytännön jäähdytysmenetelmiin. Työssä esitellään LED-komponenttien toimintaa ja lämpenemisen syitä ja seurauksia sekä käydään läpi lämmönsiirron teoriaa. Lisäksi käydään läpi, miten eri valaisimen osat vaikuttavat valaisimen jäähdytykseen. Työssä kartoitetaan myös, millaisia jäähdytyslaiteratkaisuja elektroniikkalaitteiden jäähdytykseen on käytetty, miten ne toimivat ja mitä eroja eri laitteiden välillä on. Työn lopussa käydään läpi LED-valaisimen lämpöresistanssiverkon laskentaa ja esitetään vaihtoehtoja kevytliikenneväylän valaistukseen tarkoitetun LED-valaisimen jäähdyttämiseksi.</p>
Avainsanat:	LED, LED-valaisin, jäähdytys

Author:	Jaana Jahkonen
Name of the thesis:	Cooling of LED Luminaires
Date:	6.3.2009
Number of pages:	98
Department:	Department of Electronics / Lighting Unit
Professorship:	S-118 Lighting Technology
Supervisor:	Professor Liisa Halonen
Instructor:	D.Sc. Eino Tetri
Abstract text:	<p>This thesis presents the theory and practice of LED luminaire cooling. The operational principles of LEDs will be introduced along with causes and effects of temperature rise in LED components. The work also introduces the basics of heat transfer theory. The effects of individual luminaire parts on heat transfer will be analysed. Different kinds of cooling equipment and their operational principles and differences will be studied. An exemplary analysis of cooling options, heat transfer and the heat resistance network of an LED luminaire for pedestrian road lighting will also be explored.</p>
Keywords:	LED, LED-luminaire, cooling

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty Elektroniikan laitoksen Valaistusyksikölle osana "LED-valaisin – puolijohdesirusta ohjattavaan energiatehokkaaseen valaistusjärjestelmään" –projektia. Työn valvojana on toiminut professori Liisa Halonen, jota haluan kiittää mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta ja innostavan kannustavasta suhtautumisesta työhön. Lisäksi haluan kiittää työn valvojaa TkT Eino Tetriä.

Eriyiskiitos prosessin aikana saamastani kannustuksesta ja tuesta kuuluu isälleni Pekka Jahkoselle. Edellä mainittujen rinnalla lämpimän kiitoksen ansaitsevat myös muu perheeni sekä lähimmät ystäväni ja valaistusyksikön kollegat.

Espoossa 6. maaliskuuta 2009

Jaana Jahkonen

Sisällysluettelo

ALKULAUSE	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLIT JA LYHENTEET	7
<i>Roomalaiset symbolit</i>	7
<i>Kreikkalaiset symbolit</i>	9
<i>Lyhenteet</i>	9
1 JOHDANTO	10
2 LED-SIRUN TOIMINTAPERIAATE JA OMINAISUUDET	11
2.1 VALON SYNTYMINEN LED-SIRUSSA	11
2.2 LED-SIRUN OPTISET JA SÄHKÖISET OMINAISUUDET	12
2.3 LÄMPÖTILAN VAIKUTUS LED-SIRUN TOIMINTAAN	13
2.4 YHTEENVETO	14
3 LÄMMÖNSIIRTO	15
3.1 JOHTUMINEN	15
3.2 KONVEKTIO	17
3.3 LÄMPÖSÄTEILY	20
3.4 KIEHUMINEN JA TIIVISTYMINEN	22
3.5 LÄMPÖRESISTANSSI	22
3.6 LÄMPÖKAPASITANSSI JA AIKAVAKIO	25
3.7 YHTEENVETO	26
4 LÄMMÖNSIIRTO LED-VALAISIMEN RAKENTEISSA	27
4.1 LINSSIOPTIIKKA	27
4.2 LED-KOMPONENTTI	28
4.3 JUOTOS	29
4.4 KOMPONENTTIALUSTA	30
4.5 LIIMA	31
4.6 JÄÄHDYTYSLAITE	32
4.7 KOTELO	32
4.8 YHTEENVETO	33
5 JÄÄHDYTYSLAITTEET	34
5.1 JÄÄHDYTYSPROFIILIT	34
5.1.1 <i>Evän muoto</i>	35
5.1.2 <i>Evien pituus, paksuus ja sijoittelu</i>	38
5.1.3 <i>Kannan vaikutus profiilin toimintaan</i>	40
5.1.4 <i>Materiaalit</i>	40
5.1.5 <i>Pintakäsittely</i>	42
5.1.6 <i>Yhteenveto</i>	43
5.2 AKTIIVINEN ILMAJÄÄHDYTYS	44
5.2.1 <i>Perinteiset tuulettimet</i>	44
5.2.2 <i>Muut puhaltimet</i>	45
5.2.3 <i>Jäähdytysprofiilit pakotetussa ilmajäähdytyksessä</i>	48
5.2.4 <i>Muut väliaineet</i>	48
5.3 NESTEJÄÄHDYTYS	48
5.3.1 <i>Nestejäähdytyksen toimintaperiaate</i>	48
5.3.2 <i>Nestejäähdyslaitteet</i>	49
5.3.3 <i>Jäähdytysnesteet</i>	49
5.3.4 <i>Jäähdytysprofiilit nestejäähdytyksessä</i>	50
5.4 HÖYRYSTYMISLAITTEET	50
5.4.1 <i>Lämpöpiiput</i>	51
5.4.2 <i>Muut faasimuunnosjäähdyttimet</i>	52
5.5 TERMOSÄHKÖISET JÄÄHDYTTIMET	54

5.6 MIKROKANAVA- JA HYBRIDIJÄÄHDYTTIMET	55
5.6.1 Mikrokanavien hyödyntäminen jäähdytyksessä	55
5.6.2 Hybridijäähdyttimet	56
5.7 YHTEENVETO.....	56
6 KEVYTLLIKENNEVÄYLÄN VALAISIMEN JÄÄHDYTYS.....	57
6.1 KEVYTLLIKENNEVÄYLÄN VALAISIMELTA VAADITUT OMINAISUUDET	57
6.1.1 Jäähdytysteho.....	57
6.1.2 Lämpötilaero.....	57
6.1.3 Muut ominaisuudet.....	58
6.1.4 Lämpöresistanssi.....	58
6.1.5 Yhteenveto.....	60
6.2 VAIHTOEHTOJEN TARKASTELU	60
6.2.1 Koteloitu passiivinen jäähdytysprofiili.....	60
6.2.2 Koteloimaton passiivinen jäähdytys kevytliikenneväylän valaisimeen.....	65
6.2.3 Höyrystymistä hyödyntävä jäähdytyslaite kevytliikenneväylän valaisimeen.....	67
6.3 KOMPONENTTIEN VAIKUTUS KEVYTLLIKENNEVALAISIMEN JÄÄHDYTYKSEEN	69
6.4 JOHTOPÄÄTÖKSET	71
7 YHTEENVETO.....	73
LÄHTEET.....	74
LIITTEET.....	86
Liite 1: Komponenttialustan kuparointisimulaatioiden parametrin.....	86
Liite 2: Komponenttialustan ja jäähdytyslaitteen välinen liimakerros –simulaatio.....	88
Liite 3: Komponentin ja jäähdytyslaitteen välisen lämpöresistanssin arviointi, Philips LUXEON Rebel LXML-PWC1-0100	90
Liite 4: Kevytliikennevalaisimen jäähdytykseen tarkoitetun tavoitekokoisen jäähdytysprofiilin konvektio- ja lämpösäteilyresistanssien arviointi	95
Liite 5: Tavoitekokoisen kevytliikennevalaisimen kokonaislämpöresistanssin laskeminen	97
Liite 6: Kiehumispinnan lämpötilan arviointi.....	98

Symbolit ja lyhenteet

Roomalaiset symbolit

A	lämmönsiirtopinta-ala (m^2)
A_j	johtumisen lämmönsiirtopinta-ala (m^2)
A_k	konvektion lämmönsiirtopinta-ala (m^2)
A_s	lämpöä säteilevän pinnan ala (m^2)
B	eri muotoisille kappaleille kokeellisesti määritetty vakio
B_{pn}	pinta-neste yhdistelmästä riippuva kokeellinen vakio
C_p	lämpökapasitanssi (J/K)
c	ominaislämpö (J/(kg·K))
c_n	nesteen ominaislämpö (J/(kg·K))
COP_T	jäähdytysprofiilin performanssikerroin
d	eri muotoisille kappaleille kokeellisesti määritetty vakio
e	eri muotoisille kappaleille kokeellisesti määritetty vakio
F	säteilyn näkyvyyskerroin
g	gravitaatiokiihtyvyys ($9,81 \text{ m/s}^2$)
h_{ke}	kaasuuntumisen entalpia (J/kg)
Gr	Grashofin luku
L	kappaleen ominaispituus (m)
l	nesteestä riippuva kokeellinen vakio
m	massa (kg)
Nu	Nusseltin luku
Pr	Prandtlin luku
Q	lämpömäärä (J)

\dot{Q}	lämmönsiirtoteho (W)
\dot{Q}_j	johtumisen lämmönsiirtoteho (W)
\dot{Q}_k	konvektion lämmönsiirtoteho (W)
\dot{Q}_s	lämpösäteilyn lämmönsiirtoteho (W)
q_T	profiilin keskimääräinen jäähdytysteho (W)
q_y	ydinkiehumisen lämmönsiirtokerroin (W/m ²)
R	lämpöresistanssi (K/W)
R_j	johtumislämpöresistanssi (K/W)
R_k	konvektiolämpöresistanssi
R_s	säteilylämpöresistanssi (K/W)
Ra	Rayleigh'n luku
Re	Reynoldsin luku
T	lämpötila (K)
T_{kp}	kiehumispinnan lämpötila (K)
T_p	pinnan lämpötila (K)
T_{sat}	nesteen saturaatiolämpötila (K)
T_y	ympäristön lämpötila (K)
t	aika (s)
v	virtausnopeus (m/s)
W_T	profiilin valmistukseen ja käyttöön kulutettu energia (J).
Δx	materiaalin paksuus (m).

Kreikkalaiset symbolit

α	lämmönsiirtokerroin ($W/(m^2 \cdot K)$)
α_k	konvektion lämmönsiirtokerroin ($W/(m^2 \cdot K)$)
β	tilavuuden lämpölaajenemiskerroin ($1/K$)
ε	emissiokerroin
η	viskositeetti ($kg/(m \cdot s)$)
λ	lämmönjohtavuus ($W/(m \cdot K)$)
ρ	tiheys (kg/m^3)
σ	Stefan Boltzmannin vakio ($5,67 \cdot 10^8 W/(m^2 \cdot K^4)$)
σ_{nk}	neste-kaasu rajapinnan pintajännitys (N/m)

Lyhenteet

EHD	Elektrohydrodynamic
IP	International Protection
LED	Light Emitting Diode
MCPCB	Metal Core Printed Circuit Board
PPS	Polyphenylene Sulfide
ScD	Silicon Carbide Diamond
TPE	Thermoplastic Elastomer
TPV	Thermoplastic Vulcanate

1 Johdanto

LED (Light Emitting Diode) eli valoa emittoiva diodi on puolijohdekomponentti, jonka avulla sähköenergia voidaan muuttaa sähkömagneettiseksi säteilyksi. Ensimmäiset havainnot puolijohdemateriaalin kyvystä emittoida valoa tehtiin jo 1900-luvun alussa, mutta LED-komponenttien kehitys alkoi vasta 1960-luvulla. Siitä lähtien niitä on käytetty kasvavassa määrin erilaisissa merkinantojärjestelmissä, näytöissä ja kohdevalaistuksessa. Yleisvalaistukseen LED-komponenttien valotehokkuus on pitkään ollut liian heikko, mutta sen paraneminen on ollut muun puolijohdeteknologian kehityksen tavoin eksponentiaalista eikä merkkejä sen hidastumisesta ainakaan vielä ole havaittavissa.

Viime vuosina ensimmäisiä yleisvalaistukseen tarkoitettuja LED-valaisimia on saatu markkinoille ja kehityksen myötä niillä voitaisiin tulevaisuudessa korvata lähes kaikki vaihtoehtoiset valaistusteknologiat. LED-valaisinten ylivoima muihin vaihtoehtoihin nähden johtuu pienen koon ja pitkän eliniän lisäksi muunmuassa niiden alhaisesta energiankulutuksesta. Viime vuosina ympäristöystävällisyys, maapallon lämpeneminen ja energiankulutus ovat nousseet yhdeksi tärkeimmistä kansainvälisistä puheenaiheista ja erilaisia kansainvälisiä ja kansallisia tavoitteita sekä määräyksiä on asetettu tiuhaan tahtiin. Esimerkiksi hehkulamppujen matka on tullut tiensä päähän, sillä ainakin Euroopassa ne tullaan portaittain poistamaan myynnistä vuoteen 2012 mennessä.

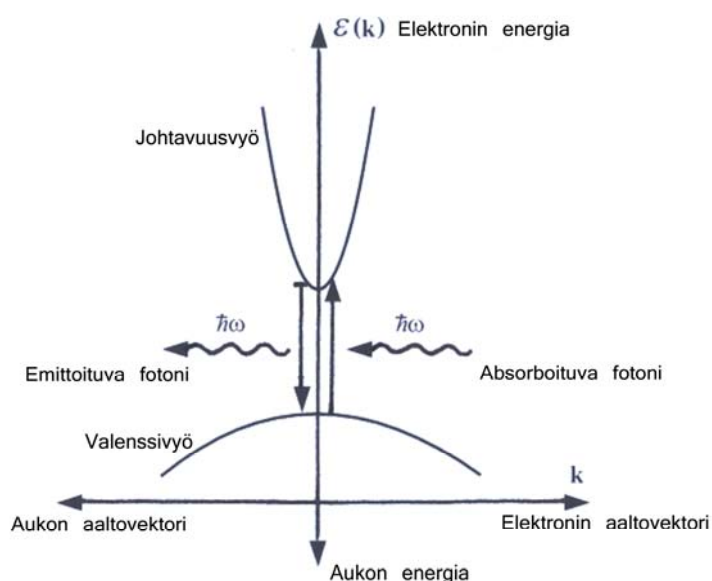
LED-valaisimet ovat oiva vaihtoehto hehkulamppujen korvaajiksi, mutta niiden käyttöönottoa hidastavat erilaiset ongelmat, kuten standardien puute ja ainakin toistaiseksi melko alhaisia valotehokkuuksia seuraava liiallinen kuumeneminen. Valaisinten pitkän eliniän ehdottomana ehtona on, että komponentin toimintalämpötila pysyy tarpeeksi alhaisena, mieluiten reilusti alle 100-asteisena. Jäähdytyksen suunnittelu on kuitenkin haasteellista, sillä pienen komponenttikoon ja tiheän komponenttisijoittelun seurauksena jäähdytettävät lämpövuot voivat olla erittäin suuria. Lisäksi LED-valaisimille asetettujen elinikä- ja ympäristöystävällisyystavoitteiden seurauksena jäähdytyslaitteelta vaaditaan erityisen hyvää luotettavuutta ja pientä energiankulutusta sekä tietysti kaupallisista tuotteista puhuttaessa myös huokeaa hintaa. Myös valaisimen koko, massa ja ulkonäkö sekä esimerkiksi sen aiheuttama melu voivat joidenkin valaisinsovellusten osalta olla merkittäviä tekijöitä, joihin voidaan pääasiallisesti vaikuttaa nimenomaan valaisimen jäähdytyslaitteen optimaalisella suunnittelulla.

Tässä työssä käsitellään ensin lyhyesti LED-sirujen yleisiä toimintaperiaatteita, lämpöhäviöiden syntyä sekä lämpötilan nousun aiheuttamia ongelmia ja käydään läpi erilaisiin lämmönsiirtomekanismeihin liittyvää teoriaa. Työn pääasiallisena tavoitteena on tutustua eri tyyppisiin jäähdytyslaitteisiin sekä niiden ominaisuuksiin, hyötyihin ja haittoihin. Lopuksi vertaillaan simulaatioiden ja laskujen avulla kevytliikenneväylän valaisuun tarkoitettun LED-valaisimen jäähdytykseen parhaiten soveltuvia menetelmiä.

2 LED-sirun toimintaperiaate ja ominaisuudet

2.1 Valon syntyminen LED-sirussa

Valoa emittoivan diodin toiminta perustuu säteileviin rekombinaatioihin kahden eri tyyppin varauksenkuljettajien, elektronien ja aukkojen, välillä. Puolijohteen elektronit sijaitsevat johtavuusvyössä, joka on aukkoja sisältävää valenssivyötä korkeammalla energiatasolla. Suorassa emissiorekombinaatiossa johtavuusvyössä oleva elektroni putoaa valenssivyön tyhjälle sidostilalle eli aukolle vapauttaen valokvantin. Energian ja liikemäärän säilymislakien seurauksena tämän emittoituneen valokvantin eli fotonin energia on lähellä voiden väliin jäävän niin sanotun kielletyn energiavälin energiaa. (Sinkkonen 1996, Žukauskas et al. 2002)

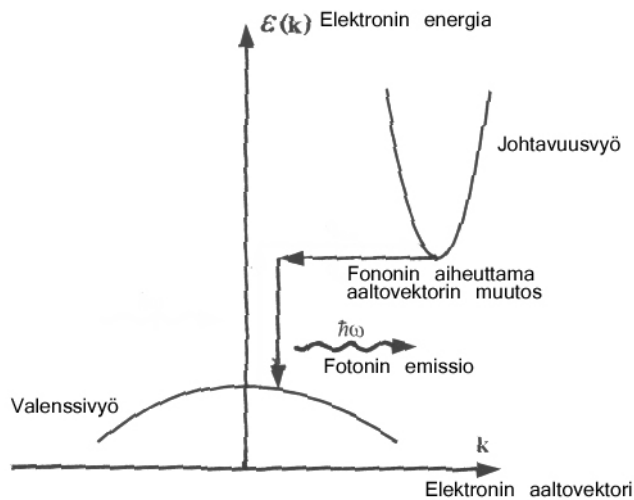


Kuva 1. Fotonin emissio ja absorptio suorassa kielletyssä energiavälissä (Sinkkonen 1996).

Suorien transitioiden lisäksi fotoni voi muodostua myös epäsuorien transitioiden seurauksena välitilojen kautta. Nykyisilläkin valmistusmenetelmillä puolijohdemateriaalien jaksolliseen hilarakenteeseen jää epäpuhtausatomeja, vakanssitiloja, välisija-atomeja ja dislokaatioita, jotka voivat aiheuttaa emissiivisen siirtymän mahdollistavia loukkutiloja kiellettyyn energiaväliin. Fotonin sijaan epäsuorissa transiioissa muodostuu usein fononeja, jolloin energia emittoituu valon sijaan lämpönä. Myös puolijohdeiden pinnoilla hilarakenne rikkoutuu ja ei-säteilevien rekombinaatioiden osuus voi olla merkittävä. (Franssila 2004, Schubert 2006, Sinkkonen 1996)

Fotonin aaltoluku ja siten myös sen liike-energia on pieni verrattuna elektroneihin ja aukkoihin, minkä takia voiden väliset transiitot aaltovektori-avaruudessa ovat pääosin pystysuoria. Tämän takia valenssivyön maksimin sekä johtavuusvyön minimin tulee sijaita samalla kohtaa. Mikäli näin ei ole, kielletty energiaväli on epäsuora ja voiden väliset transiitot elektronien ja aukkojen välillä tarvitsevat sopivan määrän lisäenergiaa välitilatransiioilta aaltovektorin muutokseen.

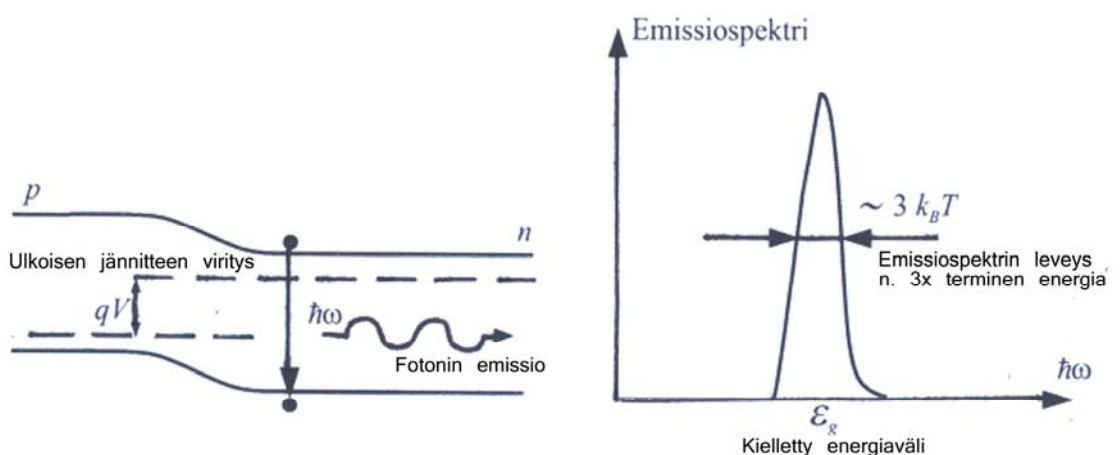
Koska prosessiin tarvitaan lisäksi fononi, on transiitodennäköisyys tällöin pienempi ja valon emissio vähäisempää. Tämän takia LED-dioeissa käytetään yleensä suoran kielletyn energiavälin materiaaleja, pääasiallisesti galliumin, arseenin, alumiinin, indiumin ja fosforin yhdistelmiä. Yhdistepuolijohteilla kielletyn energiavälin suuruutta voidaan muokata ja siten saada aikaan haluttu emittoituvan valon spektri. (Sinkkonen 1996, Žukauskas et al. 2002)



Kuva 2. Fononitransition mahdollistama epäsuora emissio (Sinkkonen 1996).

2.2 LED-sirun optiset ja sähköiset ominaisuudet

Emittoituvan valon spektri riippuu kielletyn energiavälin suuruudesta ja suorudesta. Näkyvän valon alueen aallonpituuksia (380-780 nm) vastaavan kielletyn energiavälin suuruus on noin 1,75 – 3,10 eV. Varauksenkuljettajat sijaitsevat ohuella alueella mahdollisimman lähellä voiden reunoja, jonka seurauksena LED-diodin säteilyn spektri on kapea. (Sinkkonen 1996)



Kuva 3. LED-diodin energiavyödiagrammi ja emissiospektri (Sinkkonen 1996).

Valovirralla kuvataan ihmissilmän havaitseman valoistimuksen voimakkuutta. LED-sirun valovirta riippuu sen optisen säteilytehon spektriheydestä eli kunkin aallonpituuden

emittoimasta säteilytehosta (Schubert 2006). Koska LED-diodin spektri on kapea, huippuaallonpituuden eli spektrijakauman maksimiarvon vaikutus valovirtaan on suuri.

LED-sirun suhteellinen valotehokkuus kuvaa valovirran ja kulutetun sähkötehon suhdetta. Valovirtaan vaikuttava säteilyteho riippuu LED-sirun säteilyhyötysuhteesta. Säteilyhyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- valoa säteilevien rekombinaatioiden osuus kaikista rekombinaatioista
- emittoituneiden fotonien absorboituminen takaisin komponentin rakenteisiin
- ulkoisen jännitteenlisäyksen aiheuttaman vähemmistövarauksenkuljettajien diffuusion kasvun eli injektio kohdistuminen aktiivialueelle
- emittoituneiden fotonien energian ja elektroni-aukkoparin ottaman energian suhde

Mahdollisimman hyvän valotehokkuuden takaamiseksi käytetään LED-diodeissa nykyään monimutkaisia kvanttikaivo-heterorakenteita, joilla voidaan vähentää injektioitujen varauksenkuljettajien vuotamista aktiivialueen ohi ja fotonien absorboitumista takaisin puolijohderakenteisiin. (Žukauskas et al. 2002)

Schubert (2006) jakaa valkoista valoa tuottavat LED-komponentit di-, tri-, tetra- ja pentakromaattisiin sekä aallonpituusmuokattuihin valonlähteisiin. Aallonpituusmuokatuissa lähteissä valkoinen valo tuotetaan LED-diodien ja fosforien yhdistelmänä, muissa käytetään eri määriä erivärisiä LED-diodeja. Valkoista valoa tuottavien LED-komponenttien värilämpötilan määrittelyssä käytetään ekvivalenttista värilämpötilaa. Tällä tarkoitetaan niin sanotun mustan kappaleen absoluuttista lämpötilaa, jolla sen väri vastaa mahdollisimman hyvin komponentin väriä. Yksivärisen LED-diodin värin määrittelyssä käytetään dominoivaa aallonpituutta, jolla tarkoitetaan diodin väriä lähinnä olevan monokromaattisen värin aallonpituutta.

LED-komponentin ominaisuuksista olennainen on myös sen myötävirta-jännite karakteristiikka, joka kuvaa komponentin myötävirran- ja -jännitteen välistä, parasiittisten resistanssien aiheuttamaa epälineaarisuutta. Karakteristiikan perusteella voidaan suunnitella komponenttia ohjaava elektroniikka ja laskea sen tehonkulutus. Edellä mainittujen lisäksi yksi tärkeimmistä LED-komponentin ominaisuuksista on sen elinikä. (Schubert 2006)

2.3 Lämpötilan vaikutus LED-sirun toimintaan

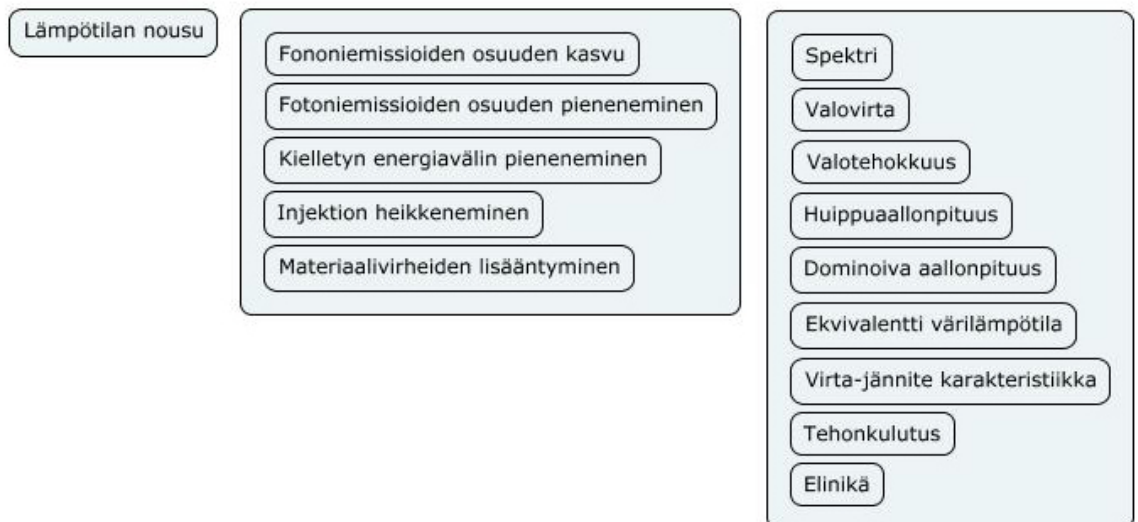
Aktiivialueen lämpötilan kasvun seurauksena puolijohdekide, kuten monet muutkin materiaalit, laajenee sille ominaisen lämpölaajenemiskertoimen mukaisesti, jolloin atomien väliset etäisyydet kasvavat. Tällöin johtavuus- ja valenssivyöt levenevät ja niiden väliin jäävä kielletty energiaväli kapenee. Tämä puolestaan johtaa emittoituvien fotonien energian pienenemiseen ja valon aallonpituuden kasvuun. Lisäksi kielletyn energiavälin pienetessä rekombinaationopeus laskee eli fotonien syntyminen hidastuu ja absorptio lisääntyy, jolloin emittoituvan optisen säteilyn määrä laskee. (Kuivalainen 2000, Schubert 2006, Sinkkonen 1996, Sinkkonen 1998)

LED-valaisinten käyttölämpötila-alueella aktiivialueen lämpötilan nousu aiheuttaa fononien relaxaatioajan lyhenemistä (Sinkkonen 1996). Tällöin fononisironnan todennäköisyys kasvaa ja suurempi osa fotonien tuottamiseen tarkoitetusta sähkötehosta muuttuu valon sijaan lämpöhäviöiksi nostaan edelleen aktiivialueen lämpötilaa ja pienentäen säteilyhyötysuhdetta. Myös elektronien injektio aktiivialueelle vaikeutuu. Aktiivialueen lämpötila vaikuttaa myös varauksenkuljettajien tilatiheyksiin ja elinaikoihin, jotka edellä mainittujen lisäksi vaikuttavat LED-komponenttien saturaatiovirtoihin ja ohjauksjännitteisiin. (Kuivalainen 2000, Schubert 2006, Žukauskas et al. 2002)

Puolijohteiden ominaislämpö ja lämmönjohtavuus muuttuvat myös kiteen hilavärähtelyjen eli fononisironnan lisääntyessä. Lisäksi liian suuri toimintalämpötila lisää materiaalivirheiden syntymistä LED-komponentissa lyhentäen sen elinikää. (Schubert 2006, Sinkkonen 1996)

2.4 Yhteenveto

Žukauskas et al. (2002) mukaan optimaalisen valkoisen valon lähteen saavuttamiseksi LED-komponentin suunnittelussa tulee pyrkiä maksimoimaan säteilyhyötysuhde, valonlähteen valotehokkuus sekä värinointoindeksi. Kuluttajan kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat näiden lisäksi LED-valaisinten elinikä ja energiankulutus. Näiden ominaisuuksien optimoinnissa yksi tärkeimmistä tekijöistä on LED-komponentin lämpötilannousun estäminen, sillä lämpötila vaikuttaa kaikkiin edellä mainittuihin LED-komponentin ominaisuuksiin.



Kuva 4. Komponentin aktiivialueen lämpötilan nousun aiheuttamat ilmiöt ja niistä riippuvat optiset ja sähköiset ominaisuudet.

3 Lämmönsiirto

Yksi fysiikan tärkeimmistä peruslähtökohdista on termodynamiikan ensimmäinen laki. Tämän energiansäilymlain mukaan energiaa ei synny eikä tuhoudu vaan se muuttaa muotoaan säilyttäen energiatasapainon. Sähkölaitteissa laitteeseen tuleva sähköenergia muutetaan laitteen toimintatarkoitusta vastaavaan muotoon, esimerkiksi mekaaniseksi energiaksi tai valoksi. Lisäksi osa energiasta muuttuu häviöiksi, pääasiallisesti lämmöksi, jonka liiallinen kertyminen laitteisiin tulee estää optimaalisen toiminnan takaamiseksi ja rikkoutumisten välttämiseksi.

Perinteinen termodynamiikka tarkastelee energiamäärien siirtymistä tasapainotilojen välillä. Jos tarkasteltavan systeemin massa pysyy vakiona, energia siirtyy joko työn tai lämmönsiirron vaikutuksesta. Kyse on lämmönsiirrosta, jos ja vain jos ajavana voimana toimii lämpötilaero, muussa tapauksessa kyse on työstä. Lämpötilagradientti ilmaisee lämpöenergian siirtymisen suunnan, joka termodynamiikan toisen lain mukaan on aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Käytännössä tasapainotilojen ja energiamäärien tarkastelu ei yksin riitä vaan olennaista on tuntea myös energian siirtymiseen kuluva aika ja tapa epätasapainon vallitessa. Perinteisten termodynamiikan lakien pohjalta onkin kehitetty lämmönsiirtoteoria, joka tarkastelee epätasapainotilan lämmönsiirtonopeuksia ja -mekanismeja, johtumista, konvektiota sekä lämpösäteilyä. Lämmönsiirtomekanismista riippumatta siirtyvää lämpömäärää voidaan kuvata yhtälöllä

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (1),$$

jossa Q = lämpömäärä (J)

$$\dot{Q} = \text{lämmönsiirtoteho (W)}$$

$$\Delta t = \text{lämmönsiirtoon käytettävä aika (s)}.$$

Jäähdytyksen kannalta olennainen suure on lämmönsiirtoteho, joka riippuu aina lämmönsiirtopinta-alasta, lämmönsiirtokertoimesta sekä lämpötilasta tai lämpötilaerosta. Konvektion ja lämpösäteilyn tapauksessa lämmönsiirtokertoimen määrittäminen on hankalaa ja se saattaa olosuhteista riippuen vaihdella suurestikin, joten varsinkin näiden lämmönsiirtomekanismien osalta lämmönsiirron mallintaminen on erittäin hankalaa. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Pitts, Sissom 1998)

3.1 Johtuminen

Lämmönjohtumisella tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä suuren energian sisältäviltä hiukkasilta alemman energian omaaville hiukkasille. Kiinteissä aineissa johtuminen tapahtuu hilavärähtelyn ja vapaiden elektronien välityksellä, kaasuissa ja nesteissä molekyylien

törmäyksien ja diffuusion kautta. Yksidimensionaalista tasomaista lämmönsiirtoa homogeenisessa materiaalissa voidaan kuvata Fourierin lailla

$$\dot{Q}_j = \frac{dQ}{dt} = -\lambda A_j \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2).$$

Tässä \dot{Q}_j = johtumisen lämmönsiirtoteho (W)

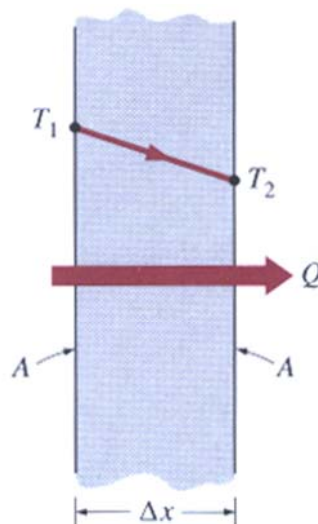
λ = materiaalin lämmönjohtavuus (W/(m·K))

A_j = johtumisen lämmönsiirtopinta-ala (m²)

ΔT = lämpötilaero materiaalin pintojen välillä (K)

Δx = materiaalikerroksen paksuus (m).

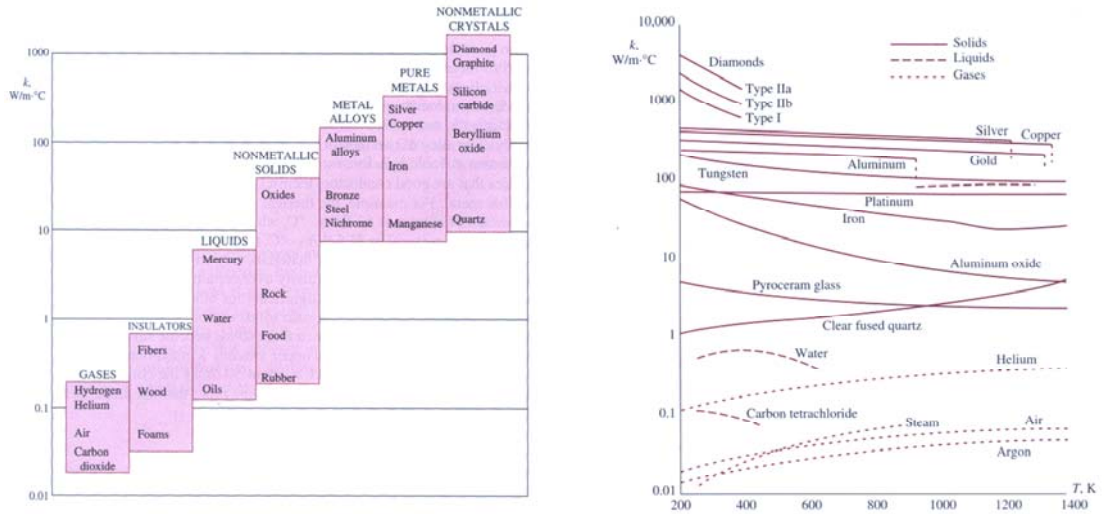
Käytännössä lämmönsiirtoyhtälöt ovat monimutkaisempia. Johtumista tapahtuu useammassa dimensiossa eikä se välttämättä ole tasomaista. Materiaalin lämmönjohtavuus ei ole vakio vaan se vaihtelee lämpötilan, kaasuilla jonkin verran myös paineen vaikutuksesta. Myös materiaalin lämpötila vaihtelee sekä paikallisesti että ajallisesti ja lämmönjohtumisen tarkassa mallintamisessa joudutaan turvautumaan Poissonin yhtälöihin ja monimutkaisiin differentiaalimenetelmiin. Lämmönsiirtolaskujen ratkaisemiseen voidaan käyttää myös sähkökenttien yhtälöitä ja virtapiirianalogiaa. Myöhemmin tarkastellaan niin sanottua lämpöresistanssin käsitettä, jonka avulla johtumisen ja muiden lämmönsiirtomekanismien tarkastelua voidaan hieman yksinkertaistaa. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Pitts, Sissom 1998)



Kuva 5. Tasomainen yksidimensionainen lämmönjohtuminen homogeenisen seinämän läpi (Çengel 2003).

Varsinkin komponenttitasolla johtuminen on merkittävä lämmönsiirtomekanismi. Suurin osa häviölämmöstä johdetaan komponentin pohjan kautta komponenttialustaan ja sieltä edelleen jäähdytyslaitteeseen. Pienten tehokomponenttien lämpövuot voivat olla erittäin suuria, jolloin

hyvien materiaalivalintojen lisäksi olennaista on levittää häviölämpöteho riittävän suurelle pinta-
alalle erilaisten lämmönlevittimien avulla. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Pitts, Sissom 1998)



Kuva 6. Materiaalien lämmönjohtavuus ja vaihtelu lämpötilan funktiona (Çengel 2003).

3.2 Konvektio

Lämmönsiirtyminen kiinteään kappaleen ja nestemäisen tai kaasumaisen väliaineen rajapinnalla on perusolemukseltaan johtumista, jota voidaan tehostaa tuomalla rajapinnalle kylmää väliainetta. Konvektiolla tarkoitetaan johtumisen tai lämpösäteilyn ja väliaineen liikkeen yhteisvaikutuksen lämmönsiirtoa, jota tapahtuu kiinteään aineen ja eri lämpötilassa olevan liikkuvan nesteen tai kaasun rajapinnalla. Jos väliaine ei liiku lainkaan, lämmönsiirto on pelkkää johtumista. Yleisesti konvektiota voidaan kuvata Newtonin jäähtymislailailla

$$\dot{Q}_k = \alpha_k A_k (T_p - T_y) \quad (3),$$

jossa \dot{Q}_k = konvektion lämmönsiirtoteho (W)

α_k = konvektion lämmönsiirtokerroin (W/(m²·K))

A_k = konvektion lämmönsiirtopinta-ala (m²)

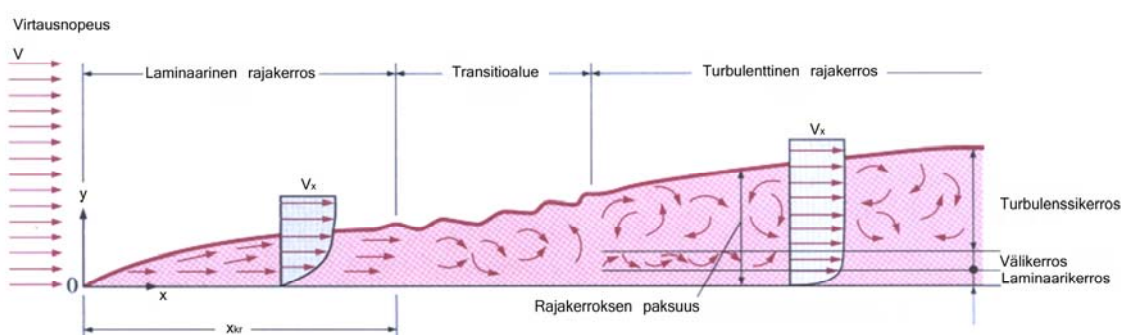
T_p = konvektiopinnan lämpötila (K)

T_y = väliaineen lämpötila riittävällä etäisyydellä pinnasta (K).

Konvektion lämmönsiirtokerroin voi vaihdella paljon riippuen rajapinnan geometriasta, väliaineen virtaustavasta ja -nopeudesta sekä väliaineen ominaisuuksista kuten viskositeetista, lämmönjohtavuudesta, tiheydestä ja ominaislämmöstä. Johtumiseen verrattuna konvektion

lämmönsiirtokertoimen määrittäminen edes jonkinlaisella tarkkuudella on huomattavasti vaikeampaa. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Pitts, Sissom 1998)

Konvektion rajapinnalla virtausnopeus on nolla johtuen niin sanotusta luistamattomuusehdosta (no-slip condition). Lähellä konvektiopintaa kitka aiheuttaa virtaavan aineen molekyylien hidastumista ja siten häiriöitä virtauksen nopeusjakaumaan. Virtauksen rajakerroksella tarkoitetaan etäisyyttä konvektiopinnasta häiriöttömään virtaukseen. Sen paksuus riippuu siitä, kuinka pitkän matkan virtaus kulkee konvektiopintaa pitkin. Lähimpänä konvektiopintaa (noin $0.1 \times$ rajakerroksen paksuus) lämmönsiirtyminen on pelkkää johtumista. Suuntaamalla virtaus kohtisuoraan konvektiopinnalle voidaan pyrkiä hajottamaan tai pienentämään tätä kerrosta. Konvektio on heikkoa myös silloin, kun kaksi konvektiorajapintaa tulevat liian lähelle toisiaan ja virtausrajakerrokset yhdistyvät. Virtaus voi olla joko laminaarista eli pyörteetöntä tai satunnaista eli turbulentsia. Laminaarinen virtaus on tehokkainta virtauksen alkukohdassa. Turbulenttisessa virtauksessa molekyylien liike tapahtuu kaikkiin suuntiin, minkä vuoksi kylmemmässä lämpötilassa olevat molekyylit pääsevät lähemmäksi konvektiorajapintaa ja lämmönsiirtymiskerroin laminaariseen virtaukseen verrattuna kasvaa. (Çengel 2003, Jahkonen 1983)



Kuva 7. Rajakerroksen muodostuminen ja virtausalueet (Çengel 2003).

Luonnollisessa konvektiossa virtausta rajakerroksen ulkopuolella ei ole. Virtausrajakerroksen sisällä väliaine virtaa lämpötilanvaihtelun aiheuttaman tiheydenmuutoksen seurauksena maan vetovoiman suuntaisesti eli virtauksen aiheuttaa nostevoima. Jos lämmin pinta on kylmemmän väliaineen yläpuolella, on lämmönsiirtyminen lähes kokonaan johtumista. (Jahkonen 1983)

Kun neste tai kaasu pakotetaan liikkeeseen lisäämällä systeemiin ulkoinen virtauksen aiheuttaja, on kyseessä pakotettu konvektio. Nostevoiman vaikutus lämmönsiirtoon on tällöin pieni eikä laitteen kiinnityssuunnalla ole yhtä suurta merkitystä lämmönsiirron kannalta. Pakotetussa konvektiossa tulee ottaa huomioon, että väliaine valitsee reitin, jolla paine on pienin. Tämän seurauksena konvektion kannalta huonosti sijoitettujen komponenttien lämpötila saattaa nousta korkeaksi ja lämpötilaerot komponenttialustan eri kohtien välillä voivat kasvaa. Tällöin komponenttialustan materiaalin lämmönjohtavuuden tai lämmönlevittimien merkitys kasvaa. Vaikka komponentin lämmitysteho olisi pieni ja jäähdyttävän virtauksen kokonaistilavuus suuri,

saattaa komponentin lämpötila nousta erittäin korkeaksi, jos virtausnopeus sen ympärillä ei ole tarpeeksi suuri. (Çengel 2003, Jahkonen 1983)

Käytännössä konvektion lämmönsiirtokerroimen arviointiin voidaan käyttää erilaisia likiarvokaavoja ja taulukoita. Tilanteeseen parhaiten sopivan yhtälön tai taulukon valinnassa voidaan turvautua erilaisiin dimensiottomiin tunnuslukuihin. Tällaisia ovat muun muassa Nusseltin luku, Reynoldsin luku, Prandtlin ja Grashofin luvut sekä Rayleigh'n luku. Nämä voidaan kirjoittaa alla olevien kaavojen avulla.

$$Nu = \frac{\alpha_k L}{\lambda} \quad (4),$$

$$Re = \frac{vL\rho}{\eta} \quad (5),$$

$$Pr = \frac{\eta c}{\lambda} \quad (6),$$

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2\Delta TL^3}{\eta^2} \quad (7),$$

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (8),$$

joissa α_k = konvektion lämmönsiirtokerroin (W/(m²·K))

L = ominaispituus (m)

λ = lämmönjohtavuus (W/(m·K))

v = virtausnopeus (m/s)

ρ = tiheys (kg/m³)

η = viskositeetti (kg/(m·s))

c = ominaislämpö (J/(kg·K))

g = kiihtyvyys (9,81 m/s²)

β = tilavuuden lämpölaajenemiskerroin (1/K)

ΔT = konvektiopinnan ja riittävällä etäisyydellä siitä olevan väliaineen lämpötilaero (K).

Nusseltin luku ilmaisee väliaineen läpi tapahtuvan konvektion ja johtumisen suhteen. Mitä suurempi Nusseltin luku on, sitä suurempi osa väliaineen lämmönsiirrosta on konvektiota. Pelkkää johtumista lämmönsiirto on silloin, kun Nu=1. Virtauksen tyyppi voidaan päätellä Reynoldsin luvun avulla. Erilaisille pinoille voidaan ilmoittaa kriittisiä Reynoldsin lukuja, joilla virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi. Prandtlin luku puolestaan kuvaa väliaineen

virtausrajakerroksen ja termisen rajakerroksen suhteellista paksuutta. Termisellä rajakerroksella tarkoitetaan sitä matkaa konvektiopinnasta, jolla virtaavan väliaineen lämpötilanvaihtelut ovat merkittäviä. Mitä alhaisempi Prandtin luku on, sitä paksumpi on väliaineen termisen rajakerros virtausrajakerrokseen nähden. Grashofin luku ilmaisee luonnollisen konvektion nostevoimien ja viskoottisten kitkavoimien välisen suhteen ja kertoo onko luonnollisen konvektion virtaus laminaarista vai turbulენტista. Pakotetussa konvektiossa esiintyy myös nostevoimia, jotka ovat merkittäviä silloin, kun $Gr/Re^2 \gg 1$. Likiarvoyhtälöt ja taulukot esitetään usein tietyille Rayleigh-luvun arvoille sopiviksi, joten sen laskeminen on tarpeellista oikean menetelmän valitsemiseksi. (Çengel 2003, Jahkonen 1983)

Jahkosen (1983) mukaan luonnollisen ja pakotetun konvektion lämmönsiirtokerrointen voidaan näiden tunnuslukujen avulla käytännössä arvioida olevan

$$\alpha_{k-l} = \frac{\lambda B (Ra)^d}{L} \quad (9),$$

$$\alpha_{k-p} = \frac{\lambda B (Re)^e (Pr)^d}{L} \quad (10).$$

Näissä α_{k-l} = luonnollisen konvektion lämmönsiirtokerroin ($W/(m^2 \cdot K)$)

α_{k-p} = pakotetun konvektion lämmönsiirtokerroin ($W/(m^2 \cdot K)$)

λ = lämmönjohtavuus ($W/(m \cdot K)$)

B = eri muotoisille kappaleille kokeellisesti määritetty konvektiotyypistä riippuva vakio

Ra = Rayleigh'n luku

d = eri muotoisille kappaleille kokeellisesti määritetty konvektiotyypistä riippuva vakio

L = pinnan ominaispituus (m)

Re = Reynoldsin luku

e = eri muotoisille kappaleille kokeellisesti määritetty vakio

Pr = Prandtin luku

3.3 Lämpösäteily

Kolmas lämmönsiirtomekanismi on lämpösäteily, jossa lämpöenergia siirtyy valon nopeudella kulkevien elektromagneettisten aaltojen välityksellä. Toisin kuin johtumisessa ja konvektiossa, lämpösäteilyssä energia voi siirtyä ilman väliainetta. Johtumisen ja konvektion voimakkuuden riippuvuus lämpötilaerosta on lähes lineaarista, kun taas lämpösäteily on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Lämpösäteilyä voidaan kuvata yhtälöllä

$$\dot{Q}_s = A_s \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_y^4) \quad (11),$$

jossa \dot{Q}_s = lämpösäteilyn lämmönsiirtoteho (W)

A_s = lämpöä säteilevän pinnan ala (m²)

ε = emissiokerroin

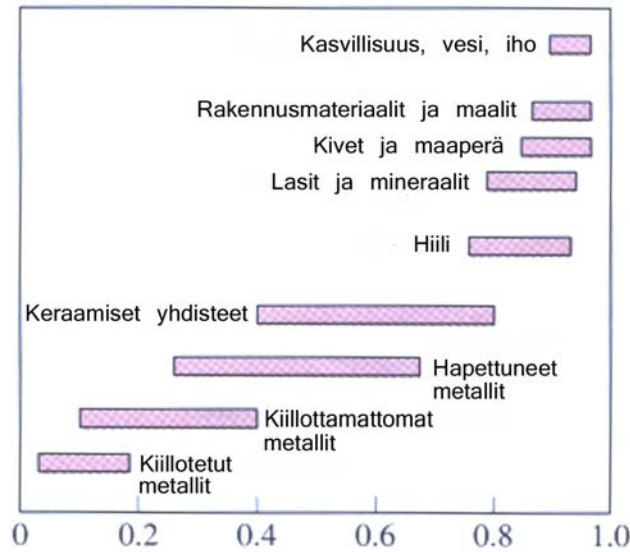
σ = Stefan Boltzmannin vakio (5,67·10⁸ W/(m²·K⁴))

T_p = säteilevän pinnan absoluuttinen lämpötila (K)

T_y = riittävällä etäisyydellä sijaitsevan ympäristön pinnan absoluuttinen lämpötila (K).

Lämpösäteily, kuten muutkin elektromagneettisen säteilyn lajit, absorboituu, läpäisee tai heijastuu kohdatessaan rajapinnan. Läpinäkymättömillä ja läpikuultamattomilla kiinteillä aineilla tapahtuu pääasiassa vain absorptiota ja heijastumista niiden pinnalla. Lämpösäteily voi myös siirtyä kylmän väliaineen läpi lämpimältä kappaleelta toiselle. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on suurempi kuin absoluuttisen nollapisteen lämpötila, emittoivat lämpösäteilyä jatkuvasti. Kappaleen pinnan ominaisuudet ja materiaali vaikuttavat emittoituneen lämpöenergian määrään. Pääsääntöisesti huokoisten ja kiiltämättömien materiaalien emissiokertoimet ovat korkeita eli ne säteilevät lämpöä hyvin. Lämpösäteilyn maksimiarvon mittarina voidaan käyttää mustaa kappaletta, joka toimii ideaalisena säteilyn emittoijana ja absorboijana. Lämpösäteilyn aiheuttama lämmönsiirto tulisi aina huomioida lämmönsiirtoa tarkasteltaessa, sillä sen osuus on varsinkin luonnollisen konvektion yhteydessä yleensä merkittävä, jopa noin 50 %. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Pitts, Sissom 1998)

Jäähdytyksen kannalta tärkeää on minimoida jäähdytettävän kappaleen lämpösäteilyn absorptio ja maksimoida emissio. Lämpösäteilyn emissio ei riipu kappaleen väristä, mutta musta kappale absorboi hyvin valoalueen energiaa. Vaalea jäähdytyslevy saattaa siis olla parempi kuin tumma. Absorptio täytyy minimoida myös siksi, että varsinkin umpinaisten laitteiden sisällä osa emittoituvasta lämpösäteilystä heijastuu takaisin emittoivalle pinnalle. Laitteiden sisällä emissiokertoimen tilalla tulee käyttää niin sanottua näkyvyyskerrointa, joka kertoo kuinka suuri osa lämpösäteilystä päätyy sille suunniteltuun kohteeseen. Toisin sanoen, laitteen sisällä tulee varmistaa, ettei lämpimän komponentin lämpösäteily lämmitä toista komponenttia vaan kohdistuu jäähdyttävälle pinnalle. (Jahkonen 1983)



Kuva 8. Eri tyyppisten materiaalien emissiokerrointen suuruusluokat (Çengel 2003).

3.4 Kiehumisen ja tiivistyminen

Kiehumiselle ja tiivistymiselle ominaista on väliaineen liike, jonka vuoksi ne voidaan luokitella konvektioksi. Ne ovat kuitenkin muuhun konvektioon nähden olennaisesti erilaisia lämmönsiirtomekanismeja, joiden lämmönsiirtokertoimet ovat tyypillisesti yksifaasiisiin lämmönsiirtomekanismeihin verrattuna huomattavasti suurempia, parhaimmillaan jopa yli 1000-kertaisia. Sopivassa paineessa ja lämpötilassa neste muuttuu kaasuksi sitoen samalla valtavan määrän lämpöenergiaa, joka vapautuu kaasun tiivistyessä takaisin nesteeksi. Kiehumistyyppistä riippuen nesteen ja kaasun virtausta voidaan lisätä, jolloin lämmönsiirto paranee. (Çengel 2003, Jahkonen 1983)

3.5 Lämpöresistanssi

Lämmönsiirtyminen on monimutkainen ilmiö, johon vaikuttaa useita erilaisia tekijöitä. Monimutkaisten laskumenetelmien käyttö on usein kuitenkin turhaa, sillä elektroniikkalaitteiden jäähtytyksen kannalta olennaista on taata riittävä lämmönsiirto kaikissa tilanteissa, myös silloin, kun laitetta käytetään jatkuvasti maksimiteholla. Tässä tapauksessa olosuhteet ja ominaisuudet voidaan olettaa vakioiksi ja lämmönsiirtoa analysoida lämpöresistanssin avulla (Çengel 2003).

Lämmönsiirtovastus eli lämpöresistanssi kertoo kuinka paljon väliaine vastustaa lämmönsiirtoa sen läpi. Siirrettävä häviöteho voidaan laskea lämpöresistanssin ja lämpötilaeron avulla yhtälöstä

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (12),$$

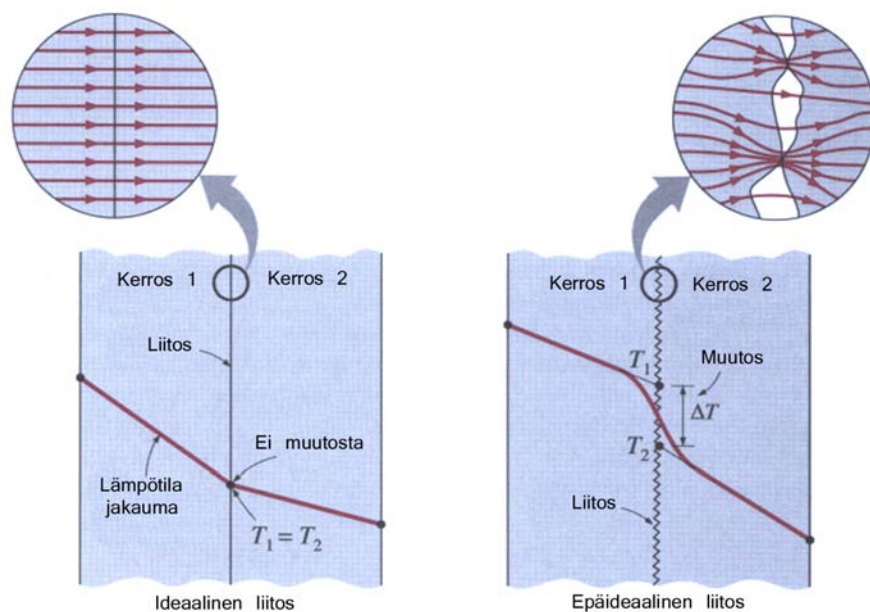
jossa \dot{Q} = lämmönsiirtoteho (W)

ΔT = lämpötilaero (K)

R = lämpöresistanssi (K/W).

Häviölämpö saadaan siis poistettua systeemistä sitä paremmin, mitä pienempi systeemin kokonaislämpöresistanssi on. Tarkasteltaessa lämmönsiirtoa useiden väliainekerrosten läpi, voidaan kunkin kerroksen lämpöresistanssit lämmönsiirtomekanismeista ja lämmönsiirtoreittien määrästä riippuen laskea yhteen kokonaislämpöresistanssiksi samaan tapaan kuin sarjaan ja rinnan kytketyt resistanssit sähköpiireissä. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Pitts, Sissom 1998)

Eri väliaineiden lämpöresistanssien huomioiminen ei kuitenkaan riitä vaan mukaan pitää laskea väliainerajapintojen kontaktiresistanssit, jotka aiheutuvat liitosten epätasaisuudesta ja väliin jäävistä eristävästä ilmaraoista. Kuvasta yhdeksän nähdään, että käytännössä liitoksessa esiintyy aina kontaktiresistanssia, jonka seurauksena liitoksessa tapahtuu lämpötilan muutos. Vaikka lämpötilaeron kasvaessa lämmönsiirto paranee, täytyy muistaa, että tämä lämpötilaeron kasvu tarkoittaa jäädytettävän komponentin lämpötilan nousua. Kontaktiresistanssin suuruus riippuu pintojen epätasaisuudesta, materiaaleista, rajapinnan lämpötilasta ja paineesta sekä loukkuun jääneen ilman tai muun epäpuhtauden ominaisuuksista. Aina, kun kyseessä on lämmönsiirto useamman kuin yhden väliaineen läpi, pitää kontaktiresistanssin osuus kokonaislämpöresistanssista arvioida ja ottaa huomioon laskuissa silloin, kun se on merkittävä. Yleensä kontaktiresistanssin osuus kokonaislämpöresistanssista on suuri hyvillä lämmönjohteilla. Kontaktiresistanssia voidaan pienentää lisäämällä väliainerajapintojen väliin hyvin lämpöä johtavia nesteitä, kaasuja, faasimuunnosmateriaaleja tai erittäin ohuita metallikalvoja. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Pitts, Sissom 1998)



Kuva 9. Liitoksen kontaktiresistanssi (Çengel 2003).

Systeemin kokonaislämpöresistanssi muodostuu sen osien johtumis-, konvektio- ja lämpösäteilyresistansseista sekä kontaktiresistansseista. Kokonaislämpöresistanssiverkossa johtumis- ja konvektiovastukset ovat yleensä sarjassa ja konvektio- ja säteilyvastukset tyypillisesti rinnan. Homogeenisen väliainekerroksen johtumislämpöresistanssi voidaan laskea yhtälöstä

$$R_j = \frac{\Delta x}{\lambda A_j} \quad (13),$$

jossa Δx = väliaineen paksuus (m)

λ = lämmönjohtavuus (W/(m·K))

A_j = johtumisen lämmönsiirtopinta-ala (m²).

Jos materiaalin lämmönjohtavuus on suuri, johtumislämpöresistanssi on pieni. Hyvin lämpöä johtavia materiaaleja käytettäessä kontaktiresistanssien merkitys kasvaa. Konvektion lämpöresistanssi saadaan

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k A_k} \quad (14),$$

jossa α_k = konvektion lämmönsiirtokerroin (W/(m²·K))

A_k = konvektion lämmönsiirtopinta-ala (m²).

Konvektion lämmönsiirtokerroimen määrittäminen käytännössä on kuitenkin erittäin ongelmallista. Säteilylämpöresistanssin suuruus riippuu pintojen emissiosta ja absorptiosta sekä näkyvyyskerroimesta suhteessa muihin pintoihin. Säteilylämpöresistanssin voimakas riippuvuus pinnan absoluuttisesta lämpötilasta on syytä muistaa. Säteilylämpöresistanssin suuruus voidaan arvioida likiarvoyhtälöstä

$$R_s = \frac{1}{4\varepsilon\sigma T_p^3 A_s} \quad (15),$$

jossa ε = pinnan emissiokerroin

σ = Stefan-Boltzmannin vakio (W/(m²·K⁴))

T_p = säteilevän pinnan absoluuttinen lämpötila (K)

A_s = lämpöä säteilevän pinnan ala (m²).

Kontaktiresistanssien laskeminen on vaikeaa, joten käytännössä niiden suuruus samoin kuin käytön myötä lisääntyvien lämpöresistanssien suuruus, ovat mittauksiin tai aiempiin kokemuksiin perustuvia arvioita. Kontaktiresistanssi voidaan laskea käyttäen hyväksi yhtälöä 12,

jos liitoksen aiheuttaman lämpötilanmuutoksen suuruus tunnetaan. (Çengel 2003, Jahkonen 1983)

Pitts ja Sissom (1998) huomauttavat lisäksi, että pinnoille muodostuu ajan myötä epäpuhtauskerrostumia ja materiaalivirheitä, jotka lisäävät lämpöresistanssia. Nämä tulee myös ottaa huomioon kokonaislämpöresistanssia arvioitaessa.

3.6 Lämpökapasitanssi ja aikavakio

Laitteissa, joissa häviölämpöteho vaihtelee, tulee ottaa huomioon myös käytettävien materiaalien lämpökapasitanssi, joka tasaa eri suuruisten lämpöhäviöiden aiheuttamia lämpötilanvaihteluita. Lämpökapasitanssi määritellään

$$C_p = mc = \frac{\dot{Q} \Delta t}{\Delta T} \quad (16),$$

jossa C_p = lämpökapasitanssi (J/K)

m = massa (kg)

c = ominaislämpö (J/(kg·K))

\dot{Q} = lämpöteho (W)

Δt = ajan muutos (s)

ΔT = lämpötilan muutos (K).

Systeemin osien lämpötilaero tietyssä hetkenä tai tietyn lämpötilaeron saavuttamiseen kuluva aika voidaan päätellä yhtälöstä

$$\Delta T_t = \Delta T_\infty - e^{-\frac{t}{RC}} (\Delta T_\infty - \Delta T_0) \quad (17),$$

jossa ΔT_t = lämpötila hetkellä t (K)

ΔT_∞ = lopullinen lämpötila (K)

ΔT_0 = lämpötila hetkellä $t=0$ (K)

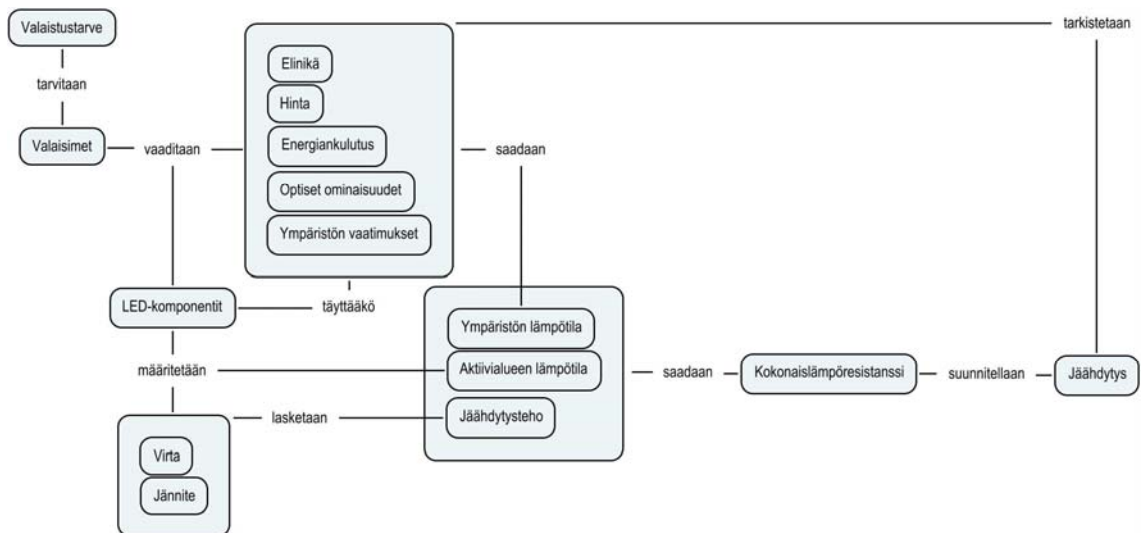
RC = systeemin aikavakio (s).

Systeemin aikavakion avulla voidaan päätellä, kuinka kauan lämpötilan vaihteluiden tasoittuminen systeemissä kestää. (Çengel 2003, Jahkonen 1983) LED-valaisinten osalta käyttöjaksot ovat kuitenkin pitkiä ja häviötehojen vaihtelu pientä, joten niiden osalta lämpökapasitanssien ja aikavakioiden tarkastelu ei ole oleellista.

3.7 Yhteenveto

Elektroniikkalaitteiden jäähdytyksessä ei ole kyse mahdollisimman suurten lämpötehojen siirtämisestä vaan komponenttien lämpötilan saattamisesta tarpeeksi alhaiselle tasolle. Suunnittelussa onkin lähdettävä liikkeelle siitä, että ensin määritellään sallittu komponentin maksimikäyttölämpötila ja tehonkulutus, joiden avulla arvioidaan komponentin ja ulkoilman välinen pienin lämpötilaero sekä jäähdytystehon tarve. Tämän jälkeen laitteen rakenne ja jäähdytys voidaan suunnitella niin, että sen osien johtumis-, konvektio-, ja lämpösäteily- sekä kontaktiresistanssien yhdessä muodostama kokonaislämpöresistanssi on tarpeeksi alhainen pitämään komponenttien lämpötilat alhaisina. Komponenttien lisäksi muutkin laitteen osat saattavat olla herkkiä lämpötilan nousulle, mikä tulee huomioida maksilämpötilaa määriteltäessä.

Lämmönsiirtokerrointen parantaminen auttaa lämpöresistanssin pienentämisessä, mutta kuten aiemmin mainituista yhtälöistä voimme päätellä, myös lämmönsiirtopinta-alan merkitys on suuri. Alhaisen lämpöresistanssin saavuttamiseksi lämmönsiirtoon osallistuva tehollinen pinta-ala tulee lämmönsiirtomekanismista riippumatta maksimoida. Pieni laitekoko on kuitenkin monien sovellusten osalta olennainen tekijä, mikä aiheuttaa rajoitteita pinta-alan maksimoinnille ja siten vaikeuttaa jäähdytyksen suunnittelua. Jäähdytystä suunniteltaessa tulee lisäksi muistaa, että lämpötilanvaihtelut eivät saa olla liian suuria ja nopeita, sillä ne aiheuttavat materiaaleissa mekaanisia siirtymiä ja jännityksiä, jotka johtavat komponenttien ja muiden osien rakennemateriaalien vaurioitumiseen.

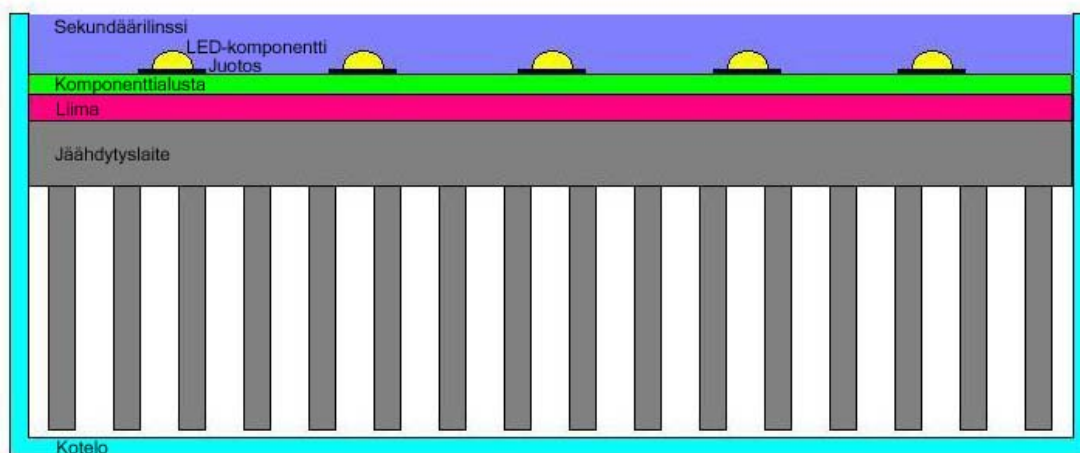


Kuva 10. LED-valaisimen jäähdytyssuunnittelussa huomioitavat peruslähtökohdat

4 Lämmönsiirto LED-valaisimen rakenteissa

LED-komponenteilla toteutettavien valaisinten suunnittelumahdollisuudet ovat rakenteen, valaistusominaisuuksien ja käyttökohteiden kirjon myötä valtavat eikä yhtä tiettyä tapaa LED-valaisimen kokoamiselle ole. Yleisesti ottaen LED-valaisin koostuu yhdestä tai useammasta LED-komponentista, piirilevystä tai komponenttialustasta, ohjauselektronikasta, optisesta linssisysteemistä sekä jäähdytys-elementistä. Lisäksi yleensä tarvitaan vaatimusten mukainen, komponentteja ympäristön vaikutuksilta suojaava kotelo. Kokonaislämpöresistanssi on sitä pienempi, mitä paremmin kunkin osan ja niiden välisten rajapintojen lämpö- ja kontaktiresistanssit voidaan minimoida.

Seuraavissa kappaleissa esitellään tyypillisen LED-valaisimen lämmönsiirron kannalta olennaisimmat rakenneosat ja periaatteelliset keinot pienentää näiden osien ja niiden liitoskohtien lämpöresistansseja. Simulaatioiden avulla pyritään havainnollistamaan joidenkin ominaisuuksien vaikutusta rakenneosien lämpöresistansseihin sekä huonoimpien ja parhaimpien vaihtoehtojen välisiä eroja systeemitason lämmönhallinnan kannalta. Vaikka tämän työn tarkoitus on keskittyä jäähdytys-elementtien tarkasteluun, on muidenkin LED-valaisimen osien merkitys lämmönhallinnan kannalta tärkeä ymmärtää.



Kuva 11. LED-valaisimen rakenneosat: sekundäärioptiikka, LED-komponentit, juotokset, komponenttialusta, liima, jäähdytyslaite sekä kotelo.

4.1 Linssioptiikka

Suurin osa häviölämmöstä kulkeutuu pois LED-komponentista sen pohjan ja pohjan alla olevien kerrosten kautta. Tämä johtuu siitä, että primäärin ja sekundäärin linssisysteemin muodostaman lämmönsiirtoreitin lämpöresistanssi on huomattavasti suurempi. Primäärilinssisysteemi koostuu täytemateriaalista ja linssistä, jotka ovat pääasiassa epokseja tai silikonipolymeereja. Lisäksi primäärilinssisysteemi saattaa sisältää happiyhdisteitä, jotka läpäisevät hyvin valoa. Varsinkin silikoniyhdisteiden käyttö on kasvussa johtuen niiden hyvistä

optisista, fyysisistä ja termisistä ominaisuuksista. LED-valaisimelta vaadittava valonjako täytyy yleensä tuottaa sekundäärioptiikalla, jonka valmistamiseen käytetään myös polymeerejä, kuten akryylilasia tai polykarbonaatteja, joiden lämmönjohtavuus on myös suhteellisen alhainen. (Dow Corning 2009, Schubert 2006, Wiley-VHC 2009)

Jos häviölämpöä saataisiin tehokkaasti johdettua sekundäärilinssin ja ympäristön rajapinnalle, voisi lämmönsiirto optiikan kautta auttaa valaisimen jäähtymisessä. Optiikoiden väliset kontaktit ovat kuitenkin termisesti heikkoja ja materiaalien lämmönjohtavuus huono. Lämpösäteilyä läpinäkyvissä rakenteissa tapahtuu, mutta sekin on varsinkin alhaisissa lämpötiloissa vähäistä, joten kaiken kaikkiaan lämmönsiirto optiikan kautta on heikkoa. Parannukset ovat mahdollisia, mutta linssisysteemien kehityksessä on ainakin tähän asti keskitytty optisten ominaisuuksien parantamiseen, jotta LED-valaisinten valotehokkuus olisi mahdollisimman hyvä. Valotehokkuuden tuplaaminen pienentää valaisimen tehonkulutusta ja siten myös jäähdytettävää lämpömäärää lähes 50 prosenttia.

4.2 LED-komponentti

LED-komponenttien rakenne ja materiaalit vaihtelevat paljon käyttötarkoituksen ja valmistajan mukaan, mutta yleisesti ottaen nykyiset korkeatehoiset, hetero-quantikaivorakenteiset, valkoista valoa tuottavat LED-komponentit muodostuvat useista hyvin ohuista yhdistepuolijohdekerroksista ja sähköä johtavista metalloinneista. Näiden päällä on läpinäkyvä, taittava, kemiallisesti ja termisesti stabiili, usein silikonikerroksesta ja muovista koostuva primäärioptiikka ja alla komponentin oma jäähtyselementti. Näitä ympäröi kotelo, joka suojaaa komponenttia mekaanisilta rasituksilta ja ympäristön vaikutuksilta sekä mahdollistaa hyvän mekaanisen, sähköisen ja termisen kiinnityksen piirilevyyn tai alustaan. Elektrostaattiset purkaukset optoelektronisissa laitteissa ovat yleinen rikkoutumisten aiheuttaja, joten lämpösuunnitelussa tulee huomioida myös materiaalien sähkönjohtavuus. Lämpöä syntyy pääosin aktiivialueella, mutta varsinkin suurilla virroilla merkittävästi myös liittimien ja suojakerrosten resistanssien seurauksena. (Harper 2004, Schubert 2006)

Komponentin rakenteissa lämpö siirtyy johtamalla, sillä läpinäkymättömissä kiinteissä aineissa ei esiinny säteilyä eikä konvektiota. Yhtälön 13 mukaisesti lämpöresistanssia aktiivialueen ja pohjan välillä voidaan pienentää lyhentämällä niiden välistä etäisyyttä, kasvattamalla pinta-alaa ja/tai käyttämällä paremmin lämpöä johtavia materiaaleja. Jos komponentti syystä tai toisesta valmistetaan huonosti lämpöä johtavalle substraatille, voidaan lämmönsiirtoa parantaa käyttämällä niin sanottua flip-chip -tekniikkaa, jossa siru asennetaan komponentin sisään ylösalaisin, jolloin parempin lämpöä johtava puoli sirusta saadaan päälämmönsiirtoreitille (Arima 2009).

Optisista syistä komponentin diodit sijoitetaan lähelle toisiaan, jolloin lämpövuoto aktiivialueen lähellä on erittäin suuri (Treurniet, Lammens 2006). Lämpötilagradientit komponentin sisällä

ovat kuitenkin yleensä pieniä johtuen materiaalien suhteellisen korkeasta lämmönjohtavuudesta (Yuan et al. 2006). Komponentin sisäiseen lämmön levittämiseen ja lämpölaajenemiskerrointen sovittamiseen voidaan käyttää CVD-timanttitytteitä sekä erilaisia puolijohdemateriaaleja kuten piikarbideja sekä pii- ja alumiininitridejä (Saums et al. 2006). Schubertin (2006) mukaan lämpövuon pienentämiseksi komponentin pohjaan rakennetaan usein oma pieni jäähdetykskappale esimerkiksi alumiinista tai kuparista. Tällaisten komponenttien lämpöresistanssien odotetaan kehityksen myötä laskevan alle 5 K/W lukemiin. Aktiivisilla jäähdetyksen menetelmillä voidaan ainakin mikroprosessorien komponenttitasolla päästä jopa alle 0.5 K/W lämpöresistansseihin. Lämpölaajenemiskertoimen osalta kuparin yhteensopivuus muiden komponenttimateriaalien kanssa on kuitenkin yleensä heikko. Parempi yhteensopivuus puolijohdepakkauksissa voidaan toteuttaa volframi-kupari -seoksilla, kupari-molybdeeni-kupari -laminaateilla, timanttipiikarbideilla, metallikomposiittimateriaaleilla tai rauta-nikkeli-koboltti -yhdisteillä kuten Kovarilla (Saums et al. 2006).



Kuva 12. LED-komponentin rakenne (Dow Corning 2009).

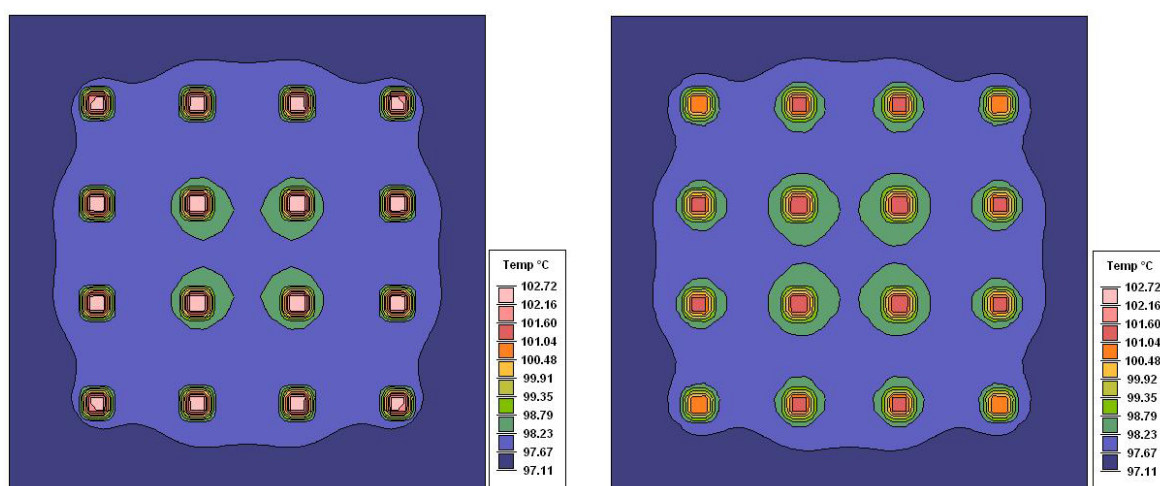
4.3 Juotos

Komponentin asennustapa vaikuttaa myös merkittävästi lämmönsiirtoon. Pienet ja kevyet komponentit, kuten LEDit, eivät välttämättä tarvitse ylimääräistä mekaanista tukea ja ne voidaan kiinnittää piirilevyyn tai muuhun alustaan melko tukevasti pelkkien lankaliitosten avulla. Tällöin komponentin ja komponenttialustan väliin saattaa kuitenkin jäädä huonosti lämpöä johtava rako. Lämpöresistanssin pienentämiseksi komponenttien kiinnityksessä kannattaa komponentin ja komponenttialustan välillä käyttää niin sanottuja TIM1-materiaaleja. Nämä ovat hyvin lämpöä johtavia liimoja, geelejä tai faasimuunnosmateriaaleja, joilla voidaan varmistaa liitokseen jäävien ilmarakojen vähyyttä. Komponentin ja alustan välinen lämpöresistanssi koostuu siis sekä liitosmateriaalin resistanssista että kontaktiresistansseista liitosmateriaalikerroksen molemmilla rajapinnoilla. Kontaktiresistanssien osuus kokonaisresistanssista kasvaa materiaalien lämmönjohtavuuden parantuessa ja siksi hyvän puristusvoiman lisäksi liitoskohdissa tulee

varmistaa pintojen puhtaus ja tasaisuus. Lisäksi tulee huomioida, että olosuhteiden vaihtelun ja ajan myötä pinnat kaareutuvat ja liikkuvat toisiinsa nähden ja puristusvoima heikkenee, eli kontaktilämpöresistanssi kasvaa. Liitosmateriaalin määrään, levitykseen ja paksuuteen tulee myös kiinnittää huomiota, sillä liika materiaali saattaa aiheuttaa ongelmia työntyessään ulos liitosalueelta. Toisaalta materiaalia pitää olla tarpeeksi koko pinnan alueelle ja pinnankarheuksien tasoittamiseksi. Luotettavuuden takaamiseksi liitosmateriaalilta vaaditaan liitospintoihin sovitettua lämpölaajenemiskerrointa (CTE-sovitus) ja ympäristöystävällisyyden nimissä myös lyijyttömyyttä. (Harper 2004, Jahkonen 1983, KOTEL 84-008-A, Lasance et al. 2006, Saums et al. 2006, Yu et al. 2008)

4.4 Komponenttialusta

Komponenttien kiinnittäminen suoraan jäähdytyselementin päälle on mahdollista, mutta luotettavan mekaanisen ja sähköisen liitoksen aikaansaaminen on hankalaa ja yleensä välissä käytetäänkin piirilevyä. Alusta tulee valita niin, että sen lämpölaajenemiskerroin on yhteensopiva siihen kiinnittyvien materiaalien lämpölaajenemiskerrointen kanssa, jotta lämpölaajenemisen aiheuttamat jännitykset ovat vähäisiä (Treurniet, Lammens 2006). Alustan tarkoitus on myös taata sähkövirran kulku virtalähteeltä piirin kaikkiin komponentteihin sekä varmistaa, että komponentit pysyvät paikallaan. Lämmönhallinnan kannalta kiinnitysalustan käyttäminen yleensä lisää kokonaislämpöresistanssia johtuen kontakti- ja johtumisresistanssien kasvusta. Hyvän komponenttialustan avulla lämpö voidaan levittää tasaisesti suurelle pinta-alle ja alla olevalle jäähdytyselementille, jolloin lämmönsiirto paranee. Kuvasta 13 nähdään, että esimerkiksi lisäämällä kuparin määrää ja pinta-alaa komponenttialustalla voidaan parantaa lämmön leviämistä.



Kuva 13. Komponenttialustan kuparoinnin lisäämisen vaikutus komponenttialustan lämpötilajakaumaan.

Komponentilta alustaan tuleva lämpö johtuu alustassa niin sanotun johtumispuuden etäisyydelle komponentin reunoista. Jotta jäähdytyspinta-ala olisi mahdollisimman suuri, pitää

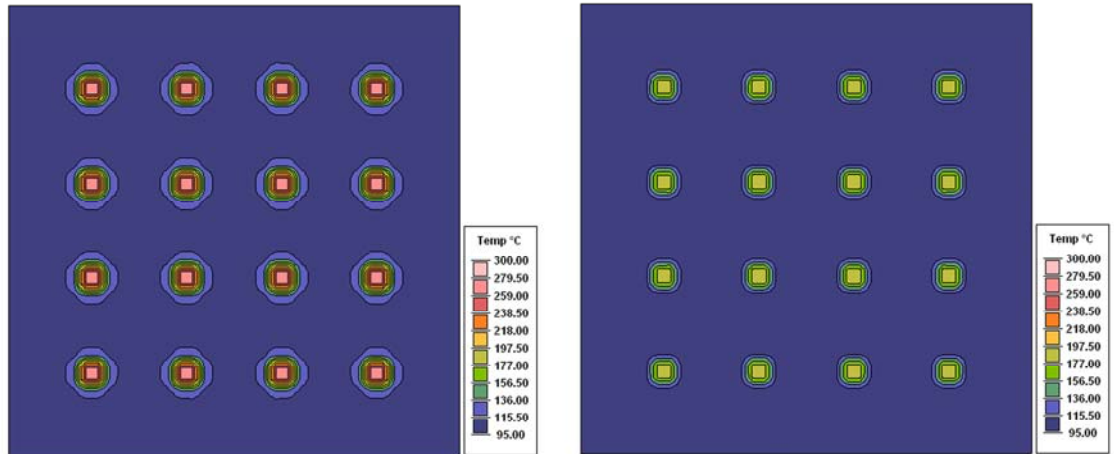
johtumispituuden olla mahdollisimman suuri. Jos kyseessä on useita komponentteja, tulisi johtumispituuden olla komponenttien välimatkan suuruusluokkaa. Jos johtumispituus on pieni, voivat lämpötilaerot komponenttialustalla olla suuria riippuen alustan lämmönjohtavuudesta, kuparoinnista, alustan asennosta ja geometriasta sekä ilman virtauksesta komponenttialustan pinnalla. Lämpötiloihin vaikuttaa myös komponenttien määrä ja sijainti alustalla. (Jahkonen 1983, KOTEL 84-008-A) Kabirin ja Ortegan (1998) mukaan kokonaislämpöresistanssia voidaan laskea lisäämällä komponenttien lukumäärää komponenttialustalla, koska tällöin lämpö leviää paremmin koko alustan pinta-alalle. LED-valaisimeen käytettävien LED-komponenttien lukumäärää valittaessa kannattaa siis harkita useamman pienempitehoisen komponentin käyttöä muutaman suuritehoisen sijaan, jos se optiset vaatimukset huomioon ottaen on mahdollista.

Komponenttialustan lämmönsiirto-ominaisuuksia voidaan parantaa myös lisäämällä alustaan lämpöläpivientejä eli täytettyjä tai täyttämättömiä reikiä. Näiden kokoa, täytemateriaalia ja sijaintia suunniteltaessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon niiden mukanaan tuomat riskit kuten lisääntynyt pintojen epätasaisuus tai sähköiset oikosulkureitit. (Yu et al. 2008)

4.5 Liima

Komponenttialustan kiinnityksessä jäähdytys-elementtiin tulee huomioida pitkälti samat asiat kuin aiemmin mainitussa komponenttien kiinnityksessä komponenttialustaan. Luotettavuuden kannalta nämä kiinnityskohdat ovat olennaisen tärkeitä varsinkin mekaanisesti, sillä yksi yleisimmistä rikkoutumissyistä on lämmönvaihtelusta aiheutuva liitoksen pettäminen. Rikkoutuminen voi johtua joko liiman pettämisestä tai liitetyn materiaalin pettämisestä. Jos liimakerros on paksu, pettävät liitetyt materiaalit useimmiten ensin. (Sang-jeon et al. 2007, Yu et al. 2008).

Hyvät materiaalivalinnat, prosessien yhdenmukaisuus ja luotettavuustestaus ovat liitoksen kestävyuden kannalta olennaisia tekijöitä. Liima-aineen levityspinta-alaksi suositellaan ainakin 50 %, sillä vaikka pinta-ala olisi suuri, voi kiinnitysvoima heiketä jopa 50 % materiaalien pettämisen seurauksena. Suositeltava liiman paksuus on materiaaleista riippuen noin 0,2-0,3 mm. Levitettävän liiman tilavuus, liitospaine ja sen tasaisuus sekä painoaika tulee valita huolella, jotta liimakerroksen paksuus ja kiinnityspinta-ala saadaan sopiviksi. Liimakerroksen täytyy siis kestää lämmönvaihtelun aiheuttamaa mekaanista stressiä, mutta se on myös oleellinen vaikuttaja valaisimen lämpöresistanssiverkossa. Puristusvoiman heikkeneminen ja rakoilut liitosmateriaalissa lisäävät kontaktiresistanssia huomattavasti. (Jahkonen 1983, Sang-jeon et al. 2007)



Kuva 14. Liimakerroksen paksuuden vaikutus komponentin lämpötilaan. Vasemmalla 0,5 mm liimakerros, oikealla 0,2 mm.

4.6 Jäähdytyslaite

Tässä työssä keskitytään jäähdytyslaitteisiin, joita tarkastellaan lähemmin luvuissa viisi ja kuusi.

4.7 Kotelo

Valaisimen osat tulee aina suojata ympäristössä esiintyviltä toimintaa haittaavilta tekijöiltä kuten kosteudelta, pölyltä tai muilta epäpuhtauksilta. Käyttökohteesta riippuen suojaukselta vaaditaan tietty tiiviys, joka voidaan ilmaista niin sanotun IP-luokan avulla. Lisäksi valaisimen ulkorakenteiden suunnittelussa tulee huomioida valaisimen optimaalinen valoikeila, monipuoliset ja käytännölliset asennusmahdollisuudet, kestävyys sekä yhä enenevässä määrin myös esteettiset ominaisuudet kuten väri, muoto ja materiaali.

Kotelon lämpöresistanssi muodostuu pääasiassa jäähdytyselementin ja kotelon ulkopinnan sekä kotelon ulkopinnan ja ympäristön välisistä lämpöresistansseista. Lämpötilaero kotelon sisä- ja ulkopintojen välillä on yleensä pieni ja seinämien aiheuttama johtumislämpöresistanssi alhainen. Kotelon seinämien materiaali tai paksuus eivät ole lämmönsiirron kannalta olennaisimpia vaan tärkeämpää on varmistaa, että ulkopinta-ala on tarpeeksi suuri ja että sen ominaisuudet, kuten pinnanmuodot ja emissiivisyys, ovat suotuisat konvektiolle ja lämpösäteilylle. Pinnan absorptio-ominaisuudet on käyttökohteesta riippuen myös hyvä huomioida, jottei pinta vastaanota liian hyvin ympäristössä olevaa lämpösäteilyä. (Jahkonen 1983, Shabany 2007)

Kotelon lämmönsiirtoa haittaava vaikutus johtuu pääasiassa sen ilmavirtaa heikentävästä ominaisuudesta. Umpinainen kotelo jäähdytysprofiilin ympärillä pienentää virtausnopeutta ja siten myös konvektiota profiilin ja kotelon välillä olettaen, että rajakerros profiilin jäähdytyspinnoilla on tarpeeksi paksu konvektion syntymiseen. Rei'illä voidaan parantaa lämmönsiirtoa huomattavasti, mutta tällöin tulee huomioida, että kotelon tiiviys kärsii eikä laitetta voida käyttää likaisissa ja kosteissa tiloissa. Vaihtoehtoisesti jäähdytyselementti, tai

ainakin sen jäähdytyspinnat, kannattaa sijoittaa kotelon ulkopuolelle paikkaan, jossa ilma pääsee virtaamaan vapaasti. (Jahkonen 1983)

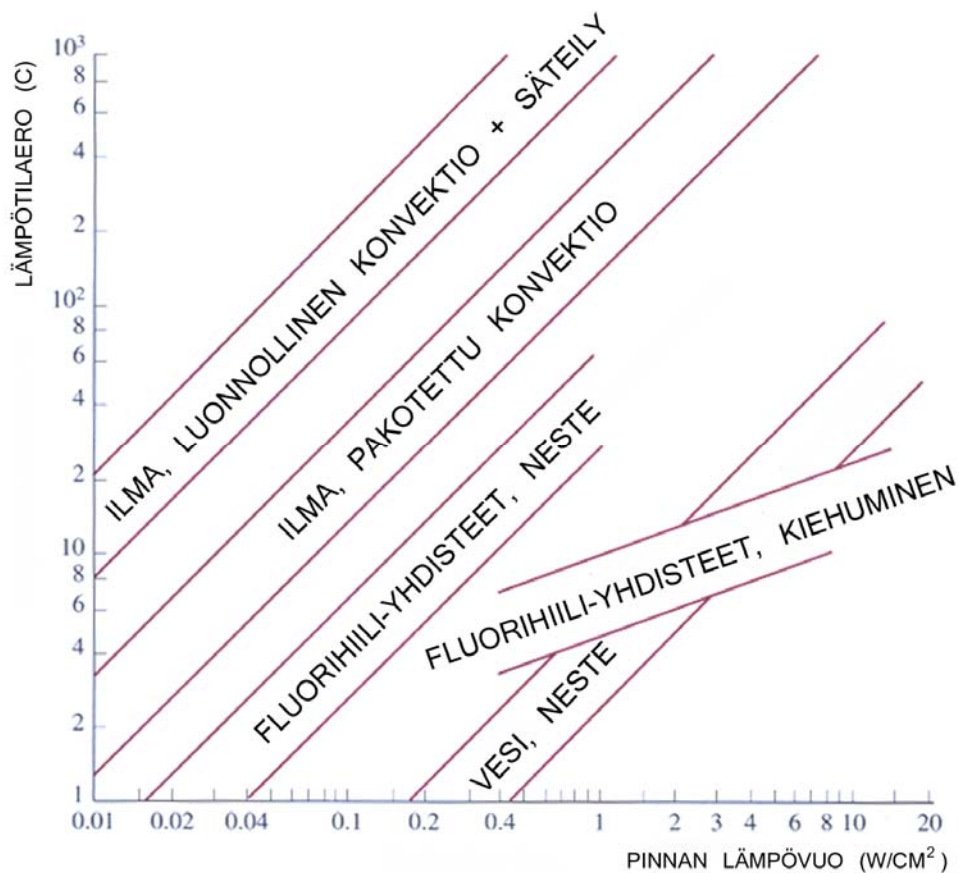
Eryisesti tiheäeväisissä jäähdytysprofileissa pölyntyminen ja likaantuminen voivat haitata lämmönsiirtoa. Evien pinnoille kerääntyvän pölyn eristävät ominaisuudet eivät merkittävästi lisää lämpöresistanssia evän ja ympäristön välillä, mutta evien päätyihin pakkautuva pöly sen sijaan voi merkittävästi lisätä lämpöresistanssia, sillä se lisää ilmavirran painehäviöitä jo lävinessä eli haittaa ilmavirran kulkua profiilin läpi. (Nabi et al. 2006)

4.8 Yhteenveto

LED-valaisimen jäähdytyksen suunnittelussa tulee jäähdytyselementin lisäksi ottaa tarkasti huomioon muutkin valaisimen osat, sillä ne muodostavat merkittävän osan valaisimen kokonaislämpöresistanssista. Eryisen tärkeää jäähdytysprofiilin ja komponentin välisissä kerroksissa on pyrkiä levittämään lämpö mahdollisimman tasaisesti koko jäähdytysprofiilin kannan pinta-alalle sekä huolehtia materiaaliliitosten kestävydestä. LED-valaisimessa komponenttien häviötehon jakaminen mahdollisimman tasaisesti suurelle pinta-alalle on suhteellisen helppo toteuttaa käyttämällä useita pienitehoisia komponentteja muutaman suuritehoisen sijaan. Yleisesti ottaen suunnittelussa kannattaa pyrkiä minimoimaan materiaalikerrosten ja niiden välisten liitosten määrä. Varsinkin ilmakerrokset voivat aiheuttaa erittäin suuria lämpöresistansseja liitoksiin tai esimerkiksi jäähdytyslaitteen ja kotelon välille. Vaikka lämmönsiirto komponentin aktiivialueelta jäähdytyslaitteelle tapahtuu yleensä vain johtamalla, ei konvektiota ja lämpösäteilyä voida unohtaa, sillä niiden merkitys esimerkiksi valaisinkotelon suunnittelussa on huomattava.

5 Jäähdytyslaitteet

Tässä luvussa tarkastellaan erilaisten jäähdytyslaitteiden toimintaperiaatteita, niiden hyviä ja huonoja ominaisuuksia sekä soveltuvuutta erilaisiin jäähdytystarpeisiin. Pääpaino on jäähdytysprofiileissa, joita voidaan käyttää jäähdytykseen joko yksin tai muiden jäähdytyslaitteiden osana. Jäähdytystä suunniteltaessa on hyvä muistaa, että lopullinen lämmönsiirto systeemin ja ympäristön rajapinnalla tapahtuu yleensä konvektion ja säteilyn yhdistelmänä, jolloin pinta-alan merkitys on suuri. Jos pinta-alaa ei ole riittävästi, täytyy lämmönsiirtoa parantaa lisäämällä konvektiovirtausta. Vaihtoehtoisesti lämpö voidaan myös siirtää paikkaan, jossa pinta-alaa voidaan lisätä.



Kuva 15. Erilaisilla jäähdytysvaihtoehdoilla saavutettavat lämpötilaerot (Çengel 2003).

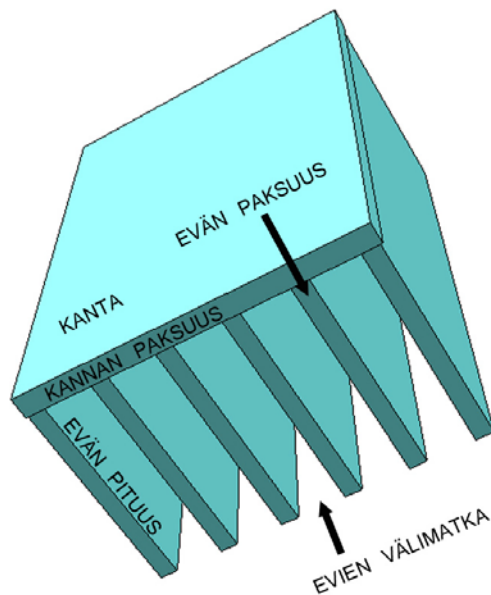
5.1 Jäähdytysprofiilit

Jäähdytysprofiilit ovat levyjä, joiden lämmönsiirtoa parannetaan lisäämällä niiden pintaan erilaisia levyjä tai piikkejä, jolloin niiden aktiivinen lämmönsiirtopinta-ala kasvaa. Pinta-alaa maksimoidessa täytyy huomioida käytettävissä olevan tilan määrä, painorajoitukset sekä materiaali- ja valmistuskustannukset. Lisäksi täytyy muistaa, että pinta-alan maksimoinnin seurauksena konvektiovirtauksen kulku profiilin läpi saattaa heiketä ja kokonaislämmönsiirto jäädä pienemmäksi.

Jäähdytysprofiilin suunnittelun tärkeimpiä parametreja ovat

- kannan pinta-ala
- kannan paksuus
- evien muoto
- evien pituus
- evien paksuus
- evien välimatka
- profiilin materiaali
- pintakäsittely

Edellä olevia parametreja optimoimalla voidaan saavuttaa parannuksia profiilin ja sen ympäristön väliseen lämmönsiirtoon ja siten jopa kymmeniä asteita alhaisempia komponenttien lämpötiloja. Optimointia hankaloittaa kuitenkin se, että väliaine ja sen virtausnopeus sekä esimerkiksi komponenttien sijoittelu alustalle vaikuttavat siihen, millainen profiili mihinkin tilanteeseen parhaiten sopii. Lisäksi parametrit vaikuttavat merkittävästi toisiinsa.



Kuva 16. Jäähdytysprofiilin toimintaan vaikuttavat fyysiset mitat.

5.1.1 Evän muoto

Perinteinen jäähdytysprofiilin evä on suora levy, joka on kiinnitetty profiilin kantaan koko kannan pituudelta. Suoraa levyä pidetään usein vanhanaikaisena ja sen korvaajaksi on kehitetty useita erilaisia vaihtoehtoja. Chapman et al. (1994) toteavat kuitenkin, että usein lateraali lämmönjohtuminen jätetään liian vähälle huomiolle ja suora levyevä voi toimia korvaajiaan paremmin, sillä sen lateraalinen lämpöresistanssi on melko alhainen johtuen evien kyvystä jakaa lämpö tasaisemmin pituussuunnassa. Tämän pitkittäisen lämmönjohtumisen seurauksena jäähdytysprofiilin kannan ja komponenttien välisten lämpöä levittävien kerrosten merkitys

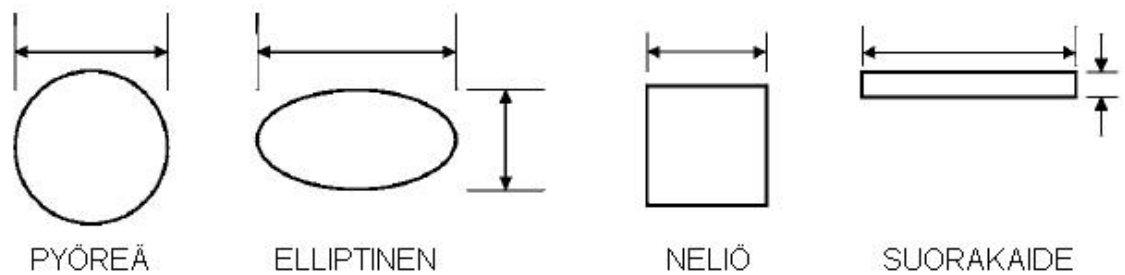
vähenee ja ne voidaan mahdollisesti jättää kokonaan pois, jolloin kontaktilämpöresistansseja saadaan eliminoitua ja luotettavuutta parannettua. Vaikka lämmönlevittimet lisäävät kontaktiresistansseja, niiden tuoma parannus lateraaliseen lämmönjohtumiseen on merkittävää varsinkin silloin, kun lämpövuot ovat suuria. Myös silloin, kun konvektiovirtauksen nopeus on yli 3m/s, saatetaan lämmönlevittäjiä tarvita tasoittamaan konvektiopinnalle syntyviä lämpötilaeroja. (Chapman et al. 1994)

Jäähdytysprofiilin kokonaislämpöresistanssin lisäksi profiilien suorituskykyä voidaan arvioida niiden evärakenteiden aiheuttamien virtaushäviöiden perusteella. Kuten konvektiota käsittelevässä kappaleessa mainittiin, virtaus valitsee reitin, jolla paine on pienin, joten jos virtaus halutaan ohjata tasaisesti evärakenteen läpi, täytyy evärakenteen luoman paineen olla kauttaaltaan pieni. Jos näin ei ole, tarvitaan hyvän jäähdytyksen aikaansaamiseksi tehokkaampi puhallus. Suoria levyviä käytettäessä niin sanotut ohitusvirtaukset ovat usein pienempiä kuin vaihtoehtoisilla evärakenteilla (Chapman et al. 1994). Ohitusvirtausten lisäksi virtauspaineen häviöt vaikuttavat merkittävästi profiilin toimintaan. Shah et al. (2004) toteavat, että varsinkin profiilin keskellä, lähellä kantaa, painegradientit ovat yleensä suuria ja virtaus vähäistä, mutta, poistamalla porrastetusti evämateriaalia profiilin keskellä olevista evistä, näitä häviöitä voidaan pienentää.

Käytetyin vaihtoehto levyville ovat sormimaiset evät, joiden poikkileikkaus on yleensä joko neliö, ympyrä tai ellipsi. Dong-Kwon et al. (2008) tutkivat pakotetun ilmavirran vaikutuksia ja toteavat, että sormimaisissa evärakenteissa virtaukset ja lämmönsiirto ovat olennaisesti erilaisia kuin levymäisissä eikä valinta näiden kahden välillä ole selvä. Heidän mukaansa optimoitu sormimainen profiili toimii yleensä optimoitua levymäistä profiilia paremmin silloin, kun pakotettuun konvektioon käytetty pumppausteho on pieni. Tämä johtuu siitä, että virtausimpedanssi on sormimaisessa evärakenteessa alhaisempi ja virtausnopeus tästä syystä suurempi. Toisaalta heidän tutkimuksissaan ilmavirta on suunnattu evien päistä kantaa kohti. Myös Sikka et al. (2002) toteavat, että jos profiilin lämmönsiirtopinta-ala on yhtä suuri, sormimaiset evät suoriutuvat yleisesti ottaen parhaiten, sillä ne aiheuttavat enemmän häiriöitä ja sekoittumista ja siten rikkovat virtauksen rajakerroksen. Sormimaiset evät toimivat horisontaalitasoon asennettuina hieman paremmin kuin levymäiset profiilit, toisaalta vertikaaliasennuksessa tilanne on päinvastainen.

Myös poikkileikkaukseltaan erilaisten sormimaisten evien välillä on eroja johtuen niiden erilaisista virtausominaisuuksista. Käyttämällä elliptisiä eviä voidaan säilyttää evän suuren pinta-alan tuomat edut ja vähentää tarvittavaa virtausvoimakkuutta. Elliptisten evien aiheuttamat ohitusvirtaukset ovat paljon suurempia kuin esimerkiksi neliön muotoisten evien, mutta lämpöresistanssit silti samaa suuruusluokkaa, joten elliptisen evän lämmönsiirto on teoriassa tehokkaampaa. Sylinterimäistä evää käytetään myös paljon, sillä sen avulla voidaan kasvattaa aktiivista lämmönsiirtopinta-alaa. Lisäksi, niin sanotun Coanda-efektin seurauksena, virtaus kääntyy kaarevilla pinnoilla aiheuttaen evien taakse muodostuvien pyörrealueiden sekoittumista,

jolloin lämmönsiirto paranee. Pyöreiden evien painehäviöt ovat kuitenkin suuret. Erilaisten poikkileikkausten käytöstä on olemassa paljon ristiriitaista dataa eikä niitä voida laittaa selkeään paremmuusjärjestykseen. Sikka et al. (2002) toteavat, ettei erilaisten evämuotojen avulla ainakaan luonnollisessa konvektiossa ja hitailla virtausnopeuksilla saavuteta merkittäviä parannuksia optimoituihin suoralevyisiin profiileihin nähden. (Chapman et al. 1994, Ho et al. 2002, Kai-Shing et al. 2007)

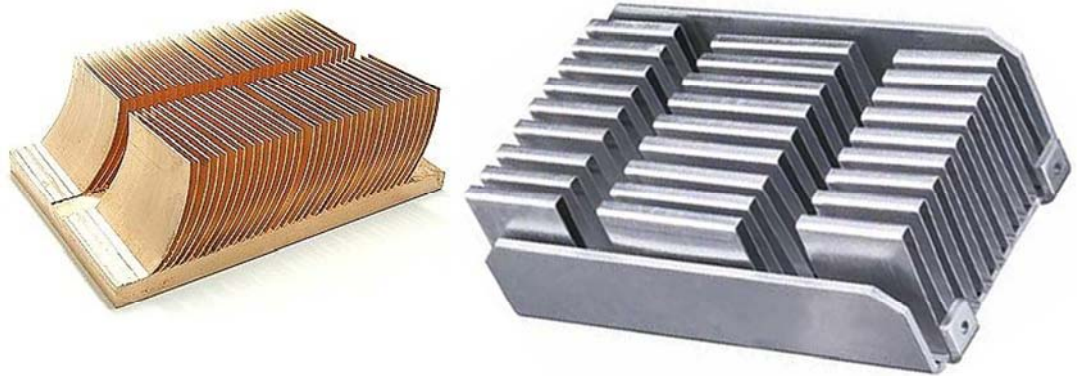


Kuva 17. Yleisimmät sormievien poikkileikkaukset (Khan et al. 2006a).

Aaltoilevien levyjen avulla voidaan teoriassa parantaa lämmönsiirtoa häiritsemällä rajakerrosten muodostumista sekä kääntämällä evien välissä kulkevaa virtausta osumaan evien pinnoille. Aaltoilevat profiilit eivät häiritse rajakerroksia yhtä tehokkaasti kuin sormaiset rakenteet, mutta suurilla virtausnopeuksilla niiden lämmönsiirto-ominaisuudet ovat paremmat kuin suorien levyevien. (Sikka et al. 2002)

Edellä mainittujen evämuotojen lisäksi evät voidaan rakentaa myös monella muulla tapaa ja moneen muotoon. Korkeiden ja tiheään pakattujen levyevien valmistaminen on melko hankalaa, minkä takia on jouduttu kehittämään erilaisia valmistusmenetelmiä. Näiden avulla on valmistettu muunmuassa alumiinilevystä taitettuja eviä, tasoon kudotuista laminaateista tehtyjä rakenteita sekä suistamismenetelmällä tuotettuja jäähdytysprofiileja. Kolmioon taitettujen levyevien lämmönsiirtopinta-ala on suuri ja niiden lämpöresistanssi yhtä korkeisiin, tiheästi pakattuihin, muotoon puristettuihin levyeväprofiileihin verrattuna alhaisempi ainakin pakotetussa konvektiossa. Laminaateista kudottujen profiilien pinnan huokoisuus on hyvä, mutta rakenteen voimakkaasti virtausta vastustavat ominaisuudet heikentävät huokoisuuden tuomia etuja eikä tämän tyyppisellä rakenteella päästä muita vaihtoehtoja parempaan lämmönsiirtoon. Suistamismenetelmällä voidaan rakentaa edullisesti profiileja, joiden niin sanottu aspect ratio eli evän korkeuden ja välimatkan suhde on suuri, jopa kahdeksantoista. Suistettujen profiilien painehäviöt ovat kuitenkin suuria, minkä takia virtausnopeus tulee pitää tarpeeksi korkeana. Toinen suistettujen profiilien ongelma on se, että ne täytyy suojata rikkoutumisilta hyvin, koska niiden rakenne on muihin jäähdytysprofiileihin verrattuna heikko. Myös epoksiliitoksia käyttämällä voidaan valmistaa suhteellisen korkeita ja tiheitä profiileja, mutta tällaisten liitosten käyttäminen kasvattaa lämpöresistanssia. Juottaminen puolestaan kasvattaa valmistuskustannuksia. Valmistusmenetelmän valinta vaikuttaa myös profiilin

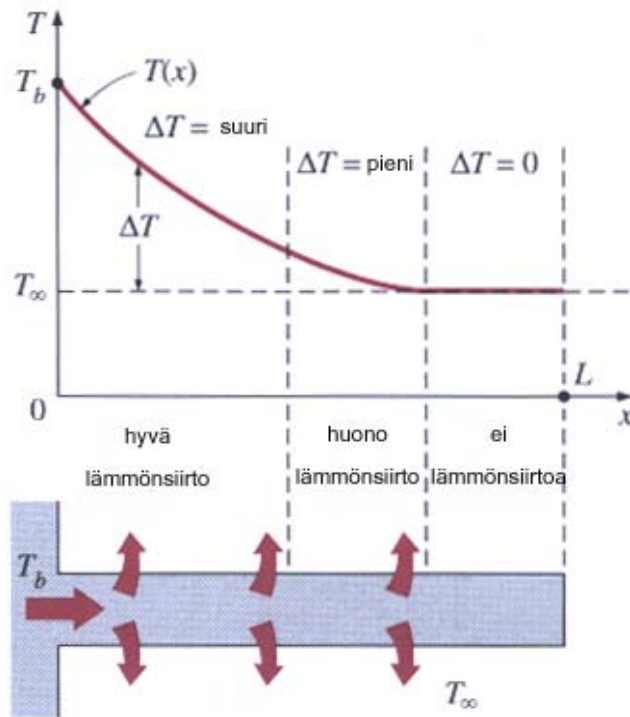
lämmönjohtavuuteen sekä esimerkiksi emissiivisyyteen. (Chapman et al. 1994, Chen, Wirtz 2005, Shah et al. 2004, Sikka et al. 2002, Tae Ho et al. 2004, Yang 2001)



Kuva 18. Suistettu ja taitettu profiili (Electronics Cooling 2009, TTIC 2009).

5.1.2 Evien pituus, paksuus ja sijoittelu

Varsinkin luonnollisessa konvektiossa tasapaino evien etäisyyden ja pituuden välillä on erittäin tärkeä (Visser et al. 2000). Kuvasta 19 nähdään, että evän lämpötila laskee siirtyttyessä kauemmaksi kannasta. Lämpötilan laskun suuruus ja sen vaikutus lämmönsiirron heikkenemiseen riippuu evämateriaalin lämmönjohtavuudesta. Bahadurin ja Bar-Cohenin (2004) mukaan jokaiselle evän halkaisija-tiheys konfiguraatiolle on olemassa optimaalinen evän pituus. Kun evän pituutta kasvatetaan, lämmönsiirtopinta-ala kasvaa ja lämmönsiirto paranee. Pituuden kasvun jatkuessa niin sanottu evätehokkuus alkaa kuitenkin heiketä ja evän lämmönsiirtokerroin voi heiketä jopa niin paljon, että profiili toimisi paremmin ilman minkäänlaisia eviä. Evien välimatkaa pienentämällä voidaan lämmönsiirtopinta-ala merkittävästi lisätä, mutta tällöin myös profiilin yli olevat painehäviöt kasvavat. Kolmas tärkeä parametri on evän paksuus. (Bahadur, Bar-Cohen 2004, Ren-Tsung et al. 2006, Tae Ho et al. 2004)

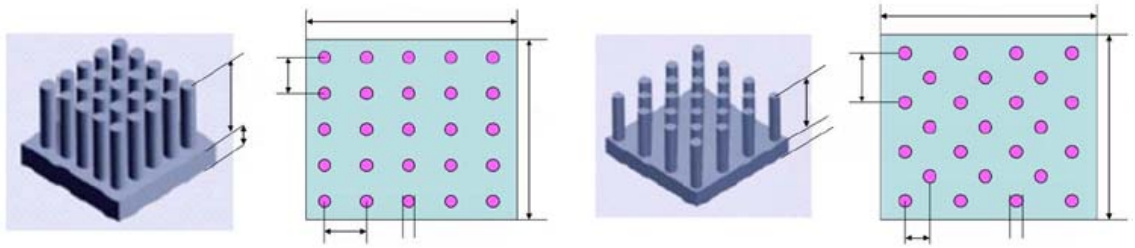


Kuva 19. Evän lämpötilajakauma ja sen vaikutus lämpötilaeroon ja lämmönsiirtoon (Çengel 2003).

Sormimaiset evät voidaan sijoittaa kannalle joko suoriin riveihin tai limittäin. Ren-Tsung et al. (2006) väittävät, että suorarivinen rakenne toimii limittäistä paremmin luonnollisessa konvektiossa ja silloin, kun pumppausteho tai pinta-ala pidetään vakioina. Ho et al. (2002) puolestaan toteavat, että virtausnopeuteen suhteutettuna, limittäisen rakenteen lämmönsiirtokerroin on suurempi. Dvinsky et al. (2000) sen sijaan ovat päätyneet tulokseen, jonka mukaan suorarivinen rakenne on termisesti ylivoimainen aina, paitsi silloin, kun profiilin reunojen ja kotelon seinämien välinen etäisyys on nolla. Limittäisen rakenteen virtausvastus saattaa olla niin suuri, että yli 90% virtauksesta ei saavuta sille tarkoitettua ulostuloaluetta. Suoralla rakenteella virtaushäviöt ovat vain noin 40%. Suorassa rakenteessa lämmönsiirto on tehokasta koko profiilin pituudella, kun taas limittäisessä profiilissa usein vain kaksi ensimmäistä sormiriviä osallistuvat tehokkaasti jäähdytykseen eli limittäisissä profiileissa lämmönjakautuminen on epätasaista ja takarivissä olevien komponenttien jäähdytys tapahtuu lähinnä luonnollisella konvektiolla. Isoissa profiileissa tämän ilmiön odotetaan olevan vielä merkittävämpää. Suurilla virtausnopeuksilla erot kuitenkin tasoittuvat, sillä limittäisessä profiilissa rajakerrosten sekoittuminen lisääntyy. (Dvinsky et al. 2000)

Sormievien poikkileikkaus vaikuttaa myös siihen, miten evät käyttäytyvät suorarivisissä ja limittäisissä profiileissa. Pyöreän evän lämmönsiirto riippuu suorissa rakenteissa voimakkaasti evien välisistä etäisyyksistä kun taas neliömäisen evän ei. Limittäisissä rakenteissa

lämmönsiirtokerroin kasvaa evien tiheyden lisääntyessä sekä pyöreille, elliptisille että neliön mallisille eville. (Kai-Shing et al. 2007)



Kuva 20. Suorarivinen ja limittäinen profiili (Bahadur, Bar-Cohen 2005).

5.1.3 Kannan vaikutus profiilin toimintaan

Jäähdytysprofiilin kannan tehtävä on jakaa häviölämpö tasaisesti koko pinta-alalleen, jotta kaikki siihen kiinnitetyt evät voivat tasapuolisesti ja mahdollisimman tehokkaasti osallistua lämmönsiirtoon. Kantamateriaalin lämmönjohtavuus vaikuttaa paljon leviämislämpöresistanssin suuruuteen. Kuperisen kannan lämmönjohtavuus on melko hyvä, mutta paljon suurempia lämmönjohtavuuksia voidaan saada aikaan käyttämällä erilaisia kiehumisjärjestelmiä tai termosähköisiä ratkaisuja, joita tarkastellaan tarkemmin hieman myöhemmin (Xiong et al. 2006). Leviämislämpöresistanssin suuruus riippuu myös lämpölähteen pohjan ja profiilin kannan pinta-alojen suhteesta, jonka merkitys kasvaa profiilien jäähdytystehon parantuessa (Tasaka et al. 1998). Myös kannan paksuus vaikuttaa selvästi profiilin lämmönsiirtoon. Profiilin kannan suunnittelu tulee tehdä huolella lämpötekniikan syiden lisäksi myös siksi, että näin voidaan saavuttaa säästöjä sekä materiaalikulutuksessa, kustannuksissa että profiilin kokonaispainossa (Visser et al. 2000).

5.1.4 Materiaalit

Yleisimmät profiilimateriaalit ovat alumiini ja kupari. Alumiinin etuja kupariin nähden ovat keveys, suotuisampi lämpölaajenemiskerroin sekä kestävyys korroosiota ja eroosiota vastaan. Lisäksi alumiiniprofiilien materiaali- ja valmistuskustannukset ovat alhaisemmat. Kuparia joudutaan kuitenkin käyttämään silloin, kun alumiinin lämmönjohtavuus ei ole riittävä. (Dogruoz, Arik 2008, Leers et al. 2007)

(Saums et al. 2006) toivovat uusien materiaalien kehityksen johtavan ainakin seuraaviin parannuksiin

- yli 400W/mK lämmönjohtavuuksiin
- sopivampiin lämpölaajenemiskertoimiin
- alhaisempiin tiheyksiin
- parempiin elastisuus- ja kestävyysominaisuuksiin
- alhaisempiin valmistuskustannuksiin
- valmistuksen jatkokäsittelytarpeiden vähentymiseen

- pidempään elinikään vähäisten korroosio- ja eroosiovaikutusten seurauksena
- tarpeen mukaan muokattaviin sähkönjohtavuusominaisuuksiin
- yksinkertaisempiin kiinnitysmahdollisuuksiin

Eräs uusista profiilimateriaaleista on grafiitti-täytteinen lämpöä johtava PPS eli polyphenyleenisulfidi-polymeerimuovi. PPS:n lämmönjohtavuus on melko vaatimaton, mutta kuitenkin riittävä monien kaupallisten tuotteiden vaatimalle jäähdytysteholle. Koska luonnollisessa konvektiossa lämmönsiirtokertoimet ovat alhaisia ja profiilin lämpötila kohtalaisen tasainen, ei hyvällä lämmönjohtavuudella saavuteta merkittäviä etuja varsinkaan matalissa jäähdytysprofiileissa. Yleisillä, alle 5 cm eväpituuksilla, alumiini- ja PPS-profiilien lämmönsiirtokertoimissa ei ole huomattavaa eroa. 5-10 cm korkeiden profiileiden lämmönsiirrossa havaitaan jo pieniä eroja, mutta vasta yli 10 cm korkeissa evissä aletaan näiden kahden materiaalin välillä nähdä merkittäviä eroja, sillä tätä pidemmällä evillä PPS-profiilien lämmönsiirto ei enää parane pinta-alan kasvusta huolimatta. Luonnolliseen konvektioon perustuvissa systeemeissä suuri osa laitteen massasta on keskittynyt jäähdytysprofiiliin, joten kevyiden materiaalien kehittäminen on tärkeää. Matalissa profiileissa PPS-profiilien massa suhteutettu jäähdytysteho on ylivoimainen alumiiniin verrattuna, tilavuuteen nähden jäähdytystehot ovat samaa luokkaa. Sen lisäksi, että matalien profiilien massa voidaan puolittaa käyttämällä PPS-polymeerejä alumiinin sijaan, voidaan PPS-polymeerien käytöllä myös pienentää valmistuksen kustannuksia sekä parantaa energiatehokkuutta. Profiilit voidaan valmistaa suoraan haluttuun muotoon, jolloin vältetään jatkokäsittelyä. Jäähdytysprofiilin performanssikerroin voidaan laskea yhtälöstä

$$COP_T = \frac{q_T t}{W_T} \quad (18),$$

jossa COP_T = jäähdytysprofiilin performanssikerroin

q_T = profiilin keskimääräinen jäähdytysteho (W)

t = profiilin käyttöaika (s)

W_T = profiilin valmistukseen ja käyttöön kulutettu energia (J).

PPS-profiileiden performanssikerroin voi olla moninkertainen alumiiniin nähden, jos täytetiheys ja -jakauma optimoidaan. (Bahadur, Bar-Cohen 2004, Dogruoz, Arik 2008)

Jos profiileiden lämmönjohtavuuden tulee olla korkea, voidaan niiden valmistuksessa käyttää erilaisia timanttikomposiitti-kupari -laminaatteja, jolloin voidaan parantaa samanaikaisesti sekä materiaalin lämpölaajenemis- että lämpöresistanssiominaisuuksia. Puhdas timantti olisi ideaalinen profiilimateriaali, jos se olisi halvempi ja helpommin työstettävissä. ScD- eli piikarbiditimantin valmistuskustannukset ovat paljon alhaisemmat kuin

kovapainentimanttikomposiittien ja niistä voidaan suoraan valmistaa halutun muotoisia profiileja, joilla on timantin kaltaiset ominaisuudet. Silti kustannukset ovat sen verran suuret, ettei kokonaisia profiileja kannata valmistaa timanttikomposiiteista. Jäähdytysprofiilin lämpöresistanssia voidaan alentaa huomattavasti lisäämällä pieniä määriä timanttikomposiittimateriaalia muista materiaaleista valmistettujen profiilien sisään. Kovapainentimanttikomposiittien valmistuskustannukset ovat kuitenkin laskeneet reilusti ja, jos sama suuntaus jatkuu, voidaan niitä mahdollisesti jatkossa hyödyntää entistä enemmän. (Leers et al. 2007, Saums et al. 2006)

Dogruoz ja Arik (2008) ovat vertailleet pyrolyyttisen grafiitin, hiilivaahdon ja PPS-polymeerien toimivuutta ja todenneet, että näistä parhaiten toimii grafiitti, jonka jäähdytysominaisuudet ovat kuparin luokkaa ja paino lähes 80% pienempi kuin kuparilla. Grafiitti on kuitenkin kallista ja lämmönjohtuminen erinomaista vain tason suuntaisesti, joten se sopii paremmin muista materiaaleista tehtyjen profiilien täytämateriaaliksi. Hiili- ja metallivaahdoilla voidaan parantaa profiilin pinnan huokoisuutta ja siten aiheuttaa turbulenssia. Tällaisilla materiaaleilla pakotetun konvektion lämmönsiirto on kaksinkertaista perinteisiin ratkaisuihin verrattuna. Jos painehäviöt eivät kasvaisi liikaa, voitaisiin lämmönsiirto mahdollisesti jopa kuusinkertaistaa tällaisten materiaalien avulla. Hiilivaahdon tiheys on todella alhainen (560 kg/m^3). PPS-polymeereihin (1700 kg/m^3) ja varsinkin alumiiniin (2700 kg/m^3) ja kupariin (8820 kg/m^3) verrattuna sen massa suhteutettu jäähdytysteho on ylivoimainen varsinkin, kun sen lämmönjohtavuus on kohtalainen ($120 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). Edellä mainittujen lisäksi markkinoilta löytyy muunmuassa TPV- ja TPE- materiaaleja eli termoplastisia vulkanaatteja ja elastomeereja, joita voidaan soveltaa jäähdytysprofiileissa. Materiaalien valinnassa on järkevää huomioida myös materiaalien yhteiskäytön mahdollisuudet. Esimerkiksi kuparikanta-grafiittievä -yhdistelmällä saavutetaan merkittävä painonkevennys ja lähes yhtä hyvä lämmönsiirto kuin kokonaan kuparisella profiililla. (Dogruoz, Arik 2008, Saums et al. 2006)

5.1.5 Pintakäsittely

Varsinkin luonnollisessa konvektiossa lämpösäteily tulee ottaa huomioon, sillä sen osuus lämmönsiirrosta on noin 25-50%, joskus jopa suurempi. Mitä kiiltävämpi ja sileämpi profiilin pinta on, sitä heikompaa on lämpösäteily, sillä emissiokerroin heikkenee. Pinnan huokoisuus vaikuttaa myös konvektioon. Profiilin valmistusmenetelmä vaikuttaa käytössä oleviin vaihtoehtoihin pintakäsittelyn osalta. Esimerkiksi valetut alumiiniprofiilit voidaan maalata kun taas puristamalla tehdyt profiilit voidaan eloksoida rikkihapon avulla. Maalattujen, lakattujen, lasisten ja muovisten pintojen emissiokertoimet ovat yleisesti melko korkeita. Hapettamalla voidaan myös valmistaa kohtalaisen hyvin säteileviä metallipintoja. Pinnan huokoisuutta voidaan parantaa myös valmistamalla siihen hyvin pieniä uurteita ja eviä. (Bahadur, Bar-Cohen 2004, Chapman et al. 1994, Jahkonen 1983, Shedd 2007)

5.1.6 Yhteenveto

Jäähdytysprofiilin suunnittelun voidaan todeta olevan jokseenkin monimutkaista johtuen suunnitteluparametrien määrästä ja yksiselitteisten sääntöjen puutteesta. Jokaisen parametrin optimoiminen viimeistä piirtoa myöten ei välttämättä lisää jäähdytystehoa kovinkaan paljon, joten tärkeintä on keskittyä olennaiseen. Ennen profiilin suunnittelua tai valintaa tulee mahdollisimman tarkasti määrittää ylä- ja alarajat jäähdytysteholle, ympäristöolosuhteille, geometrisille mitoille, massalle, luotettavuus- ja elinikävaatimuksille sekä hintaluokalle. Näin vältetään profiilin ylimitoitukselta ja voidaan valita laitteen toimintaympäristöön sopivin profiili.

Luonnollisella konvektiolla voidaan saavuttaa kohtuullisen edullinen ja luotettava jäähdytys, mutta jäähdytyslaitteen koossa, massassa ja jäähdytystehossa jäädyään yleensä melko heikkoihin tuloksiin. Luonnollisessa konvektiossa virtausnopeus on alhainen, joten virtaushäviöillä ei ole merkittävää vaikutusta profiilin toimintaan. Muutenkin erilaisten evämuotojen tutkiminen on lähinnä hienosäätöä, tärkeintä luonnollisessa konvektiossa on kiinnittää huomio seuraaviin sääntöihin

- maksimoi profiilin kannan pinta-ala käytettävään tilaan nähden
- minimoi kannan paksuus johtumispituuden maksimille
- maksimoi evien pituus käytettävän tilan suhteen
- valitse materiaali(t), lämmönjohtavuuden vaikutus matalissa evissä alhainen
- valitse levyevä jos lämmön jakautuminen kannalle on epätasaista, muussa tapauksessa suorarivinen sormievä
- valitse sopiva evän paksuus ja sille optimaalinen evien välimatka

Edellä mainittuja sääntöjä tarkastellessa tulee huomioida, että niissä on lähdetty liikkeelle ensisijaisesti tilavuusrajoitteisesta ajattelutavasta. Jos tilavuuden sijaan tärkeämpiä kriteerejä ovat profiilin paino tai hinta, saattaa esimerkiksi materiaalivalinnan merkitys korostua. Kokonaisten profiilien valmistaminen erittäin hyvin lämpöä johtavista materiaaleista on kuitenkin pääsääntöisesti kannattamatonta etenkin, kun esimerkiksi aktiivisilla jäähdytyslaitteilla voidaan saada aikaan paljon tehokkaampi jäähdytys edullisemmin. Käyttämällä huippumateriaaleista valmistettuja täytteitä perinteisissä profiileissa voidaan kuitenkin kohtuullisen edullisesti parantaa profiilin toimintaa. Lisäksi pitää muistaa, etteivät kaikki alumiinin ja kuparin korvikkeet ole kalliita. Vaikka niillä ei välttämättä voida merkittävästi parantaa lämmönsiirtoa, niiden muut ominaisuudet kuten tiheys ja energiaintensiivisyys voivat olla merkittävästi parempia. Gaowei et al. (2006) huomauttavat, että alumiini- ja kupariprofiileiden vertailutulosten perusteella voidaan sanoa, että materiaali yksin ei määrää jäähdytysprofiilin lämmönsiirtokykyä vaan kokonaisvaltainen suunnittelu on olennaista.

5.2 Aktiivinen ilmajäähdytys

Ilmavirtauksen nopeuttaminen on yksi suosituimmista keinoista lisätä jäähdyslaitteen jäähdytystehoa. Laitteen ympäristössä olevan ilman lämpötila on usein alhaisempi kuin jäähdytyslaitteen lämpötila ja tämän resurssin hyödyntäminen on monissa tapauksissa houkuttelevaa ja järkevää. Alhaisen lämmönjohtavuutensa ja lämpökapasiteettinsa takia ilma ei ole optimaalinen jäähdytysväliaine, mutta tarpeeksi suuren konvektiopinta-alan ja virtausnopeuden avulla jäähdytysteho voidaan helposti kymmenkertaistaa luonnolliseen konvektioon verrattuna.

Pakotetulla konvektiolla tarkoitetaan väliaineen virtausnopeuden kasvattamista erilaisten apuvälineiden kuten tuulettimien ja puhaltimien avulla. Näiden suunnittelussa tulee huomioida, että luonnollisen konvektion suunta on oikea, jotta pakotettu virtaus ja luonnollinen virtaus eivät vastusta toisiaan ja näin haittaa optimaalista lämmönsiirtoa. Muita tärkeitä seikkoja aktiivisen ilmajäähdytyksen suunnittelussa ovat

- virtauksen suuntaaminen mahdollisimman tasaisesti jäähdytettävälle pinnolle
- virtaushäviöiden minimoiminen
- virtauskanavien ja evien ominaisuuksien optimointi käytettävälle virtausnopeudelle

Pakotetussa konvektiossa virtausnopeudetta pidetään yhtenä tärkeimmistä lämmönsiirtoa parantavista tekijöistä, mutta lämmönsiirtoa voidaan parantaa myös alhaisilla virtausnopeuksilla pyrkimällä maksimoimaan pyörteiden ja virtausrajaeroksen häiriöiden syntymistä ja väliaineen sekoittumista. (Jahkonen 1983, Moffat 2007, Sikka et al. 2002, Thurlow et al. 2000)

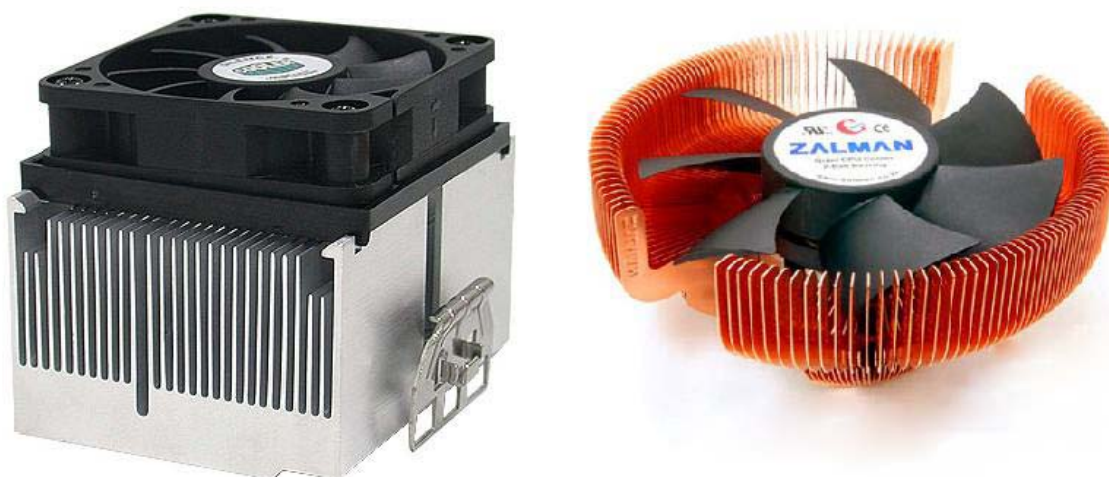
Virtauksen tullessa kanavaan siinä tapahtuu painehäviöitä, jotka ovat joko tulo-, kitka- tai poistohäviöitä. Profiilin ohi suuntautuva virtaus pienentää aina profiilin optimaalista lämmönsiirtokapasiteettia. Tämä tulee ottaa huomioon suunniteltaessa tuulettimen tai puhaltimen sijaintia systeemin sisällä. Jos profiilin ja tuulettimen ulostuloaukon väliin jätetään rako, voi suurin osa virtauksesta suuntautua profiilin ympäristöön evärakenteen sijaan, jolloin lämmönsiirtoa tapahtuu pääasiassa vain profiilin ulkopinnoilta. Ilmavirran suuntaamiseen kannattaa käyttää erilaisia suuttimia ja diffuusereita, jotta virtaus saadaan mahdollisimman hyvin evärakenteen pinnolle. Puhaltimen sijoittelussa ja ilmavirran suuntauksessa kannattaa huomioida myös systeemiltä vaaditut fyysiset mitat ja se, miten tasaisesti häviölämpö profiiliin on jakautunut. (Egan et al. 2008, Jahkonen 1983, Moffat 2007, Tasaka et al. 1998)

5.2.1 Perinteiset tuulettimet

Yleisin tapa lisätä ilmavirtaa on käyttää tuulettimia, joissa moottorin avulla pyörivä potkuri liikuttaa ilmaa. Tuulettimet voivat olla ongelmallisia niiden aiheuttaman melun ja sähköisten häiriöiden takia. Lisäksi liikkuvissa osissa tapahtuu kulumista ja tuulettimen elinikä voi olla alhaisempi kuin systeemin muiden osien. Lisäksi tuulettimen omat lämpöhäviöt kasvattavat

kokonaislämpökuormaa, joka systeemistä tulee siirtää pois. (Jahkonen 1983) Perinteisesti tuulettimien energiatehokkuus on heikko, sillä useimmat perinteiset tuulettimet käyvät ääriolosuhteisiin suunnitellulla vakionopeudella ja siten siis maksimiteholla. Abakr et al. (2003) mukaan järkevällä ohjauksella tuuletusjärjestelmän energiankulutusta voidaan vähentää yli 50 prosenttia. Tällöin voidaan saavuttaa parannuksia myös esimerkiksi tuulettimen elinikään ja meluhaittoihin.

Perinteiset tuuletinjärjestelmät ovat usein avoimia eli käytettävä jäähdytysilma tuodaan laitteeseen ympäristöstä ja poistetaan ympäristöön. Tällaisissa järjestelmissä likaantuminen saattaa merkittävästi lisätä jäähdytyslaitteen lämpöresistanssia varsinkin, jos tuulettimen yhteydessä käytettävän jäähdytysprofiilin evätiheys on suuri. Lämpöresistanssin nousu ei niinkään liity pölyn kertymiseen profiilin evien pinnoille vaan pääasiassa pölyn kerääntymiseen evärakenteen päihin, ilmantuloreitin alkuun, jolloin suuri osa jäähdytysilmasta ohjautuu profiilin ohi. Tutkimusten mukaan tuulettimen sijoittamista alavirtaan kannattaa tällöin harkita, vaikka pääasiallisesti sen sijoittaminen ylävirtaan on järkevämpää. (Jahkonen 1983, Nabi et al. 2006)



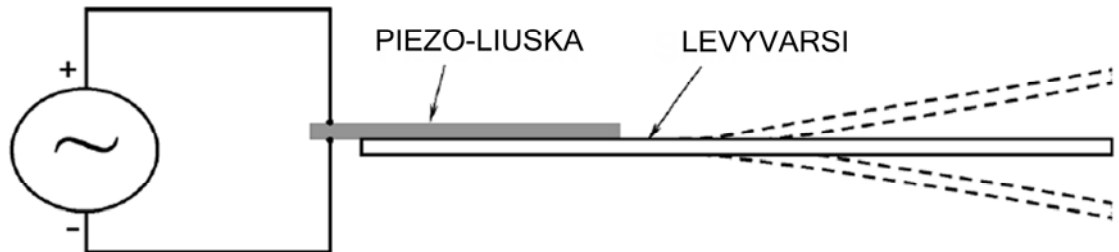
Kuva 21. Tuulettin-jäähdytysprofiiliyhdistelmiä (PC Perspective 2009, Scott Thomas 2009).

5.2.2 Muut puhaltimet

Perinteisten pyörivien tuulettimien luotettavuus- ja meluongelmien seurauksena uusien väliaineen virtausta synnyttävien vaihtoehtoisten tekniikoiden etsiminen on ollut aktiivista. Mikrotekniikan kehittymisen myötä on voitu kehittää erilaisia ruisku- ja suihkujärjestelmiä sekä piezosähkötuulettimia. Näiden lisäksi ilmavirtauksia voidaan tuottaa hyödyntämällä akustisia tekniikoita tai voimakkaita sähkökenttiä.

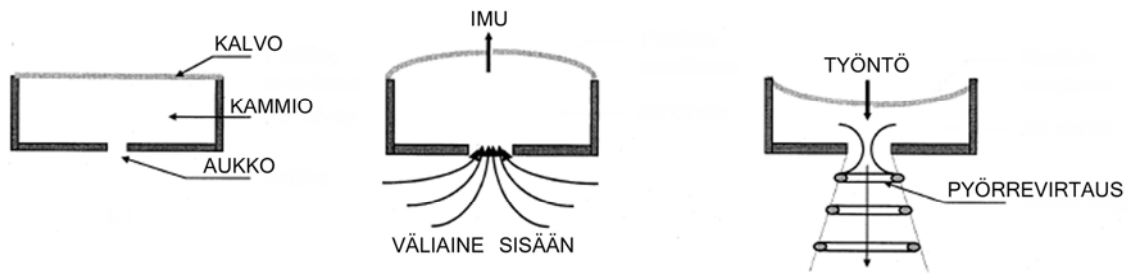
Piezosähköisten tuulettimien toiminta perustuu resonanssitaajuisen vaihtojännitteen avulla liikuttettavan läpän tai palkeen kehittämään ilmavirtaan. Tällaisen tuulettimen sähkönkulutus ja koko ovat suhteellisen pienet. Lisäksi, jos resonanssitaajuus valitaan ihmisen kuuloalueen ulkopuolelta, voidaan päästä alhaiseen melutasoon. Tärkein piezosähkötuulettimen ominaisuus on liikkuvan läpän amplitudi, jonka täytyy olla tarpeeksi suuri riittävän ilmavirran tuottamiseksi.

Taajuuspoikkeaman kontrollointiin on tämän takia kiinnitettävä erityisesti huomiota, sillä mitä kauempana resonanssitaajuudesta toimitaan, sitä pienemmäksi läpän amplitudi jää. Muita tällaisten tuulettimien toimintaan vaikuttavia tekijöitä ovat jäähdytyspinnan ja läpän välinen etäisyys sekä läpän pituus. Lyhyempi läppä toimii yleensä paremmin, sillä sen resonanssitaajuus on suurempi. Piezosähkötuulettimien avulla voidaan parhaimmassa tapauksessa saavuttaa lähes nelinkertainen lämmönsiirto luonnolliseen konvektioon verrattuna ja esimerkiksi 1,6 W LED-komponentin lämpötilaa laskea yli 30 astetta. (Acikalin et al. 2004)



Kuva 22. Piezosähkötuulettimen rakenne (Wait et al. 2007).

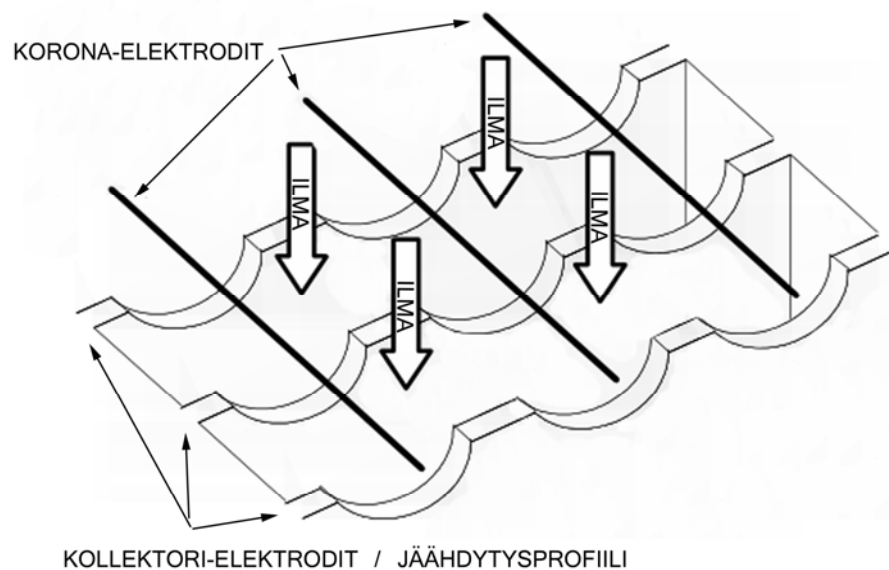
Synteettiset ruiskujärjestelmät ovat ehkä uusista sovelluksista lupaavimpia. Tällaisen järjestelmän keskeinen rakenneosia on kammio, jonka jollain sivulla on liikkuva kalvo ja sitä vastakkaisella pinnalla pyöreä väliaineen kulkuaukko. Kalvon liikkua väliaine tulee kammioon ja poistuu sieltä muodostaen pyörrevirtauksia, jotka vuorovaikutuksessa toisensa kanssa muodostavat synteettisen pyöreän suihkun. Kammiosysteemin lisäksi järjestelmä vaatii vaihtojännitelähteen, jolla voidaan synnyttää muuttuva magneettikenttä kalvon liikuttamiseksi samaan tapaan kuin edellä mainituissa piezosähkötuulettimissa. Ympäristön muutosten seurauksena resonanssitaajuus voi muuttua ja vakiotajuudella ohjaaminen johtaa epäoptimaaliseen toimintaan, sillä resonanssitaajuuden ulkopuolella suihkunopeus laskee rajusti. Tämän vuoksi ohjausjärjestelmässä kannattaa olla positiivinen takaisinkytkentä, jotta käyttötaajuus saadaan vastaamaan laitteen sen hetkistä resonanssitaajuutta ja kalvon amplitudi pidettyä mahdollisimman suurena. Aukon ja jäähdytyspinnan välimatka vaikuttaa myös merkittävästi tällaisen järjestelmän jäähdytystehoon, sillä jos etäisyys on liian pieni, ei väliaine pääse sekoittumaan ja sama kuuma väliaine kulkee edestakaisin aukossa. Liian suurella etäisyydellä suihkun nopeus sen sijaan ehtii laskea liikaa. Optimaaliseksi välimatkaksi on arvioitu noin 15-20 millimetriä. Resonanssitaajuuden kasvu lisää ilmapirtta, mutta johtaa samalla jäähdytyslaitteen tehonkulutuksen kasvuun. Jopa 26 m/s suihkuja on saatu tuotettua 1 W teholla. Suuremmilla sähkötehoilla alkaa tapahtua jäähdytystehon saturaantumista. Perinteisiin tuulettimiin verrattuna suihkujärjestelmät ovat yleensä meluttomampia, pienempiä ja luotettavampia. Lisäksi niiden tehonkulutus on alhaisempi, ne ovat vähemmän alttiita likaantumislle ja sopivat erityisen hyvin kuumien komponenttien paikalliseen jäähdytykseen. (Kercher et al. 2003, Lasance, Aarts 2008)



Kuva 23. Synteettisen ruiskupuhaltimen toimintaperiaate (Kercher et al. 2003).

Suihkuja voidaan tuottaa myös ääniaaltojen avulla. Ilmiötä kutsutaan akustiseksi kulkeutumiseksi (acoustic streaming), joka tarkoittaa äänikentän tuottamaa nettovirtausta. Väliaineen viskositeetti ja liikemäärä vaimentavat ääniaalloa, joka aiheuttaa paine-eron aallon liikesuunnassa, väliaineeseen kohdistuvan voiman ja sitä seuraavan virtauksen. Onkaloon sijoitettu kaiutin saattaa olla hyvinkin äänekäs, joten melu täytyy nollata vastakkaisvaiheisella ääniaallolla. Akustisten jäähdyttimien toimintaperiaate on hyvin samantapainen kuin edellä mainittujen suihkujärjestelmien. (Lasance, Aarts 2008)

Edellisten lisäksi ilmavirtauksia voidaan synnyttää niin sanotulla korona- tai EHD- eli elektrohydrodyaamisella systeemillä, jossa virtaus muodostuu aurinkotuulien tapaan varattujen elektrodien välisten voimakkaiden sähkökenttäpurkausten seurauksena. Ilmavirtauksen nopeus on suoraan verrannollinen käytettyyn jännitteeseen, jonka suuruuden täytyy olla useita kilovoltteja. Saavutettavat virtausnopeudet voivat olla yli 3 m/s, mutta jäähdytyslaitteen ottama 1-3 W teho on kohtalaisen suuri saavutettavaan 20-35 W jäähdytystehoon verrattuna. Laitteen etuja ovat erittäin pieni koko ja luotettavuus, joten ne sopivat hyvin esimerkiksi mikrokanavia sisältäviin jäähdytyslaitteisiin, joita tarkastelemme myöhemmin. (Li et al. 2007, Schlitz, Singhal 2008)



Kuva 24. Koronapuhaltimen rakenne (Schlitz, Singhal 2008).

5.2.3 Jäähdytysprofiilit pakotetussa ilmajäähdytyksessä

Aktiivisen ilmajäähdytyksen yhteydessä käytetään käytännössä aina jäähdytysprofiileja tuulettimien ja puhaltimien lisäksi. Edellä tarkastelimme profiilien suunnittelua ja valintaa luonnolliseen konvektioon perustuvissa järjestelmissä. Periaatteessa valintaprosessi on samanlainen, mutta pakotetun konvektion tapauksessa virtaushäviöihin tulee kiinnittää enemmän huomiota.

Pakotetussa konvektiossa profiilin lämmönsiirtokerroin on pääasiallisesti riippuvainen ilman virtausnopeudesta evien läpi, jonka takia eväsuunnittelun merkitys kasvaa luonnolliseen konvektioon verrattuna. Evien muodon, pituuden, paksuuden ja välimatkan lisäksi eväpintojen ominaisuudet vaikuttavat virtausnopeuteen. Virtausnopeuden lisääntyessä viskositeetti-ilmiöiden vaikutukset voimistuvat ja painehäviöt kasvavat. Tämän takia, mahdollisuuksien salliessa, profiilin pinta-alan lisäämisellä päästään yleensä parempiin tuloksiin kuin virtausnopeuden kasvattamisella. Varsinkin poikkileikkaukseltaan pyöreissä sormievissä painehäviöt ovat suuria eivätkä ne sovellu laitteisiin, joissa virtausnopeudet ovat erittäin korkeita. Perinteisten levymäisten evien painehäviöt ovat yleensä pienempiä kuin sormievien ja ne soveltuvatkin hyvin tilanteisiin, joissa virtausnopeuden tulee säilyä hyvänä. Virtausnopeus vaikuttaa myös profiilin optimaaliseen evän pituus-paksuus-tiheys -konfiguraatioon. Alhaisilla tuulettimen pyörimisnopeuksilla (1500rpm) ohuemmat levyvät ovat parempia kun taas suuremmilla nopeuksilla (4000rpm) leveämmät toimivat paremmin. (Gaowei et al. 2006, Kishimoto et al. 1984, Shah et al. 2004, Yaxiong et al. 2007)

5.2.4 Muut väliaineet

Tuulettimilla ja puhaltimilla voidaan ilman sijaan liikuttaa myös muita kaasumaisia väliaineita. Suljetuissa jäähdytyslaitteissa voidaan ilman sijaan käyttää muita kaasuja tai nesteitä, joihin palaamme seuraavassa luvussa. Esimerkiksi heliumin lämmönjohtavuus on kuusinkertainen ilmaan verrattuna. Turbulenttisilla helium-järjestelmillä voidaan päästä nestejäähdytyksen tasolle lämmönsiirrossa. Lisäksi tällaisten järjestelmien vaatimat puhallintehot ovat vain noin 20% ilmajärjestelmien vaatimasta tehosta, joten meluhaitat ja energiankulutus ovat vähäisempiä. (Kishimoto et al. 1984)

5.3 Nestejäähdytys

5.3.1 Nestejäähdytyksen toimintaperiaate

Nesteiden lämmönjohtavuudet ovat pääsääntöisesti suurempia kuin kaasumaisten väliaineiden, joten niiden avulla saavutetaan yleensä parempia lämmönsiirtokertoimia. Nestejäähdytys voidaan jakaa suoraan ja epäsuoraan nestejäähdytykseen. Suorassa nestejäähdytyksessä jäähdytysneste on suorassa kontaktissa jäähdytettävän pinnan kanssa, epäsuorassa jäähdytyksessä nesteen ja jäähdytyspinnan välissä käytetään ylimääräistä rajakerrosta yleensä sähköeristyksen takia. Yksinkertaisimmillaan nestejäähdytys voidaan toteuttaa suuren

vesimassan avulla, jolloin neste toimii lämpövarastona. Monimutkaisemmissa nestejäähdytysjärjestelmissä nestettä kierrätetään suljetussa rakenteessa kuumen ja kylmän systeemin osan välillä. Nestejäähdytyksellä voidaan päästä yli 100-kertaisiin jäähdytystehoihin luonnolliseen konvektioon verrattuna edellyttäen, että lämpöresistanssit jäähdyttimen ja jäähdytyspinnan sekä jäähdyttimen ja ympäristön välillä pystytään pitämään alhaisina. Nestejäähdytysjärjestelmissä ongelmia voivat kuitenkin tuottaa liiallinen paino, vuodot ja korrosio sekä kondensoituminen. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Kercher et al. 2003, Xiong et al. 2006)

5.3.2 Nestejäähdyslaitteet

Ilmajäähdytteisten systeemien tapaan nesteen virtausnopeuden nostaminen parantaa lämmönsiirtokerrointa. Suuria lämmönsiirtokertoimia saavutetaan ruiskutusjärjestelmillä, joissa neste pommitetaan suoraan jäähdytettävälle pinnolle. Tällaisten järjestelmien toimintaperiaate on samantyyppinen kuin aiemmin mainittujen ilmajäähdytteisten synteettisten ruiskupuhaltimien. Niillä saadaan aikaan voimakas, pieni-kokoinen, turbulenttinen suihku, joka keinotekoisesti synnytetään nesteestä johon se on upotettu. Suihku jaetaan suuttimien avulla pisaroiksi jäähdytettävälle pinnolle, joille muodostuvan ohuen turbulenttikerroksen lämmönsiirto on tehokasta suhteellisen pienilläkin nesteen ja jäähdytyspinnan lämpötilaeroilla. Tällaisissa ja muissakin nestejäähdytysjärjestelmissä kuuma vesi tulee kierrättää systeemissä joko gravitaatiota hyödyntäen tai pumppujen avulla, jotta jäähdytysneste ei kasaudu jäähdytettävälle pinnolle. (Ashwood, Shedd 2007, Mahalingam 2007, Shedd 2007)

5.3.3 Jäähdytysnesteet

Jäähdytysnesteinä voidaan käyttää vettä, mutta sen huonot dielektriset ominaisuudet rajoittavat sen käytön epäsuoriin sovelluksiin, joissa jäähdytyskohteen ja veden väliin tarvitaan sähköä eristävä rakenne, jonka seurauksena kokonaislämpöresistanssi kasvaa ja maksimilämpövuoto, joka laitteella voidaan jäähdyttää on usein alle 100 W/cm^2 . Lisäksi veden jäätymispiste on useille sovelluksille liian korkea. Veden sijaan voidaan käyttää erilaisia dielektrisiä eli sähköä johtamattomia nesteitä, mutta niiden käyttö edellyttää kemiallista ja sähköistä yhteensopivuutta sekä myrkyttömyyttä ja ympäristöystävällisyyttä. Suurin osa sopivista nesteistä on veteen verrattuna huonoja lämmönsiirtäjiä eli niiden lämmönjohtavuus, ominaislämpö ja/tai viskositeetti ovat alhaiset. Jäähdytysnesteet voidaan jakaa seuraaviin luokkiin

- vesi
- alkoholit
- suolat
- öljyt
- nestemäiset metallit
- fluorikloorihiili-yhdisteet

Veden sekaan voidaan lisätä alkoholeja tai suoloja jäätymispisteen alentamiseksi. Alkoholien lisääminen aiheuttaa kuitenkin merkittävää lämmönsiirron heikkenemistä ja syttymisvaaran. Suolojen lisääminen sen sijaan tekee järjestelmästä korroosioalttiimman. Joidenkin fluorikloorihiili-yhdisteiden käyttöä on ympäristösyistä rajoitettu jo vuodesta 1987 alkaen. Ympäristökäytöt rajoittavat myös lämmönjohtavuudeltaan hyvien nestemäisten metallien käyttöä. Hieman ympäristöystävällisempiä fluorin ja hiilen nestemäisiä yhdisteitä käytetään yleisesti suorissa nestejäähdytysjärjestelmissä niiden kemiallisen stabiiliuden takia, vaikka niiden lämmönjohtavuus veteen verrattuna onkin heikko ja hinta melko korkea. (Chu 1998, Mohapatra, Loikits 2005, Mudawar 1992, Tuma 2008)

5.3.4 Jäähdytysprofiilit nestejäähdytyksessä

Nesteen virtaus komponenttien ja sitä jäähdyttävän profiilin ympäristössä on monimutkaista. Nestevirtauksen lämmönsiirto on luonteeltaan pakotettua konvektiota ja sen mallintamiseen voidaan käyttää pakotetun konvektion kaavoja. Lämmönsiirtymiskerroin riippuu virtausnopeuden lisäksi käytettävän väliaineen tiheydestä, ominaislämmöstä, lämmönjohtavuudesta sekä viskositeetista. Nestejäähdytysjärjestelmissä nesteellä on päävastuu lämmönsiirrosta, jolloin jäähdytyslaitteen rakennemateriaalin vaikutus on vähäisempi. Varsinkin virtausta sisältävissä systeemeissä rakenteen pääasiallinen tarkoitus on ohjata nestevirtausta, joten materiaali voi käytännössä olla mitä tahansa kunhan se ei päästä nestettä lävitseen tai kunhan sen pinnan ja nesteen välinen kitka ei liiaksi hidasta nestevirtausta. Jos virtaavaa nestettä käytetään evämaisten jäähdytysprofiilien yhteydessä, soveltuvat levymäiset rakenteet paremmin nestevirtauksen ohjaamiseen. Levyjen muodostaman virtauskanavan leveys on otettava huomioon profiilia valitessa, sillä leveämissä kanavissa rajakerrosvirtauksen ja päävirtauksen välinen sekoittuminen ja lämmönsiirto seinämiltä ovat vähäisempiä. (Buttay et al 2007, Culham et al. 1994, Jahkonen 1983, Mahalingam 2007)

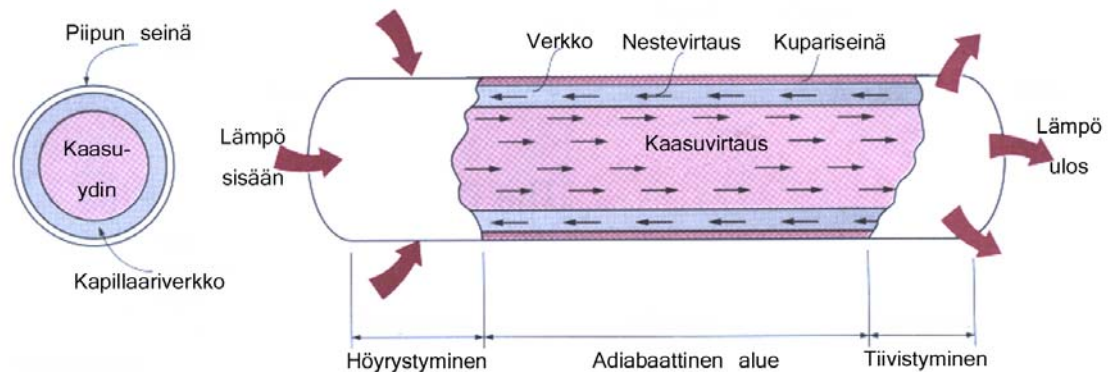
5.4 Höyrystyslaitteet

Kun nesteen lämpötila nousee riittävän korkeaksi paineen ja tilavuuden pysyessä vakioina, alkaa tapahtua kiehumista. Samoin jos kaasun lämpötila laskee tähän samaan saturaatiolämpötilaan, se tiivistyy takaisin nesteeksi. Näiden faasimuunnosten aikana lämpötila ei muutu, joten lämpöenergia kuluu olomuodon muutokseen. Tällaisten faasimuunnosten avulla lämpöä voidaan siirtää tehokkaasti pois kuumilta pinoilta. Faasimuunnoksen tuomia etuja voidaan hyödyntää nestejäähdytysjärjestelmissä käyttämällä jäähdytysnestettä, jonka kiehumispiste on esimerkiksi 10 astetta alhaisempi kuin kuumien pinnan sallittu maksimilämpötila. Faasimuunnoksia hyödynnettäessä on huomioitava se, että komponentin lämpötila voi laskea äkillisesti vahingoittaen sen toimintaa tai sitä ympäröiviä rakenteita. Lisäksi täytyy huomioida, että jos kiehumisen on liian voimakasta, eli jos saavutetaan niin sanottu kriittinen lämpövuoto, kuplien muodostuminen kuumalla pinnalla lisääntyy. Tällöin uuden nesteen pääsy pinnalle vaikeutuu ja pinta kuivuu, jonka seurauksena komponentin lämpötila nousee rajusti. Faasimuunnoksia

voidaan erityisen hyvin hyödyntää väliaikaiseen energian varastointiin ja silloin, kun lämmönsiirron tulee väliaikaisesti olla normaalia jäähdystystä tehokkaampaa. Nesteiden lisäksi voidaan käyttää kiinteitä tai kapseloituja faasimuunnosmateriaaleja, jolloin laitteen kiinnitysorientaatiolla ei ole yhtä suurta merkitystä ja vuotojen tai muiden rikkoutumisten riskit ovat pienemmät. (Çengel 2003, Leland, Recktenwald 2003, Mudawar 1992)

5.4.1 Lämpöpiiput

Lämpöpiiput ovat pienikokoisia ja tehokkaita lämmönsiirtimiä, mutta ne soveltuvat huonosti laitteisiin, joiden lämpöhäviöt ovat vaihtelevia ja jäähdystypinta-ala suuri. Niiden toiminta perustuu nesteen höyrystymiseen ja tiivistymiseen piipun eri päissä tietyssä paineessa ja lämpötilassa. Kuumassa päässä neste höyrystyy kaasuksi sitoen itseensä häviölämmön energiaa. Paine-eron vaikutuksesta höyry liikkuu putken toiseen päähän ja tiivistyy uudelleen nesteeksi vapauttaen siihen sitoutuneen lämpöenergian jäähdystysprofiiliin tai muuhun jäähdyttävään rakenteeseen. Neste virtaa takaisin kuumalle alueelle putken sisässä olevaa kapillaarirakennetta pitkin, minkä ansiosta piippu toimii kaikissa asennoissa, jopa gravitaation vastaisesti. Tehokkainta toiminta on kuitenkin lauhdutuspuolen ollessa ylöspäin suunnattu, jolloin lämpöpiipun lämmönjohtavuus voi olla monikymmenkertainen kuparin lämmönjohtavuuteen verrattuna. (Çengel 2003, Chu 1998, Jahkonen 1983)



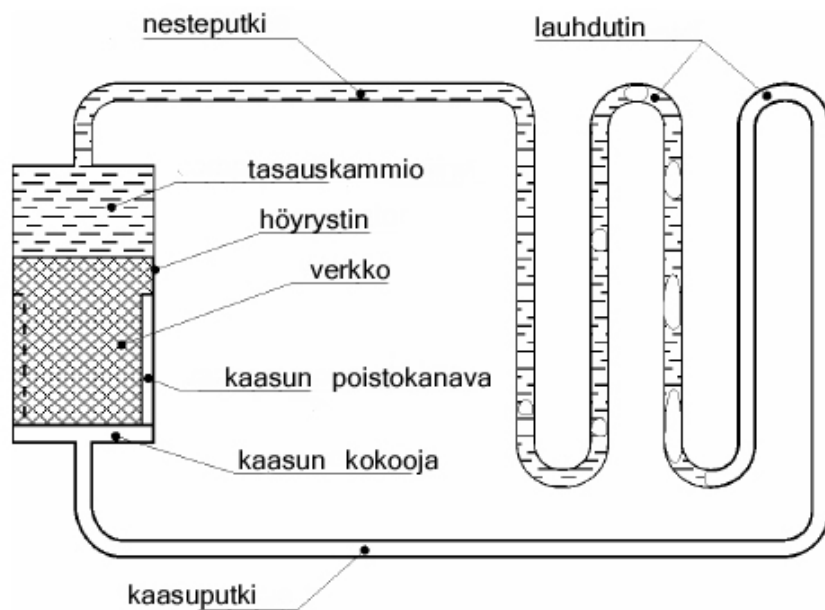
Kuva 25. Lämpöpiipun rakenne (Çengel 2003).

Lämpöpiipun jäähdystysteho riippuu käytettävästä nesteestä ja paineesta. Nesteen valintaan puolestaan vaikuttaa laitteen käyttölämpötila-alue. Kokonaisuudessa erilaisilla nestevaihtoehdoilla voidaan kattaa hyvin suuri lämpötila-alue lähes absoluuttisesta nollapisteestä aina noin 1900 Kelviniin asti. Nesteiden lämmönjohtavuutta voidaan edelleen parantaa esimerkiksi lisäämällä niiden sekaan pieniä määriä hopeisia nanohiukkasia. Käytettävän nesteen liian alhainen pintajännitys tai liian suuri viskositeetti aiheuttavat kapillaariputkessa kulkevan nesteen virtausnopeuden hidastumista, mikä on yleisin lämpöpiipun jäähdystystehoa rajoittava tekijä. Lämpöpiippujen jäähdystystehot ovat noin 100 – 1000 W. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Yu Tang et al. 2008)

Lämpöpiippujen rakenteen toiminnan ja eliniän kannalta kriittisiä tekijöitä ovat kapillaarirakenteen toimivuus, tiiviys, piipun halkaisija ja seinämien paksuus sekä nesteen ja

rakennemateriaalien yhteensopivuus. Kapillaariosa koostuu verkkomaisesta tai huokoisesta materiaalista, jonka kuljetusominaisuuksia voidaan muokata huokosten kokoa ja tiheyttä muuttamalla. Nesteen kuljettamisen lisäksi kapillaarirakenne lisää haihtumista ja tiivistymistä ja siten tehostaa lämpöpiipun toimintaa. Halkaisijan täytyy olla tarpeeksi suuri laminaarisen virtauksen takaamiseksi ja seinämien tarpeeksi paksut, jotta ne kestävät nesteen höyrönpaineen. Tiiviys, materiaalien yhteensopivuus ja rakenteiden puhtaus ovat olennaisia piipun elinikään vaikuttavia tekijöitä. Lämpöpiipun pituus ja muoto voidaan valita järjestelmän ja kuuman pinnan geometrisia mittoja silmällä pitäen. (Çengel 2003, Jahkonen 1983, Xiao Ping et al. 2007)

Perinteisten putkimaisten lämpöpiippujen sijaan voidaan käyttää kiertolämpöpiippuja. Kiertolämpöpiippujen toimintaperiaate on samanlainen kuin suorien lämpöpiippujen, mutta rakenteellisista eroista johtuen niiden toiminta on tehokkaampaa. Kaasu- ja nestevirtausputket ovat ohuita eikä niissä ole kapillaarirakennetta, joten ne voidaan taivuttaa lähes mihin tahansa muotoon. Höyrystimen kapillaarirakenteen hydraulinen resistanssi on alhainen ja virtaus sen myötä voimakkaampaa kuin perinteisissä lämpöpiipuissa. (Pastukhov, Maydanik 2006)



Kuva 26. Kiertolämpöpiipun rakenne (Pastukhov, Maydanik 2006).

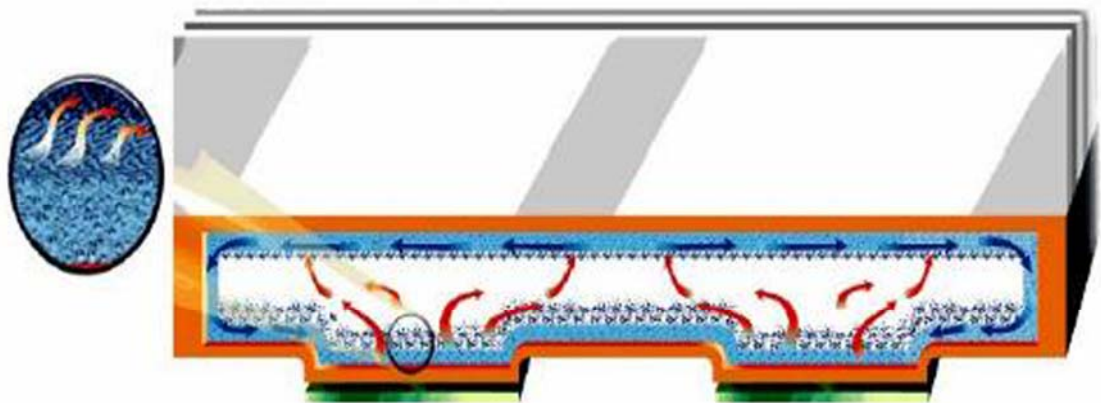
5.4.2 Muut faasimuunnosjäähdyttimet

Lämpöpiippujen lisäksi on olemassa myös muunlaisia faasimuunnoksia hyödyntäviä jäähdytyslaitteita. Tällaisia ovat esimerkiksi allaskiehumis-, kalvoruisku- ja kaasukammiosysteemit. Allaskiehumisjärjestelmät perustuvat nesteen passiiviseen kiertoon suljetussa kammiossa. Kuumalla pinnalla tapahtuvan kiehumisen tuottamat kaasukuplat kulkevat nesteen mukana kammion yläosan kylmälle pinnalle, tiivistyvät ja putoavat takaisin alas nestealtaaseen. Systeemille ominaista on passiivinen nesteen kierto sekä yksinkertaisuus valmistuksessa ja tiivistyksessä. Se on kuitenkin altis suurille ja nopeille lämpötilan muutoksille

ja kuivumista voi yksittäisien komponenttien lähellä tapahtua ennen kriittisen lämpövuon saavuttamista. (Mudawar 1992)

Kuten muissakin konvektioon perustuvissa jäähdyttimissä, faasimuunnosjärjestelmissä lämmönsiirtoa voidaan parantaa virtausnopeutta lisäämällä. Allaskiehumisjärjestelmään voidaan lisätä tiivistynyttä nestettä keräävä varasto, josta neste voidaan suihkuttaa jäähdytyspinnalle halutulla virtausnopeudella. Lisäämällä systeemiin pumppu voidaan paremmin taata nesteen riittäisyys kiehumispinnalla. Toisaalta suihkujärjestelmän käytön seurauksena kiehuvat nestepinnat ovat usein ohuita ja kiehumisen ollessa voimakasta nestekalvot rikkoutuvat helposti. Varsinkin alavirrassa tapahtuu usein pintojen kuivumista. Lisäksi suihkujen käyttö aiheuttaa eroosiota ja suurempia lämpötilaeroja kuumalla pinnalla allaskiehumisjärjestelmiin verrattuna. (Mudawar 1992)

Kaasukammiokiehumissysteemien toimintaperiaate on samanlainen kuin lämpöpiippujen ja niiden efektiivinen lämmönjohtavuus hyvin suuri, joten ne sopivat erityisen hyvin lämmön siirtämiseen. Niissä neste höyrystyy kuumalla pinnalla, tiivistyy kylmällä ja kulkee kapillaari-ilmiön ansiosta takaisin kierron alkuun. Kaasukammiojärjestelmä voidaan sijoittaa esimerkiksi perinteisen jäähdytysprofiilin kantaan, jolloin leviämislämpöresistanssi pienenee huomattavasti. Perinteisen metallikannan leviämisesistanssi riippuu merkittävästi kannan paksuudesta, joten varsinkin korkeusrajoitteisissa systeemeissä kaasukammion käyttöä kannattaa harkita. Lisäksi tällaisella toteutuksella päästään usein alhaisempiin materiaali-, kuljetus- ja käsittelykuluihin sekä painoon. (Xiao Ping et al. 2007, Xiong et al. 2006)

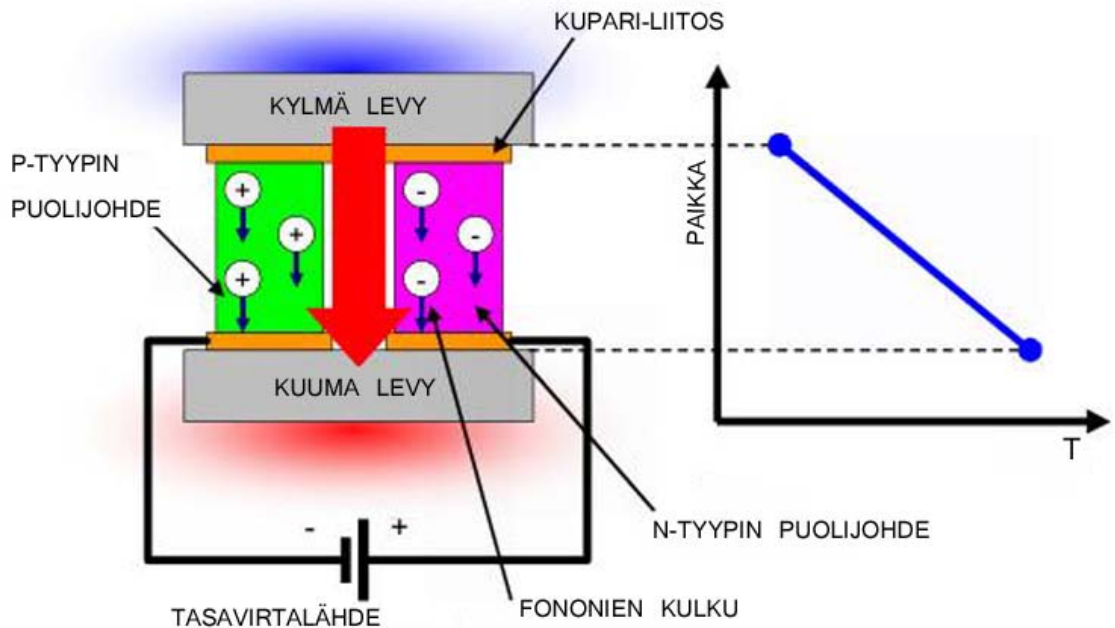


Kuva 27. Kaasukammioista jäähdytysprofiilissa (Xiong et al. 2006).

Faasimuunnosjärjestelmien lämmönsiirtoa voidaan parantaa aggressiivisten pintakäsittelymenetelmien avulla. Tällaisia ovat esimerkiksi pinnan karhentaminen, uurtaminen tai pinnan lisärakenteiden käyttö. Lisäksi jäähdytystehoa voidaan lisätä paluunesteen alijäähdytyksellä ja käyttämällä virtausta ohjaavia lisärakenteita. Lisäämällä pinnan hydrofilisuutta voidaan parantaa nesteen leviämistä pinnalle, jolloin höyrystyminen lisääntyy. (Fedorov, Meacham 2008, Mudawar 1992)

5.5 Termosähköiset jäähdyttimet

Termosähköiset jäähdyttimet, eli niin sanotut Peltier-elementit, muodostuvat sähköisesti sarjaan kytketyistä p- ja n-tyyppin puolijohdekerroksista, joissa lämpöenergiaa kuljettavia hiukkasia eli fononeita voidaan ohjata sähköpotentiaalilla. Lämmön kulkeutumista eri tyyppin puolijohdealueiden välillä voidaan säätää muuttamalla niiden välisen tasavirran suuruutta ja suuntaa. Myös lämmönsiirto kylmemmältä alueelta kuumalle on mahdollista. (Jahkonen 1983)



Kuva 28. Peltier-elementin toimintaperiaate (Ikeda et al. 2006).

Peltier-elementtien käytön yleistymistä ovat hidastaneet käsitykset siitä, että ne kuluttavat paljon energiaa ja ovat epäluotettavia. Termoelektrisen elementin tehonkulutus ei olekaan lineaarista suhteessa jäähdytystehoon ja sen hyötysuhde voi jäädä alhaiseksi. Pahimmassa tapauksessa termosähköisen jäähdyttimen käyttäminen voi rajusti lisätä systeemin kokonaislämpöhäviöitä. Jäähdytysnesteen ja liikkuvien osien puute tekevät niistä kuitenkin melko luotettavia ja meluttomia. Lisäksi tällaiset jäähdyttimet ovat pienikokoisia ja niitä voidaan käyttää paikallisesti kaikkein kuumimpien komponenttien yhteydessä. Termosähköisten jäähdyttimien jäähdytysteho riippuu elementin koosta, hyötysuhteesta, virrasta sekä lämpötilaerosta. Näihin vaikuttavat käytettyjen termoelektristen materiaalien lämmön- ja sähkönjohtavuudet sekä Seebeck-kerroin, joka on materiaalille ominainen termosähköisen jännitteen ja lämpötilaeron suhde. Hyvien materiaalien löytäminen on vaikeaa, sillä suuria sähkön- ja lämmönjohtavuuksia seuraa usein pieni Seebeck-kerroin. Jäähdytystehoa voidaan lisätä kytkemällä useampia Peltier-elementtejä sarjaan, mutta tällöin lämmön jakautuminen eri osien välillä on usein epäideaalista ja lämpöresistanssit kasvavat. Bian ja Shakouri (2006) ehdottavat ratkaisuksi epähomogeenista rakennetta, jossa sähkönjohtavuutta tasaisesti kylmältä pinnalta kuumalle päin alentamalla voidaan lisätä jäähdytystehoa. Koska pinta, jolle

lämpöä siirretään, lämpenee rajusti, tulee siihen kiinnittää jäähdytysprofiili, jonka jäähdytysteho on tarpeeksi suuri sekä jäähdytettävän laitteen että termosähköisen jäähdyttimen lämpöhäviöiden jäähdyttämiseen. (Bian, Shakouri 2006, Hun Sik et al. 2008, Ikeda et al. 2006, Jahkonen 1983, Vandersande, Fleurial 1996)

5.6 Mikrokanava- ja hybridijäähdyttimet

5.6.1 Mikrokanavien hyödyntäminen jäähdytyksessä

Kuten aiemmin mainittiin, pintojen huokoisuutta parantamalla voidaan lisätä sekä pinnan lämpösäteilyä että konvektiota. Valmistamalla pintoihin erilaisia epätasaisuuksia saadaan aktiivista lämmönsiirtopinta-alaa kasvatettua ja lämmönsiirto paranee.

Yleisimpiä ja lupaavimpia mikroteknisiä jäähdytyssovelluksia ovat mikrokanavajäähdyttimet, jotka sopivat erinomaisesti pienikokoisten laitteiden jäähdytykseen. Mikrokanavia käytetään pääasiassa nestejäähdytyksen yhteydessä. Tällaisissa jäähdyttimissä neste virtaa erittäin pienissä kanavissa, joiden yhteenlaskettu lämmönsiirtopinta-ala on erittäin suuri profiilin tilavuuteen nähden ja nesteen varastointitarve vähäinen. Mikrokanavajäähdyttimen lämmönsiirtokerroin laminaarisella virtauksella on kääntäen verrannollinen kanavan halkaisijaan, joka siis on yksi tärkeimmistä mikrokanavajäähdyttimen suunnitteluparametreista. Mikroprofiilien evät ovat pääosin levymäisiä, sillä sormimaisten evien monimutkaisten virtausten mallintaminen on vaikeaa ja painehäviöt vielä suurempia. Suurimpia mikrokanavaprofiilien elinikää lyhentäviä tekijöitä ovat eroosio ja korroosio etenkin niissä kanavan osissa, joissa esiintyy turbulenssia tai virtaus on nolla. Näitä ongelmia voidaan pyrkiä estämään esimerkiksi lisäämällä käytettäviin nesteisiin lisäaineita tai pulssittamalla nesteen virtausta. Mikrokanavaprofiileissa voidaan hyödyntää myös suihkutekniikkaa ja faasimuunnoksia. Parantuneen lämmönsiirron lisäksi näillä saavutetaan alhaisempia lämpötilaeroja kanavan alun ja lopun välillä sekä pienempiä painehäviöitä. Kanavan leveyden ohella kanavan paksuus on varsinkin suihkuavusteisissa järjestelmissä tärkeä suunnitteluparametri, sillä suihkujen täytyy pystyä läpäisemään kanavan syvyyden paksuinen nestekerros ennen jäähdytyspinnalle pääsyään. Myun Ki ja Mudawar (2008) kertovat, että mikrokanavaprofiileissa suihku-faasimuunnosyhdistelmän avulla voidaan päästä yli 1 kW/cm² jäähdytystehoihin. (Khan et al. 2006b, Leers et al. 2007, Myun Ki, Mudawar 2008, Weilin 2008, Yuan et al. 2006)

Mikrotekniikkaa hyödyntävien jäähdytysprofiilien lisäksi esimerkiksi suuri osa perinteisten makroprofiilien yhteydessä käytettävistä erilaisista pumppu- ja suihkujärjestelmistä valmistetaan mikroteknisiä menetelmiä hyödyntäen. Tällaisten systeemien etuja esimerkiksi perinteisiin tuulettimiin verrattuna ovat pieno koko, alhainen sähkönkulutus, paremmat virtausnopeudet, alhaisemmat painehäviöt ja parempi säädeltävyys. (Fedorov, Meacham 2008)

5.6.2 Hybridijäähdyttimet

Kuten aiemmin on mainittu, lähes kaikissa jäähdytyslaitteissa käytetään jäähdytysprofiilia primäärisenä tai sekundäärisenä lämmönsiirtovälineenä. Erilaisten jäähdytyslaitteiden, muidenkin kuin jäähdytysprofiilien ja tuulettimien, yhteiskäyttöä kannattaa harkita silloin, kun niiden yhteiskäytöllä voidaan merkittävästi parantaa jäähdytystehoa aiheuttamatta kuitenkaan liian suuria lämpöresistanssien, luotettavuusongelmien tai kustannusten kasvua. Esimerkiksi Ikeda et al. (2006) käyttävät tietokoneen keskusprosessorin 130 W:n häviölämmön jäähdyttämiseen termosähköelementin, lämpöpiipun ja kahden jäähdytysprofiilin yhdistelmää, jolla saavutetaan alhaisempia meluhaittoja ja pienempiä lämpöresistansseja kuin erillisillä jäähdyttimillä. Krishnan et al. (2005) ovat suunnitelleet faasimuunnosta hyödyntävän profiilin, joka varastoi lämpöenergiaa väliaikaisesti jäähdytysprofiilin evien päässä olevaan materiaaliin silloin, kun konvektio on tilapäisesti heikkoa. Hybridijäähdyttimiä ja muitakin jäähdytysvaihtoehtoja suunniteltaessa tulee kuitenkin pitää mielessä, että jokainen materiaaliiliitos ja rajapinta lisää luotettavuusriskejä, joten pääsääntöisesti jäähdytysuunnittelussa tulee pyrkiä mahdollisimman yksinkertaisiin rakenteisiin.

5.7 Yhteenveto

Markkinoilla olevien jäähdytyslaitteivaihtoehtojen kirjo on laaja ja elektroniikkalaitteen jäähdytys voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, joista kaikilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Jäähdytysprofiilit ovat periaatteessa luotettavimpia ja pitkäikäisimpiä jäähdytyslaitteita, mutta suurien lämpötehojen jäähdyttämiseen ne ovat kömpelöitä ja niiden materiaali-, valmistus- ja kuljetuskustannukset saattavat olla suuria. Luotettavuusongelmiltakaan ei täysin vältytä, sillä profiilin ja komponenttialustan välisen kunnollisen liitoksen aikaansaaminen ei ole helppoa varsinkaan, jos pinnoille ei löydy molempien materiaalien kanssa hyvin yhteensopivaa liitosmateriaalia. Yksinkertaisuutensa vuoksi jäähdytysprofiilien valintaa kannattaa kuitenkin suosia ja muita vaihtoehtoja harkita vasta silloin, kun profiileilla saavutettavat jäähdytystehot eivät ole riittäviä. Kaikkien vaihtoehtojen osalta valintaa tehdessä tulee huomioida ympäristön asettamat vaatimukset ja muut valintaa rajoittavat tekijät kuten koko ja hinta tai vaikkapa energiankulutus. Luotettavuutta pohdittaessa kannattaa muistaa, että hyvin suunniteltu on vasta puoliksi tehty ja jäähdytyslaitteen valmistuksen laatu, oli kyseessä sitten jäähdytysprofiili tai lämpöpiippu, on merkittävä tekijä systeemiltä vaaditun eliniän saavuttamisessa.

6 Kevytliikenneväylän valaisimen jäähdytys

Tässä luvussa esitetään kolme vaihtoehtoista jäähdytyslaitteenvaihtoehtoa kevytliikenneväylän valaisimen jäähdyttämiseksi. Lisäksi tarkastellaan komponenttivalinnan vaikutusta systeemitason jäähdytyksen kannalta. Aluksi käydään läpi valaisimelta ja jäähdytykseltä vaadittuja ominaisuuksia, minkä jälkeen tarkastellaan muutaman erilaisen jäähdytysvaihtoehdon lämpöresistanssiverkkoja ja ratkaisuehdotusten toimivuutta sekä hyviä ja huonoja puolia kevytliikennevalaisimen jäähdytyksen näkökulmasta.

6.1 Kevytliikenneväylän valaisimelta vaaditut ominaisuudet

6.1.1 Jäähdytysteho

Kevytliikenneväylän valaisimeen on valittu asennettavaksi kaksi valaisinmodulia, joissa kummassakin on kuusitoista Philipsin LUXEON Rebel LXML-PWC1-0100 LED-komponenttia. Näitä ajetaan 700 mA vakiovirralla. Philips Lumileds (2008) datalehden mukaan jännitekomponentin yli on noin 3,4 voltia, mutta laskee hieman lämpötilan nousun seurauksena. Valaisimen ottamaksi kokonaistehoksi voidaan laskea yhteensä suurimmillaan noin 76 W. Jos jäähdyttäminen tehdään aktiivisesti, lisääntyvät myös systeemin lämpöhäviöt. Jäähdytyksen osuudeksi tehonkulutuksesta sallitaan maksimissaan 10 %. Valoa säteilevän elektromagneettisen säteilyn osuus on pieni, noin 10 – 15 % suuruusluokkaa, ja lämpenemisen ja ikääntymisen myötä osuus pienenee, joten jäähdytettävän kokonaishäviölämpötehon voidaan arvioida olevan noin 70-80 W.

6.1.2 Lämpötilaero

LED-komponenttien aktiivialueen suurin sallittu lämpötila määritetään materiaalien ominaisuuksien, luotettavuuden, ikääntymisen ja sisäisen kvanttihyötysuhteen perusteella (Schubert 2006). Teoriassa LED-komponentin toimintalämpötila tulisi pitää mahdollisimman alhaisena, mutta käytännössä jäähdytys kannattaa suunnitella niin, että normaaliolosuhteissa komponentin lämpötila pysyy reilusti ilmoitetun toimintalämpötilan alapuolella ja pahimmissa olosuhteissakin aina varmasti komponentin maksimilämpötilan alapuolella. Katuvalaisimessa käytettävien LUXEON Rebel LED-komponenttien aktiivialueen maksimilämpötilaksi ilmoitetaan 150 °C ja suosituskäyttölämpötilaksi alle 135 astetta (Philips Lumileds 2008). Pitkän eliniän varmistamiseksi jäähdytys kannattaisi kuitenkin suunnitella niin, että komponentin lämpötila pysyy normaaliolosuhteissa alle sadan asteen.

Aktiivialueen lämpötilan lisäksi tulee määrittää valaisimen toimintaympäristön ylin lämpötila, josta saadaan lämpöresistanssin määrittämiseen tarvittava lämpötilaero aktiivialueen ja ympäristön välillä. Valaisimessa käytettävän LED-modulin toimintalämpötila-alueeksi on alunperin määritelty -55 ... +55 °C. Suomen olosuhteissa kevytliikenneväylien valaisinten käytön aikaiset ympäristölämpötilat ovat kuitenkin merkittävästi alhaisempia. Tällöin, jos

lämpöresistanssi mitoitetaan +55 asteen mukaisesti, saattavat aktiivialueiden lämpötilat jäähdytyslaitteesta riippuen pysyä jopa kymmeniä asteita suosituskäyttölämpötilan alapuolella.

6.1.3 Muut ominaisuudet

Jäähdytyslaitteen valintaan vaikuttavat myös valaisimelta vaadittu koko, elinikä, hinta ja energiankulutus. Kevytliikenneväylän valaisimet sijoitetaan yleensä ylös pylvään päähän hyvän valokeilan takaamiseksi ja ilkvallan estämiseksi. Tämä vaikeuttaa niiden huoltoa, joten valaisimen eliniän tulee olla pitkä. Philips Lumileds (2008) datalehden mukaan valituilla LED-komponenteilla eliniän odotetaan olevan noin 50000 tuntia, jos lämpötila saadaan pidettyä tavoitearvon alapuolella. Jäähdytyslaitteen eliniän tulee siis olla vähintäänkin yhtä pitkä.

Valaisinylvykset valmistetaan usein alumiinista. Pylvään tulee kestää kotelon paino ja esimerkiksi tuulenpuuskien aiheuttamat vääntymiset, joten jäähdytyslaitteen massa ja fyysiset mitat ovat rajoitettuja. Käytännössä kotelo voi olla melko tilava ja massa kohtalaisen suuri ellei LED-komponenttien tarjoamaa pienikokoisuutta haluta hyödyntää esimerkiksi esteettisistä syistä. Materiaali- ja kuljetuskustannukset kuitenkin kasvavat koon ja massan lisääntyessä. Tässä työssä valaisinkotelon tavoitemitoiksi asetetaan $20 \times 8 \times 4 \text{ cm}^3$ ja tavoitepainoksi noin 1 kg.

LED-valaisinten suurimpia kilpailuvaltteja ovat alhainen energiankulutus ja ympäristöystävällisyys. Vastuuntuntoinen jäähdytyssuunnittelija huomioi nämä seikat myös jäähdytyslaitetta valitessa. Aktiiviset jäähdytyslaitteet kuluttavat energiaa valaisinta käytettäessä ja lisäävät samalla systeemin kokonaislämpöhäviöitä ja jäähdytystarvetta. Passiivisissakin laitteissa energiankulutus voidaan huomioda valmistukseen ja kuljetuksiin tai kierrätykseen käytettävänä energiankulutuksena. Tässä työssä jäähdytyslaitteen osalta huomiodaan kuitenkin vain sen käytön aikainen sähkönkulutus. Suurimmaksi sallituksi ottotehoksi asetetaan 8 W.

LED-valaisimen kokonaiskustannukset muodostuvat materiaali-, suunnittelu- ja valmistuskustannusten lisäksi kuljetuskustannuksista ja käytön aikana koostuvista kustannuksista kuten sähkönkulutuksesta ja huoltokuluista. Muihin valaistusvaihtoehtoihin verrattuna LED-valaisinten kokonaiskustannusten täytyy olla kilpailukykyisiä, joten jäähdytyslaite tulee valita vaihtoehtojen halvemmasta päästä.

Ulkokäyttöön tarkoitettussa valaisimessa meluhaittojen merkitys ei välttämättä ole yhtä suuri kuin sisätiloihin tarkoitetuissa valaisimissa. Valaisimen kestävyys kosteutta, lämpötilan vaihteluita tai muita ympäristövaikutuksia vastaan sen sijaan tulee taata. Tavoitteeksi tässä työssä asetetaan kohtuullisen alhainen melutaso. Valaisinkotelon IP-luokituksen tulisi olla IP67. Kevytliikenneväylän valaisimessa LED-moduleiden kiinnitysasennon oletetaan olevan vakio, joten jäähdytysteho voi olla kiinnitysorientaatiosta riippuvaista.

6.1.4 Lämpöresistanssi

Valaisimen lämpöresistanssiverkko on kokonaisuudessaan monimutkainen. Kokonaislämpöresistanssi voidaan laskea yhtälön 12 avulla. Jos ympäristön maksimilämpötila

siis on 55 °C ja komponentin ylimmäksi sallituksi lämpötilaksi asetetaan 135 °C, saadaan kokonaislämpöresistanssiksi 1,05 °C/W jäädytettävän tehon ollessa noin 76 W. Jotta voidaan laskea jäädytyslaitteelta vaadittava lämpöresistanssi, tulee ensin laskea, kuinka suuri on komponenttien ja jäädytyslaitteen välinen lämpöresistanssi. Komponenttien aktiivialueen ja jäädytyslaitteen väliset lämpöresistanssit ovat ainoastaan johtumis- ja liitoslämpöresistansseja, mutta niidenkin laskeminen on monimutkaista johtuen useampidimensioisesta lämmönjohtumisesta useissa materiaalikerroksissa. Simulaation avulla voidaan arvioida lämpöresistanssi yhden komponentin ottamalle pinta-ala –alkiolle. Taulukossa 1 listataan simulaatiossa käytettyjä parametreja.

Taulukko 1. Yksittäisen komponentin aktiivialueen ja jäädytysprofiilin välisen lämpöresistanssi-simulaation parametreja.

Valaisimen osa	Tuotenimi/materiaali	Liitosresistanssityyppi seuraavaan kerrokseen	Paksuus [mm]	Lämmönjohtavuus [W/mm·K]
LED-komponentti	Philips LUXEON Rebel LXML-PWC1-0100	Juotos	0,52	0,0111
Juote	SnAgCu	Juotos	0,14	0,0570
Alustan kuparijohde	Cu	0	0,10	0,3860
MCPCB-eriste	T-preg 1KA08	0	0,20	0,0030
Alustan alumiinioksidi	Alumina 96%	0	1,50	0,0188
Liima	Nusil R-2930	Kuiva	0,20	0,0015

Simulaatiossa käytetyn pinta-ala alkion suuruus on 17,5 mm x 17,5 mm. LED-komponentin teho (2,38 W) on jaettu tasaisesti pinta-ala –alkion keskelle noin komponentin termoalustan kokoa vastaavalle alueelle, josta se johtuu muihin materiaalikerroksiin leviten noin 45 asteen kulmassa kaikissa materiaalikerroksissa. Muutaman, hieman toisistaan poikkeavan, lämpötila- ja jäädytysprofiilisimulaation mukaan jäädytyslaitteen ja komponentin aktiivialueen välinen lämpötilaero on noin 34 °C. Lämpöresistanssi komponentin aktiivialueen ja profiilin välillä on tällöin noin 14,3 °C/W.

Kaikkien kyseisessä valaisimessa käytettävien 32 komponentin ja jäädytyslaitteen välinen lämpöresistanssi voidaan laskea rinnankytkentäsäännöllä

$$\frac{1}{R_{a \rightarrow h}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (19).$$

Tässä $R_{a \rightarrow h}$ = aktiivialueen ja jäähdytysprofiilin välinen yhteenlaskettu lämpöresistanssi (K/W)

R_{1-n} = komponenttialueiden lämpöresistanssit (K/W).

Sarjaankytkentäsäännöllä saadaan jäähdytyslaitteen ja ympäristön väliseksi lämpöresistanssiksi

$$R_{h \rightarrow y} = R_{a \rightarrow y} - R_{a \rightarrow h} \quad (20),$$

jossa $R_{h \rightarrow y}$ = lämpöresistanssi jäähdytysprofiililta ympäristöön (K/W)

$R_{a \rightarrow y}$ = valaisimen kokonaislämpöresistanssi aktiivialueelta ympäristöön (K/W).

Jäähdytyslaitteen ja ympäristön välinen lämpöresistanssi saa siis tässä tapauksessa olla korkeintaan noin 0,6 °C/W.

6.1.5 Yhteenveto

Jäähdytyslaitteen tulisi siis täyttää seuraavat vaatimukset:

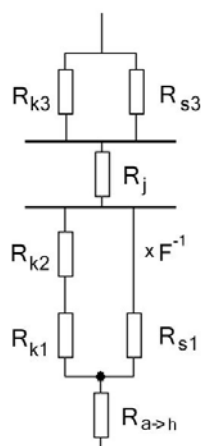
- Jäähdytysteho ainakin 75 W
- Lämpöresistanssi alle 0,6 °C/W
- Fyysiset mitat alle 20 cm x 8 cm x 4 cm
- Elinikä vähintään 50000 h
- Alhainen melutaso, hinta, tehonkulutus ja massa
- Toimintalämpötila-alue -55 ... + 55 °C
- Yhteensopivuus komponenttialustan ja kotelon kanssa.

6.2 Vaihtoehtojen tarkastelu

6.2.1 Koteloitu passiivinen jäähdytysprofiili

Tässä osassa näytetään, miksei kevytliikenneväylän valaisimessa kannata sellaisenaan käyttää alumiinivalukoteloon pakattua kahden LED-modulin ja niihin kiinnitetyn tavallisen eloksoidun alumiinisen levymäisen jäähdytysprofiilin yhdistelmää.

Komponentin ja laitteen toimintaympäristön välinen kokonaislämpöresistanssi koteloidussa systeemissä koostuu kuvan 29 mukaisista lämpöresistansseista. Ilman koteloa kokonaislämpöresistanssi muodostuu vain resistansseista $R_{a \rightarrow h} + R_{k1||s1}$, jossa $R_{k1||s1}$ tarkoittaa jäähdytysprofiilin konvektio- ja säteilyresistanssien rinnankytkentää. Tämän suuruus selvitetään simulaatiolla, jossa teho on jaettu tasaisesti horisontaalisen, ylöspäin suunnatun, tavoitetilavuuteen nähden maksimikokoisen jäähdytysprofiilin 5 mm paksulle kannalle.



Kuva 29. Koteloidun LED-valaisimen yksinkertaistettu lämpöresistanssiverkko.

Simulaation mukaan profiilin lämpötila on noin 122 °C ympäristön lämpötilan ollessa +55 astetta. Tämän lämpötilaeron ja jäähdystehon avulla saadaan jälleen yhtälöä 12 hyödyntäen lämpöresistanssi $R_{k||s1}$, joka on noin 0,88 °C/W. Tavoitemittaisella eloksoidulla alumiiniprofiililla, jonka levyvien pituus on 35 mm, välimatka 10 mm ja paksuus 2 mm, ei siis ilman koteloakaan voida jäähdyttää 76 W lämpöhäviötä tarpeeksi hyvin. Tarkastelemalla tarkemmin evien muotoa ja paksuutta sekä etäisyyttä tai esimerkiksi profiilin materiaalia voidaan profiilin jäähdystystä mahdollisesti jonkin verran parantaa, mutta tarkkojen lämpötilojen laskeminen ilman erittäin kalliita ja kunnollisia simulaatio-ohjelmia on käytännössä mahdotonta. Optimaalisimmassakaan tapauksessa tämän tyyppisen jäähdystysprofiilin lämpötila tuskin laskee alle halutun sadan asteen, sillä pinta-ala ja konvektion rajakerros ovat lämmönsiirrossa erittäin merkittäviä tekijöitä. Näin pienessä jäähdystysprofiilissa pinta-alaa ei yksinkertaisesti voida kasvattaa tarpeeksi tämän luokan lämpöhäviöiden jäähdyttämiseksi.

Jos systeemi halutaan suojata tavoitekokoisella kotelolla, tulee tilanne pahenemaan entisestään. Koteloitua tapausta varten selvitetään ensin koteloimattoman tapauksen konvektion ja lämpösäteilyn suhde, jotta voidaan myöhemmin laskea konvektion ja lämpösäteilyn lämpöresistanssit koteloidussa tapauksessa. Kun simuloidun jäähdystysprofiilin emissiivisyys ja siten siis lämpösäteily asetetaan nolaksi, nousee jäähdystysprofiilin lämpötila simulaation mukaan noin 141 asteeseen. Jälleen, kun lämpötilaero ja teho tunnetaan, voidaan päätellä konvektion lämpöresistanssi R_{k1} . Yhtälön 19 rinnankytkentäsääntöä soveltamalla voidaan edelleen laskea lämpösäteilyn lämpöresistanssin R_{s1} suuruus resistanssien $R_{k||s1}$ ja R_{k1} avulla.

Kotelon lisääminen aiheuttaa systeemiin edelleen uusia lämpöresistansseja. Kotelon sisäilman ja ylöspäin suunnatun seinän sisäpinnan välinen konvektiolämpöresistanssi R_{k2} saadaan soveltamalla yhtälöä 14. Tässä tapauksessa lämmönsiirtokertoimen suuruus voidaan arvioida likiarvoyhtälön 21 avulla (Jahkonen 1983).

$$\alpha_{k2} = 0,7 \cdot \left(\frac{\Delta T_{k2}}{L_{k2}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (21),$$

jossa α_{k2} = kotelon sisäilman ja katon sisäpinnan konvektion lämmönsiirtokerroin (W/(m²·K))

L_{k2} = ominaispituus (alhaalta lämmitetyille levyille levyn sivujen pituuksien keskiarvo, m)

ΔT_{k2} = kotelon sisällä olevan ilman ja kotelon sisäpinnan välinen lämpötilaero (K).

Lämpötilaeroa ei tiedetä tarkkaan, mutta se voidaan arvioida edellisen yhtälön avulla hyödyntäen lämpöresistanssin yleistä määritelmää

$$R = \frac{1}{\alpha A} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (22),$$

jolloin lämpötilaeron suuruus saadaan yhtälöstä

$$\dot{Q}_{k1} = 0,7 \cdot A_{k2} \Delta T_{k2} \left(\frac{\Delta T_{k2}}{L_{k2}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (23).$$

Siis R = lämpöresistanssi (K/W)

α = lämmönsiirtokerroin (W/(m²·K))

A = lämmönsiirtopinta-ala (m²)

ΔT = lämpötilaero (K)

\dot{Q}_{k1} = lämmönsiirtoteho konvektion lämmönsiirtoreitillä (W)

A_{k2} = kotelon jäähdyttävien sivujen pinta-ala (m²).

Konvektion lisäksi kotelon sisällä tapahtuu lämpösäteilyä. Konvektioresistanssien täytyy olla tarpeeksi pieniä, sillä muuten lämpötila nousee ja lämpösäteilyn osuus kasvaa räjähdysmäisesti. Kotelon sisällä tapahtuva lämpösäteily heijastelee kotelon sisäpinnoista takaisin jäähdytysprofiilille, joten sekä jäähdytysprofiiliin että kotelon sisä- ja ulkopintojen emissiokertoimet tulee ottaa huomioon koteloa valitessa. Tässä valaisimessa kotelomateriaalina käytetään valettua alumiiniseosta, jolloin kotelon ulko- ja sisäpintojen emissiokertoimet riippuvat merkittävästi valumateriaalin pintakäsittelystä. Lämpösäteilylle voidaan laskea niin sanottu näkyvyyskerroin yhtälöstä 24. Tämän avulla kotelon sisällä tapahtuvan lämpösäteilyn lämpöresistanssiksi saadaan on $R_{s2} = R_{s1} / F$. (Jahkonen 1983)

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_h} + \frac{1}{\varepsilon_{ps}} - 1} \quad (24),$$

jossa ε_h = jäähdytysprofiilin emissiokerroin

ε_{ps} = kotelon sisäpinnan emissiokerroin

Kotelon seinien johtumislämpöresistanssi ja lämpötilaero ulko- ja sisäpintojen välillä on yleensä pieni. Johtumislämpöresistanssi voidaan laskea yhtälön 13 avulla.

Lisäksi täytyy laskea kotelon ulkopinnan ja ympäristön väliset lämpöresistanssit. Kotelon ulkopinnan ja ympäristön välisen konvektion lämmönsiirtokerroin voidaan suorakulmaiselle kotelolle arvioida likiarvoyhtälön 25 avulla (Jahkonen 1983). Seinämien lämpösäteilyn lämpöresistanssin suuruus voidaan sen sijaan arvioida likiarvoyhtälöstä 15.

$$\alpha_{k3} = 1,4 \cdot \left(\frac{\Delta T_{k3}}{L_{k3}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (25),$$

jossa ΔT_{k3} = kotelon ulkopinnan ja ympäristön välinen lämpötilaero (yhtälöt 22 ja 23, K)

$$L_{k3} = \frac{h(a+b)}{2h+a+b} \quad (\text{kotelon ominaispituus, korkeus } h \text{ ja sivujen pituudet } a \text{ ja } b, \text{ m}).$$

Kotelon kanssa systeemin kokonaislämpöresistanssi voidaan kirjoittaa

$$R_{a \rightarrow y} = R_{a \rightarrow h} + \frac{R_{s2}(R_{k1} + R_{k2})}{R_{s2} + R_{k1} + R_{k2}} + R_j + \frac{R_{s3}R_{k3}}{R_{s3} + R_{k3}} \quad (26),$$

jossa $R_{a \rightarrow h}$ = lämpöresistanssi komponentin aktiivialueelta profiilille (K/W)

R_{s2} = lämpösäteilyn lämpöresistanssi kotelon sisällä (K/W)

R_{k1} = konvektioresistanssi profiililta kotelon sisäilmaan (K/W)

R_{k2} = konvektioresistanssi sisäilmasta kotelon sisäpintaan (K/W)

R_j = johtumislämpöresistanssi kotelon seinämissä (K/W)

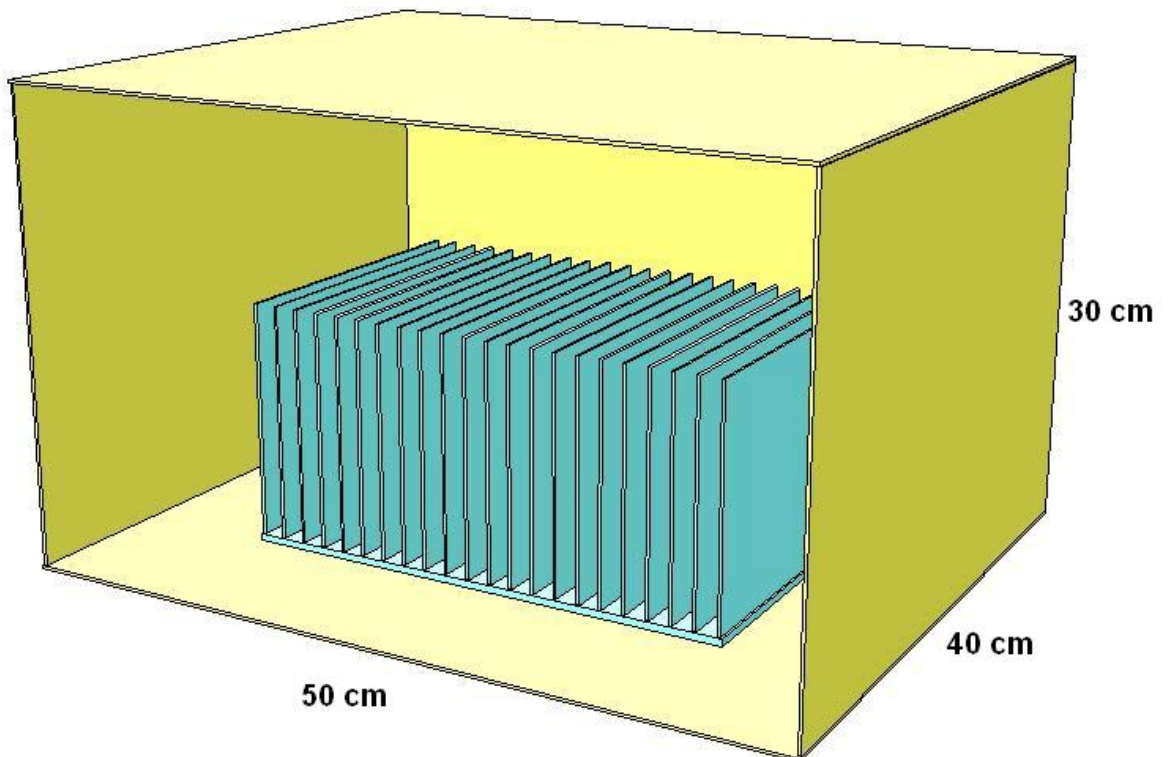
R_{s3} = kotelon ulkopinnan lämpösäteilyn lämpöresistanssi (K/W)

R_{k3} = kotelon ulkopinnan ja ympäristön välisen konvektion lämpöresistanssi (K/W).

Ilman koteloa valaisimen kokonaislämpöresistanssin voidaan simulaatioiden ja laskujen perusteella arvioida olevan noin 1,3 °C/W. Tämä tarkoittaa 76W teholla noin sadan asteen

lämpötilaeroa komponentin aktiivialueen ja ympäristön välillä. Pahimmassa tapauksessa komponentin lämpötila voi siis näin pientä jäähdytysprofiilia käytettäessä nousta jopa noin 155 Celsius-asteeseen. Jos tällaisen jäähdytysprofiilin päälle lisätään vielä umpinainen alumiinivalukotelo niin, että valaisimen muut osat juuri ja juuri mahtuvat kotelon sisään, voidaan lämpöresistanssin edellä esitetyn laskennan perusteella päätellä nousevan moninkertaiseksi. Liian pienen kotelon käyttäminen nolaa täysin jäähdytysprofiilin evien tuoman hyödyn ja aiheuttaa merkittävää haittaa konvektiolämmönsiirrolle. Koska sisällä olevan ilman lämmönjohtumiskerroin on huono, lämmönsiirto on erittäin tehotonta.

Tällä tavoin toteutetulla jäähdytyksellä ei siis päästä haluttuun jäähdytystehoon, jos halutaan pysyä valaisimelle asetetuissa tavoitemitoissa. Jos jäähdytys halutaan tehdä tällä tavoin, täytyy sekä profiilin kokoa että kotelon kokoa suhteessa profiiliin kasvattaa reilusti. Edellä kirjoitettuja kaavoja ja uusia simulaatioita apuna käyttäen voidaan tarvittavan profiilin mittojen arvioida olevan vähintään suuruusluokkaa 30 cm x 20 cm x 15 cm ja kotelon koon noin 50 cm x 40 cm x 30 cm. Koon kasvaessa kasvavat kuitenkin myös paino ja kustannukset. Lisäksi esimerkiksi valaisimeen kohdistuvat rasitusvoimat lisääntyvät ja valaisimen asentaminen sekä huoltaminen vaikeutuvat. Näin suurien lämpöhäviöiden ollessa kyseessä ei jäähdytysprofiilia siis kannata sijoittaa tiiviin kotelon sisään.



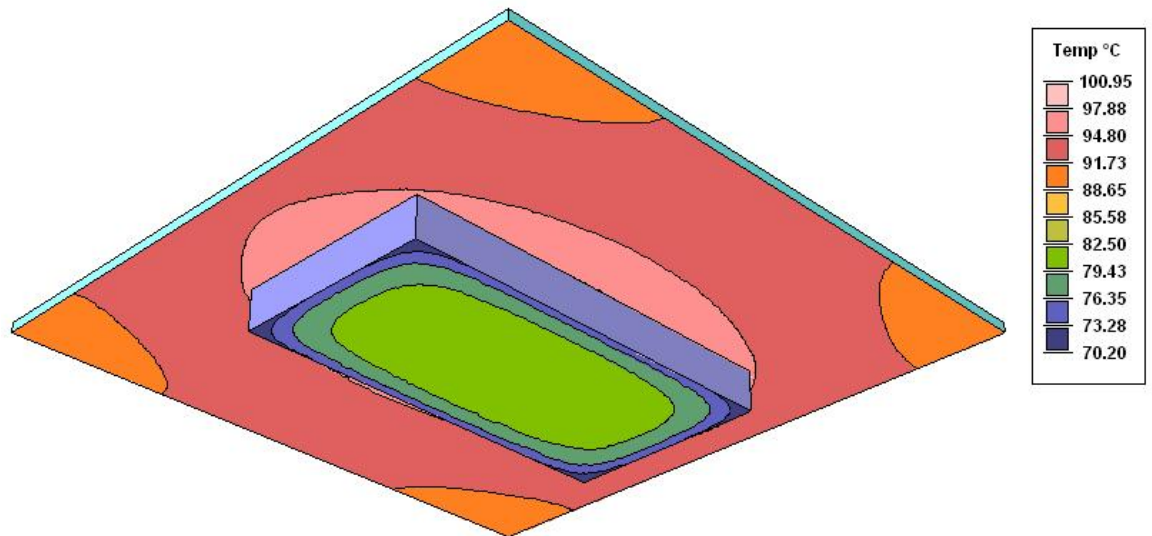
Kuva 30. Kotelolta ja profiililta vaadittavat mittasuhteet jäähdytystehon ollessa 76 W, jos jäähdytysprofiili halutaan sijoittaa kotelon sisään.

6.2.2 Koteloimaton passiivinen jäähdytys kevytliikenneväylän valaisimeen

Passiivinen jäähdytys on muihin vaihtoehtoihin verrattuna yleensä luotettava ja kohtuuhintainen eikä se kuluta energiaa käytön aikana. Koska kevytliikenneväylän valaisimelta ei aivan välttämättä vaadita äärimmäisen pientä kokoa, passiivista jäähdytystä ei kannata automaattisesti poissulkea. Kuten edellisestä luvusta voidaan päätellä, jäähdytysprofiilin kotelointi nostaa merkittävästi komponenttien lämpötilaa. Jos jäähdytysprofiili kuitenkin tuodaan kotelon ulkopuolelle ja vain kosteudelle ja lialle herkät osat koteloidaan, parantuu tilanne edelliseen esimerkkiin verrattuna huomattavasti.

Luonnollisen konvektion ja lämpösäteilyn avulla jäähdytettävä lämpövuoto on kuvan 15 mukaan noin $0,05 \text{ W/cm}^2$ suuruusluokkaa. Jahkonen (1983) ilmoittaa luonnollisen konvektion ja lämpösäteilyn yhteisvaikutuksen lämmönsiirtokertoimen olevan $5\text{-}20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{°C)}$. Näiden perusteella voidaan kyseessä olevan valaisimen jäähdyttämiseen tarvittavan lämmönsiirtopinta-alan arvioida olevan noin $0,1 - 0,3$ neliometriä. Huonoimmillaan pinta-alaa saatetaan siis tarvita jopa $0,6\text{m} \times 0,6\text{m}$ suuren levyn verran. Tarve pienenee sitä enemmän, mitä tehokkaampaa lämpösäteily ja konvektio ovat.

Eviä käyttämällä voidaan lisätä profiilin lämmönsiirtopinta-alaa, mutta samalla lämpösäteily voi heikentyä, sillä evät muodostavat esteitä lämpösäteilylle. Huonosti suunniteltu evärakenne saattaa haitata myös konvektiota. Käyttämällä jäähdytykseen tasomaista, hyvin säteilevää levyä, jossa eviä ei ole lainkaan, voidaan valaisimen jäähdytys toteuttaa melko yksinkertaisesti. Jäähdytyslevy voidaan myös taivuttaa haluttuun muotoon kunhan rakenne pysyy jotakuinkin levymäisenä, joten tämän tyyppinen ratkaisu ei myöskään rajoita esteettisen valaisinsuunnittelun mahdollisuuksia. Lämpösäteilyä merkittävästi hyödyntäviä jäähdytysprofiileita käytettäessä tulee kuitenkin muistaa, että lämpösäteily on voimakkaasti lämpötilariippuvaista. Jäähdytyslaitteen lämpöresistanssi siis vaihtelee ympäristöolosuhteiden mukaan eikä komponentin ja ympäristön lämpötilaero ole vakio. Kuvassa 31 on esitetty $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ suurella, 5 mm paksulla, eloksoidulla alumiinilevyllä toteutettu jäähdytysratkaisu, jonka keskelle on kiinnitetty erittäin huonosti lämpöä johtava ja säteilevä, kahta LED-modulia vastaava linssirakenne.



Kuva 31. Valaisimen passiiviseen jäähdytykseen suunnitellun eloksoidun alumiinilevyn lämpötila ympäristölämpötilassa 55 °C.

Taulukkoon kaksi on simulaatioiden perusteella arvioitu tämän tyyppisillä rakenteilla saavutettavia komponenttilämpötiloja eri ympäristöolosuhteissa. Jäähdytysprofiilin ja komponenttien lämpötilaeroksi laskettiin aiemmin noin 34 astetta, joten kuvan 31 mukaisella ratkaisulla komponentin lämpötila pysyy juuri ja juuri komponentin datalehdessä määritellyn suosituskäyttölämpötilan alapuolella kuumissakin ympäristölämpötiloissa. Kylmemmissä ympäristöolosuhteissa jäähdyttävän levyn lämpösäteily on heikompaa, mutta jäähdytys silti riittävää. Taulukosta nähdään, että 40 x 40 cm² kokoisella levyllä, jonka emissiivisyys on hyvä, voidaan toteuttaa yksinkertainen, halpa ja luotettava jäähdytys, jonka jäähdytysteho on tarpeeksi suuri takaamaan pitkän LED-komponenttien eliniän varsinkin Suomen ympäristöolosuhteet huomioon ottaen. Aivan tavoitelukemiin ei tilavuuden ja massan suhteen päästä, mutta edellisessä kappaleessa laskettuun suureen koteloituun ratkaisuun verrattuna kyseinen levyäinen ratkaisu on kuitenkin pieni ja kevyt.

Taulukko 2. Evättömille, levyäisille jäähdytysprofiileille arvioituja lämpötiloja.

Levyn koko (cm x cm)	Emissiivisyys	Ympäristön lämpötila (°C)	Profiilin lämpötila (°C)	Komponentin lämpötila (°C)
30 x 30	0,81	+55	+101	+136
30 x 30	0,81	+15	+67	+102
30 x 30	0,81	0	+55	+90
30 x 30	0,81	-15	+33	+68
40 x 40	0,81	+55	+88	+123

40 x 40	0,81	+15	+52	+87
40 x 40	0,81	0	+39	+74
40 x 40	0,81	-15	+26	+61
40 x 40	0,33	+55	+101	+136
40 x 40	0,33	+15	+64	+99
40 x 40	0,33	0	+49	+84
40 x 40	0,33	-15	+35	+70

Kotelon ulkopuolinen jäähdytysratkaisu voidaan toteuttaa myös evämäisen jäähdytysprofiilin avulla. Kuten mainittiin luvussa 5.2.1, Nabi et al. (2006) mukaan jäähdytysprofiilin evien pinnalle kertyvä lika ei merkittävästi laske profiilin jäähdytystehoa. Suurempi merkitys on ilmavirtausreitien pitämällä avoimena. Luonnollisen konvektion tapauksessa ilman virtaus on alunperinkin hidasta, joten likaantumisen ei merkittävästi odoteta heikentävän luonnollista konvektiota. Kappaleessa 3.3 puolestaan todettiin lämpösäteilyn olevan sitä voimakkaampaa mitä huokoisempi ja kiiltämättömämpi pinta on. Luonnollinen lika ja korrosio saattavat siis jopa lisätä pinnan lämpösäteilyä. Maalattujen pintojen emissiokertoimet ovat suuria, joten jäähdytysmateriaalina voidaan käyttää muutakin kuin edellä mainittua eloksoitua alumiinia kunhan sen lämmönjohtavuus on tarpeeksi hyvä levittämään häviötehon tasaisesti koko jäähdytyspinnalle. Profiili kannattaa kuitenkin suunnitella niin, että sen pintaan takertuu mahdollisimman vähän roskaa ja likaa. Evämäisillä rakenteilla tarpeeksi kauaksi toisistaan sijoitetut levymäiset evät ovat siis oletettavasti tähän tarkoitukseen paremmin sopivia.

6.2.3 Höyrystymistä hyödyntävä jäähdytyslaite kevytliikenneväylän valaisimeen

Kyseessä olevan kevytliikenneväylän valaisimen osalta edellisissä kappaleissa esitetyillä vaihtoehtoilla voidaan tulla toimeen, mutta jos valotehoa halutaan lisätä esimerkiksi lisäämällä valaisimeen kolmas 16-komponenttinen LED-moduli, kasvaa jäähdytystehon tarve niin suureksi, ettei luonnollisella jäähdytyksellä päästä tarpeeksi suuriin jäähdytystehoihin varsinkaan, jos valaisimen koko halutaan pitää pienenä.

Luonnollista konvektiota tehokkaampia jäähdytyslaitteivaihtoehtoja on useita. Kevytliikennevalaisimessa tuulettimen käyttö olisi ympäröivän ilman paljoudesta johtuen luonnollinen valinta, mutta tuulettimen liikkuvat osat kuluvat ja likaantuvat ajan myötä varsinkin haastavissa ympäristöolosuhteissa helposti, jolloin jäähdytyslaitteen elinikä saattaa jäädä liian lyhyeksi. Lisäksi tuulettimet, kuten myös muut puhaltimet ja ruiskuttimet sekä esimerkiksi Peltier-elementit kuluttavat jonkin verran energiaa, jolloin niiden käyttö valaisinsovelluksessa, jonka yhtenä tarkoituksena on pyrkiä pienentämään valaistuksen energiankulutusta, on ainakin

periaatetasolla hieman kyseenalaista. Tässä kappaleessa kevytliikennevalaisimen vaihtoehtoiseksi jäähdytyslaitteeksi valitaan höyrystymisjäähdytin.

Höyrystymisjäähdyttimellä voidaan päästä erittäin suuriin jäähdytystehoihin, joten kevytliikenneväylän valaisimen jäähdytys voitaisiin suunnitella niin, että komponenttien lämpötila pysyy 135 °C sijaan reilusti alhaisempana. Korkein vaadittu ympäristön toimintalämpötila 55 °C aiheuttaa kuitenkin sen, että käytetyn nesteen kiehumispisteen tulee olla yli 60 astetta, jotta lauhtumista tapahtuu höyrystymiskammion yläpinnalla. Valittavan nesteen jäätympisteen tulee puolestaan olla alle -55 °C. Kyseessä olevan valaisimen jäähdytysnesteeksi valitaan metanoli, sillä sen kiehumispiste on 64,6 °C ja jäätympiste -97,6 °C. Kahden vierekkäin sijoitetun modulin lämpöhäviöiden lämpövuoto on noin 6000 W/m². Kiehumista ajatellen lämpövuoto on erittäin pieni, joten kiehumisen aikana pysytään ydinkiehumisalueella. Kiehumispinnan lämpötila voidaan arvioida yhtälön 27 avulla. (Çengel 2003)

$$q_y = \eta_n h_{ke} \left[\frac{g(\rho_n - \rho_k)}{\sigma_{nk}} \right]^{0,5} \left[\frac{c_n (T_{kp} - T_{sat})}{B_{pn} h_{ke} Pr_n^l} \right] \quad (27),$$

jossa q_y = ydinkiehumisen lämmönsiirtokerroin (W/m²)

η_n = nesteen viskositeetti kg/(m·s)

h_{ke} = kaasuuntumisen entalpia (J/kg)

g = gravitaatiokiihtyvyys (m/s²)

ρ_n = nesteen tiheys (kg/m³)

ρ_k = kaasun tiheys (kg/m³)

σ_{nk} = neste-kaasu rajapinnan pintajännitys (N/m)

c_n = nesteen ominaislämpö (J/(kg·K))

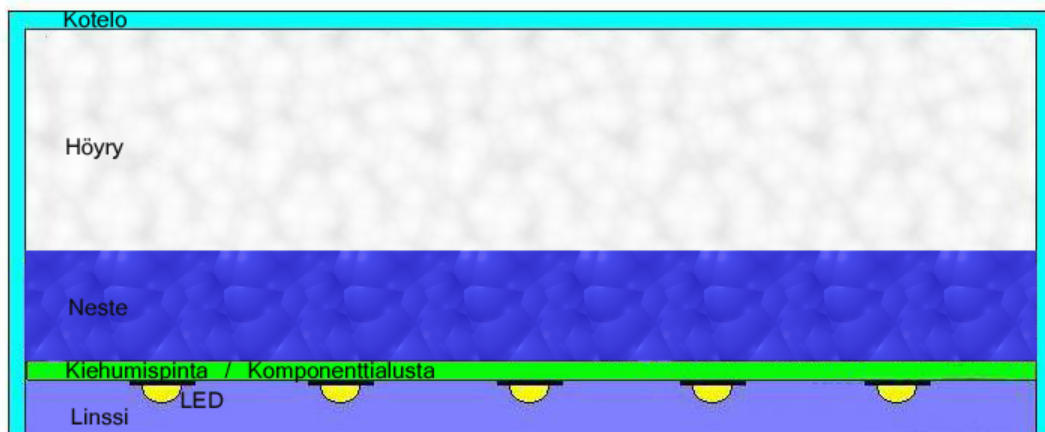
T_{kp} = jäähdyttimen kiehumispinnan lämpötila (K)

T_{sat} = nesteen saturaatiolämpötila (K)

B_{pn} = pinta-neste yhdistelmästä riippuva kokeellinen vakio

Pr_n = nesteen Prandtin luku

l = nesteestä riippuva kokeellinen vakio.



Kuva 32. Kevytliikennevalaisimen rakenne höyrystyvällä nesteellä jäähdytettäessä.

Kiehumispinnan lämpötilaksi saadaan noin 65 astetta, jolloin komponenttien lämpötila on siis noin 100 °C. Kiehumisjärjestelmän lämmönsiirtoteho riippuu ylös virtaavan kaasun virtausnopeudesta ja määrästä. Tarvittava lämpövuoto on kiehumiseen nähden pieni, joten kiehumisen ei ole kovin voimakasta. Nestettä ei tällöin tarvita kovin paljoa, mutta kuitenkin sen verran, että sitä on riittävästi kiehumispinnan kosteuden ja tarpeeksi suuren kaasumäärän ylläpitämiseen.

Kuvassa 29 esitettiin koteloidun valaisimen lämpöresistanssiverkko. Jäähdytyslaitteen ja kotelon sisäpinnan väliseksi lämpöresistanssiksi koteloidun jäähdytysprofiilin tapauksessa laskettiin 2,96 °C/W. Kiehumista käytettäessä lämpöresistanssiksi saadaan vain noin 0,1 °C/W, joka on edelliseen verrattuna huomattava parannus. Ikävä kyllä tavoitekokoiseen ratkaisuun ei siltikään päästä, sillä pelkästään kotelon ulkopinnan ja ympäristön välinen lämpöresistanssi on tavoitekokoiselle kotelolle noin 0,7 °C/W, kun jäähdytyslaitteen ja ympäristön väliseksi maksimilämpöresistanssiksi alkuperäisessä tavoitemäärittelyssä asetettiin 0,6 °C/W.

6.3 Komponenttien vaikutus kevytliikennevalaisimen jäähdytykseen

Tässä kappaleessa tutkitaan, voidaanko kevytliikennevalaisin toteuttaa jäähdytyksen kannalta järkevämmän vaihtamalla LED-komponentit toisiin. Edellä tarkasteltiin mallia, jossa yhteensä 32 Philipsin LUXEON Rebel LXML-PWC1-0100 LED-komponenttia on juotettu kahdelle MCPCB-alustalle, jotka liimataan kiinni jäähdytyslaitteeseen. Komponenttien aktiivialueen ja jäähdytyslaitteen välisen lämpöresistanssin arvioitiin tässä tapauksessa olevan noin 0,45 °C/W.

Vaihtoehtoisiksi LED-komponenteiksi on tässä tarkastelussa valittu Citizenin noin 7 W ja 16 W komponentit (CL-L102-C7N tai CL-L220-C16N-A). Jotta näillä komponenteilla saatava valoteho olisi vähintään yhtä hyvä kuin edellä käytetyn kahden LED-modulin yhdistelmän tuottama noin 4000 lumenta, tarvitaan CL-L102-C7N komponentteja yhteensä ainakin 10 ja CL-L220-C16N-A

komponentteja vähintään viisi. Kevytliikennevalaisimen valotehon tulisi kuitenkin 4000 lumenin sijaan olla 6000 lumenin suuruusluokkaa, joten tässä kappaleessa tarkastellaan myös tilanteita, joissa valaisimessa on 15 kappaletta CL-L102-C7N komponentteja tai kahdeksan kappaletta CL-L220-C16N-A komponentteja. (Citizen Electronics Co.,Ltd. 2009)

Komponenttien kohtalaisen pienestä määrästä johtuen ne voidaan kiinnittää suoraan jäähdytysprofiilin kannalle, jolloin komponenttialustan ja liiman aiheuttamista lämpöresistansseista päästään eroon. Taulukkoon kolme on simulaatioiden avulla arvioitu aktiivialueen ja jäähdytyslaitteen välisiä kokonaislämpöresistansseja kaikille edellä mainituille tapauksille. Komponentit on vertailun vuoksi sijoitettu yhtä suurelle kokonaispinta-alalle kuin Philipsin komponenteilla toteutetussa valaisimessa. Lämmönsiirron kannalta järkevämpää olisi kuitenkin jakaa komponentit tasaisesti paljon suuremmalle pinta-alalle.

Taulukko 3. Citizenin komponenteille arvioitujen aktiivialueiden ja jäähdytysprofiilin väliset lämpöresistanssit ja lämpötilaerot.

Malli	Määrä	Teho yhteensä (W)	Alkion ala (mm ²)	Valovirta (lm)	Resistanssi (°C/W)	Lämpötilaero (°C)
CL-L102-C7N	10	77	80 x 16	4000	0,23	18
CL-L102-C7N	15	115,5	16 x 53	6000	0,14	16
CL-L220-C16N-A	5	85	80 x 32	4000	0,29	25
CL-L220-C16N-A	8	136	40 x 40	6000	0,16	22

Yllä olevasta taulukosta nähdään, että Citizenin komponenteilla toteutettavissa valaisimissa komponentin aktiivialueen ja jäähdytyslaitteen väliset kokonaislämpöresistanssit ovat alhaisempia kuin edellisille moduleille arvioitu 0,45 °C/W. Tämän seurauksena lämpötilaerot aktiivialueen ja jäähdytyslaitteen välillä ovat pienempiä. Citizenin datalehdissä aktiivialueiden maksimilämpötiloiksi ilmoitetaan kuitenkin vain 120 °C ja kaikissa tapauksissa valaisimen kokonaisteho on suurempi kuin aiemmin käytetyn kahden modulin yhdistelmän, jonka takia valaisimen sallitut kokonaislämpöresistanssit eivät ole yhtä suuria kuin aiemmin. Citizenin noin seitsemän watin komponenteilla toteutettavien 4000 lm ja 6000 lm valaisinten jäähdytyslaitteiden lämpöresistanssit saavat olla hieman suurempia kuin käytettäessä kahta tai kolmea Philipsin komponenteista valmistettua modulia, joten jäähdytyksen kannalta järkevimmältä vaikuttaisi siis valaisimen toteuttaminen komponenteilla CL-L102-C7N. Ottaen

kuitenkin huomioon simulaatioiden ja arvioiden epätarkkuus, ei jäädytyksen kannalta saavutettavien hyötyjen voida varmuudella sanoa olevan merkittäviä käytännössä.

6.4 Johtopäätökset

Edellä esitetyillä ratkaisuilla voidaan kohtuullisen yksinkertaisesti toteuttaa luotettava kevytliikennevalaisimen jäädytys. Alussa asetettujen tavoitteiden osalta voidaan saavuttaa riittävä jäädytysteho sekä tarpeeksi alhainen lämpöresistanssi, melutaso, tehonkulutus ja hinta, jos tilavuudesta ollaan valmiita joustamaan. Myös valittujen ratkaisuvaihtoehtojen eliniän arvioidaan olevan riittävä. Tilavuuden osalta asetetut tavoitteet ovat kuitenkin liian haastavia, sillä lopullinen lämmönsiirto ympäristöön tapahtuu luonnollisen konvektion ja säteilyn yhdistelmänä. Tuuletinten avulla voitaisiin lisätä konvektiota ja siten päästä tavoitemittoihin, mutta tarpeeksi luotettavan tuuletuksen toteuttaminen näin vaativiin ympäristöolosuhteisiin olisi todennäköisesti erittäin vaativaa ellei mahdotonta.

Kevytliikennevalaisin sijoitetaan yleensä alumiinista valetun pylvään päähän, jota voidaan hyödyntää jäädytykseen. Kuten edellä olevista tarkasteluista käy ilmi, lämmönsiirtopinta-alaa tarvitaan kuitenkin melko paljon, jolloin kapeassa pylväässä lämpö pitää onnistua jakamaan tasaisesti kohtuullisen pitkälle pylvään osalle. Lisäksi pylvästä hyödynnettäessä täytyy käytettävien moduleiden kiinnityksessä pylväeseen kiinnittää erityistä huomiota hyvän lämmönsiirtopolun varmistamiseen mekaanisten vaatimusten lisäksi. Tässä työssä käytettävillä LED-moduleilla häviöteho on keskittynyt pienelle pinta-alalle eikä valetun alumiinin lämmönjohtavuus ole riittävä levittämään sitä tarpeeksi pitkälle pylväässä. Varsinkin tulevaisuudessa valaisimia saatetaan haluta sijoittaa eri materiaaleista valmistettuihin pylväisiin tai jo olemassa oleviin rakenteisiin, joita ei välttämättä voida tehokkaasti hyödyntää jäädytykseen. Pylvään ottamista osaksi jäädytystä tulee harkita myös esimerkiksi laitteen huoltoa, vaihdettavuutta ja valmistusta silmällä pitäen.

Jos valaisin jäädytyslaitteineen halutaan kokonaisuudessaan sijoittaa kotelon sisään, on suositeltavaa käyttää höyrystymiseen perustuvaa jäädytyslaitetta, sillä sen lämpöresistanssi on kohtalaisen pieni. Jäädytysprofiilin koteloininen vaikeuttaa konvektiota huomattavasti, joten jäädytysprofiileita käytettäessä kannattaa profiili sijoittaa suoraan ympäristön rajapinnalle. Komponenttien osalta voidaan todeta, että useita pieniä komponentteja käyttämällä saadaan lämpö tasaisemmin levitettyä suurelle pinta-alalle, jolloin lämmönsiirto on tehokkaampaa. Komponentit tulisi mahdollisuuksien mukaan kiinnittää suoraan jäädytyslaitteen kannalle, sillä komponenttialusta ja liimakerros lisäävät lämpöresistanssia ja luotettavuusriskejä. Komponenttien tehonkulutus tulisi saada alhaisemmaksi, sillä kuten edeltä nähdään, 76 W:n lämpöhäviöitä on jo jokseenkin vaikea jäädyttää passiivisilla jäädytyslaitteilla. Komponenttien jäädytystä suunniteltaessa tulisi kiinnittää erityistä huomiota myös laitteen ympäristöolosuhteiden kartoittamiseen, sillä esimerkiksi höyrystymisjäädytyksen suunnittelussa niiden tunteminen on tärkeää. Esimerkiksi tässä työssä käytetty ympäristön maksimilämpötila

+55 °C kuulostaa ainakin Suomessa liian korkealta jopa aurinkoisissa olosuhteissa, puhumattakaan hämäräiden vuorokauden- ja vuodenaikojen lämpötiloista, joissa valaisinta käytetään. Toisaalta komponenttien lämpötila tulee pitää mahdollisimman alhaisena, joten jäähtymisen ylimitoituksesta ei siinä mielessä ole haittaa.

7 Yhteenveto

Tämän työn perusteella voidaan suuritehoisten LED-valaisinten jäähdytyksen todeta olevan erittäin haasteellista. Toimivan valaisimen suunnittelussa ja toteutuksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota komponenttien valotehokkuuteen, toimintaympäristöön sekä valaisimen sallittuun kokoon.

Luonnollisella konvektiolla ja säteilyllä jäähdytettäessä pinta-alan tarve on suuri. Nopeuttamalla ilman virtausta voidaan lisätä konvektiota ja siten pienentää pinta-alan tarvetta, mutta tähän vaaditaan kunnollisia tuulettimia ja puhaltimia. Tällaisilla jäähdytyslaitteilla suurimmaksi haasteeksi muodostuu luotettavuus, joten valaisimen toimintaympäristöstä riippuen niiden käyttöä täytyy tarkkaan harkita. Jäähdytysprofiilit ovat luotettavia, mutta niiden käytön ei kuitenkaan tulisi olla itsestäänselvää suuritehoisten LED-valaisinten jäähdytystä suunniteltaessa.

Lämmönsiirron laskeminen ja mallintaminen on monimutkaista ja hankalaa. Erilaisten simulaatio-ohjelmien käyttö on välttämätöntä, mutta tällaiset ohjelmat ovat usein erittäin kalliita eikä niilläkään välttämättä päästä riittävän tarkkoihin tuloksiin. Luotettavan ja riittävän tehokkaan jäähdytyksen varmistamiseksi onkin siksi välttämätöntä testata ja vertailla jäähdytyslaitteita käytännön kokeiden avulla.

Tulevaisuudessa LED-komponenttien valotehokkuudet lisääntyvät. Valaisimilta tullaan kuitenkin todennäköisesti vaatimaan yhä suurempia valovirtoja ja pienempää kokoa, joten jäähdytettävät lämpövuot pysyvät suurina eikä jäähdytyksen merkitys valaisimen toiminnan kannalta ainakaan merkittävästi vähene. Jotta tulevaisuuden haasteisiin voidaan vastata, pitää myös jäähdytyslaitteiden kehittyä. Tehokkaiden jäähdytyslaitteiden luotettavuuden tulee parantua ja hinnan laskea, jotta niitä voidaan soveltaa LED-valaisinten jäähdytykseen. Myös jäähdytyslaitteiden energian- ja materiaalinkulutukseen tulee kiinnittää enemmän huomiota.

Lähteet

Abakr Y.A., Ismail A.F., Ahmed M.I. 2003. Intelligent Cooling of a Telecommunication Electronic Package. 4th National Conference on Telecommunication Technology, 2003, NCTT 2003 Proceedings. Sivut: 185-188. ISBN: 0-7803-7773-7.

Acikalin Tolga, Garimella Suresh V., Petroski James, Arvind Raman. 2004. Optimal Design of Miniature Piezoelectric Fans for Cooling Light Emitting Diodes. The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004, ITherm '04. Osa: 1. Sivut: 663-671. ISBN: 0-7803-8357-5.

AMI. 2009. Stress caused by thermal mismatch. Viitattu: 15.1.2009. Saatavissa: http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0162_sctm/images/fm_fsj_imgb.gif.

Arima. 2009. Introduction to Arima's Flip Chip LED (FCLED). Viitattu: 15.1.2009. Saatavissa: <http://www.aocepi.com.tw/html/ProductDoc/FlipChipLED.pdf>.

Ashwood Andrea C., Shedd Timothy A. 2007. Spray Cooling with Mixtures of Dielectric Fluids. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 144-148. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352414.

Bahadur Raj, Bar-Cohen Avram. 2004. Thermal Design and Optimization of Staggered Polymer Pin Fin Natural Convection Heat Sinks. The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004, ITherm '04. Osa: 1. Sivut: 268-275. ISBN: 0-7803-8357-5.

Bahadur Raj, Bar-Cohen Avram. 2005. Thermal Performance Limits of Polymer Composite Pin Fin Heat Sinks. 55th Electronic Components and Technology Conference, 2005, Proceedings. Osa: 2. Sivut: 1720-1720. ISBN: 0-7803-8907-7. DOI: 10.1109/ECTC.2005.1442025.

Bian Zhixi, Shakouri Ali. 2006. Cooling Enhancement Using Inhomogeneous Thermoelectric Materials. 25th International Conference on Thermoelectrics, 2006, ICT '06. Sivut: 264-267. ISBN: 1-4244-0811-3. DOI: 10.1109/ICT.2006.331365.

Buttay Cyril, Rashid Jeremy, Johnson Mark C., Ireland Peter, Udrea Florin, Amaratunga Gehan, Malhan Rajesh K. 2007. High Performance Cooling System for Automotive Inverters. 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. Sivut: 1-9. ISBN: 978-92-75815-10-8. DOI: 10.1109/EPE.2007.4417363.

Çengel Yunus A. 2003. Heat Transfer: A Practical Approach. Toinen painos. New York. McGraw-Hill. 932 sivua. ISBN: 0-07-115150-8.

Chapman Christopher L., Lee Seri, Schmidt Bill L. 1994. Thermal Performance of an Elliptical Pin Fin Heat Sink. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1994, SEMI-THERM X, Proceedings of 1994 IEEE/CPMT 10th. Sivut: 24-31. ISBN: 0-7803-1852-8. DOI: 10.1109/STHERM.1994.288998.

Chen Li, Wirtz R.A. 2005. Development of a High Performance Heat Sink Based on Screen-Fin Technology. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. Osa: 28. Numero: 1. Sivut: 80-87. ISSN: 1521-3331. DOI: 10.1109/TCAPT.2004.843171.

Chu R.C. 1998. Advanced Cooling Technology for Leading-Edge Computer Products. 1998 5th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, 1998. Sivut: 559-562. ISBN: 0-7803-4306-9. DOI: 10.1109/ICSICT.1998.785947.

Citizen Electronics Co.,Ltd. 2009. Lighting LED. Viitattu 6.3.2009. Saatavissa: http://products.ce.citizen.co.jp/e/lighting_led.html.

Culham J.R., Yovanovich M.M., Lee S. 1994. Thermal Modeling of Isothermal Cuboids and Rectangular Heat Sinks Cooled by Natural Convection. InterSociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems, 1994, I-THERM IV, Concurrent Engineering and Thermal Phenomena. Sivut: 73-82. ISBN: 0-7803-1372-0. DOI: 10.1109/ITHERM.1994.342912.

Dogruoz M. Baris, Arik Mehmet. 2008. An Investigation on the Conduction and Convection Heat Transfer from Advanced Heat Sinks. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems 2008, IThERM 2008, 11th Intersociety Conference. Sivut: 367-373. ISBN: 978-1-4244-1700-1. DOI: 10.1109/ITHERM.2008.4544293.

Dong-Kwon Kim, Jin-Kwon Bae, Sung Jin Kim. 2008. Comparison of Thermal Performances of Plate-Fin and Pin-Fin Heat Sinks Subject to an Impinging Flow. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems 2008, IThERM 2008, 11th Intersociety Conference. Sivut: 360-366. ISBN: 978-1-4244-1700-1. DOI: 10.1109/ITHERM.2008.4544292.

Dow Corning. 2009. High Brightness LED Tutorial. Viitattu: 15.1.2009. Saatavissa: http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicsled/etronics_led_tutorial1.asp?DCWS=Electronics&DCWSS=.

Dvinsky A., Bar-Cohen A., Strelets M. 2000. Thermofluid Analysis of Staggered and Inline Pin Fin Heat Sinks. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2000, IThERM 2000. Sivut: 164. ISBN: 0-7803-5912-7. DOI: 10.1109/ITHERM.2000.866822.

Egan V., Stafford J., Walsh P., Walsh E., Grimes R. 2008. An Experimental Study on the Performance of Miniature Heat Sinks for Forced Convection Air Cooling. 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2008, IThERM 2008. Sivut: 497-509. ISBN: 978-1-4244-1700-1. DOI: 10.1109/ITHERM.2008.4544310.

Electronics Cooling. 2009. Future Trends in Heat Sink Design. Viitattu: 29.1.2009. Saatavissa: http://www.electronics-cooling.com/articles/2001/2001_feb_a1.php.

Fedorov Andrei G., Meacham J. Mark. 2008. Evaporation-Enhanced, Dynamically-Adaptive Air (Gas)-Cooled Heat Sink for Thermal Management of High Heat Dissipation Devices. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems 2008, IThERM 2008, 11th Intersociety Conference. Sivut: 333-340. ISBN: 978-1-4244-1700-1. DOI: 10.1109/ITHERM.2008.4544288.

Franssila Sami. 2004. Introduction to Microfabrication. Ensimmäinen painos. Chichester. John Wiley & Sons Ltd. 402 sivua. ISBN: 0-470-85105-8.

Gaowei Xu, Jianshun Xue, Yingjun Cheng, Wenjie Zhu, Le Luo. 2006. Heat Transfer Characteristics of Small-Sized Plate-Fin Heat Sink Array in Supercomputer. Electronic Packaging Technology 2006, ICEPT '06, 7th International Conference. Sivut: 1-6. ISBN: 1-4244-0619-6. DOI: 10.1109/ICEPT.2006.359762.

Harper Charles A. 2004. Electronic Materials and Processes Handbook. Kolmas painos. New York. McGraw-Hill. 765 sivua. ISBN: 0-07-140214-4.

Ho Chul Ryu, Duckjong Kim, Sung Jin Kim. 2002. Experimental Analysis of Shrouded Pin Fin Heat Sinks for Electronic Equipment Cooling. The Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002, ITherm 2002. Sivut: 261-266. ISBN: 0-7803-7152-6. DOI: 10.1109/ITHERM.2002.1012466.

Hun Sik Han, Seo Young Kim, Tae Ho Ji, Young-Jun Jee, Daewoong Lee, Kil Sang Jang, Dong Hoon Oh. 2008. Heat Sink Design for a Thermoelectric Cooling System. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems 2008, ITherm 2008, 11th Intersociety Conference. Sivut: 1222-1230. ISBN: 978-1-4244-1700-1. DOI: 10.1109/ITHERM.2008.4544400.

Ikeda Masami, Nakamura Toshiaki, Kimura Yuichi, Noda Hajime, Sauciu Ioan, Erturk Hakan. 2006. Thermal Performance of Thermoelectric Cooler (TEC) Integrated Heat Sink and Optimizing Structure for Low Acoustic Noise / Power Consumption. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 144-151. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625220.

Jahkonen Pekka. 1983. Elektroniikkalaitteiden lämpösuunnittelu. Ensimmäinen painos. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Teletekniikan laboratorio. 112+9 sivua. Tiedotteita 168. ISBN: 951-38-1632-X.

Kabir Humayun, Ortega Alfonso. 1998. A new model for substrate heat spreading to two convective heat sinks: Application to the BGA package. Semiconductor Thermal Measurement

and Management Symposium 1998, SEMI-THERM Proceedings, Fourteenth Annual IEEE. Sivut: 24-30. ISBN: 0-7803-4486-3. DOI: 10.1109/STHERM.1998.660383.

Kai-Shing Yang, Wei-Hsin Chu, Ing-Yong Chen, Chi-Chuan Wang. 2007. Experimental Investigations on Airside Performance of Heat Sinks Having Pin Fin Configurations. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 208-212. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352425.

Kercher Dan S., Jeong-Bong Lee, Brand Oliver, Allen Mark G., Glezer Ari. 2003. Microjet Cooling Devices for Thermal Management of Electronics. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. Osa: 26. Numero: 2. Sivut: 359-366. ISSN: 1521-3331. DOI: 10.1109/TCAPT.2003.815116.

Khan W.A., Culham J.R., Yovanovich M.M. 2006a. The Role Of Fin Geometry in Heat Sink Performance. J. Electron. Packag. Osa: 128. Numero: 4. Sivut: 324-330. DOI: 10.1115/1.2351896.

Khan W.A., Yovanovich M.M., Culham J.R. 2006b. Optimization of Microchannel Heat Sinks Using Entropy Generation Minimization Method. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 78-86. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625210.

Kishimoto Tohru, Sasaki Etsuro, Moriya Kunio. 1984. Gas Cooling Enhancement Technology for Integrated Circuit Chips. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology. Osa: 7. Numero: 3. Sivut: 286-293. ISSN: 0148-6411.

KOTEL 84-008-A. 198?. Pintaliitos-, hybridi- ja polymeerikomponenttien lämpötilojen laskeminen. VTT/Tel. 9 sivua.

Krishnan Shankar, Garimella Suresh V., Kang Sukhvinder S. 2005. A Novel Hybrid Heat Sink Using Phase Change Materials for Transient Thermal Management of Electronics. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. Osa: 28. Numero: 2. Sivut: 281-289. ISSN: 1521-3331. DOI: 10.1109/TCAPT.2005.848534.

Kuivalainen Pekka. 2000. Puolijohdekomponentit. Otaniemi. 176 sivua.

Lasance Clemens J.M., Aarts Ronald M. 2008. Synthetic Jet Cooling Part I: Overview of Heat Transfer and Acoustics. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2008 IEEE Twenty-Fourth Annual IEEE. Sivut: 20-25. ISBN: 978-1-4244-2123-7. DOI: 10.1109/STHERM.2008.4509360.

Lasance C.J.M., Murray C.T., Saums D.L., Renez M. 2006. Challenges in thermal interface material testing. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 42-49. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625204.

Leers Michael, Scholz Christian, Boucke Konstantin, Oudart Myriam. 2007. Next Generation Heat Sinks for High-power Diode Laser Bars. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 105-111. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352395.

Leland Jason, Recktenwald Gerald. 2003. Optimization of a Phase Change Heat Sink for Extreme Environments. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2003, Nineteenth Annual IEEE. Sivut: 351-356. ISBN: 0-7803-7793-1. DOI: 10.1109/STHERM.2003.1194384.

Li H.Y., Huang R.T., Sheu W.J., Wang C.C. 2007. EHD Enhanced Heat Transfer with Needle-Arrayed Electrodes. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 149-154. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352415.

Mahalingam Raghav. 2007. Modeling of Synthetic Jet Ejectors for Electronics Cooling. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 196-199. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352423.

Moffat Robert J. 2007. Modeling Air-Cooled Heat Sinks as Heat Exchangers. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 200-207. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352424.

Mohapatra Satish C., Loikits Daniel. 2005. Advances in Liquid Coolant Technologies for Electronics Cooling. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2005, Twenty First Annual IEEE. Sivut: 354-360. ISBN: 0-7803-8985-9. DOI: 10.1109/STHERM.2005.1412204.

Mudawar Issam. 1992. Direct-Immersion Cooling for High Power Electronic Chips. InterSociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems, 1992, I-THERM III. Sivut: 74-84. ISBN: 0-7803-0503-5. DOI: 10.1109/ITHERM.1992.187743.

Myung Ki Sung, Mudawar Issam. 2008. Single-Phase and Two-Phase Hybrid Cooling Schemes for High-Heat-Flux Thermal Management of Defense Electronics. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems 2008, ITherm 2008, 11th Intersociety Conference. Sivut: 121-131. ISBN: 978-1-4244-1700-1. DOI: 10.1109/ITHERM.2008.4544262.

Nabi Aharon, Rodgers Peter, Bar-Cohen Avram. 2006. Prediction of Thermal Performance Degradation of Air-Cooled Fine-Pitch Fin Array Heat Sinks due to Fouling. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 2-9. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625198.

Pastukhov Vladimir G., Maydanik Yury F. 2006. Low-Noise Cooling System for PC on the Base of Loop Heat Pipes. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 95-101. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625212.

PC Perspective. 2009. Zalman CNPS7700-Cu Heatsink Fan. Viitattu: 29.1.2009. Saatavissa: <http://www.pcper.com/article.php?aid=113&type=expert>.

Philips Lumileds. 2008. LUXEON Rebel Technical Datasheet DS56. Viitattu: 2.2.2009. Saatavissa: <http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS56.pdf>.

Pitts Donald R., Sissom Leighton E. 1998. Schaum's Outline Of Theory And Problems Of Heat Transfer. Toinen painos. USA. McGraw-Hill. 369 sivua. ISBN: 0-07-050207-2.

Ren-Tsung Huang, Wen-Junn Sheu, Hsing-Yung Li, Chi-Chuan Wang, Kai-Shing Yang. 2006. Natural Convection Heat Transfer from Square Pin Fin Heat Sinks Subject to the Influence of Orientation. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 102-107. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625213.

Sang-jeon Cho, Allen E., Don Nguyen, Quyen Chu. 2007. Process Development for Heat Sink Attachment Using Thermally Conductive Liquid Adhesives. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 112-117. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352396.

Saums D.L., Edward B., Ruzicka P., Fennessy K., Hay R., Zimmer J., Sundberg G.J. 2006. Diamond Pins Utilized as Thermal Vias for High Heat Flux Spreading in CTE-Compatible Lids and Substrates for Semiconductor Packaging. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 162-172. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625223.

Schlitz Dan, Singhal Vishal. 2008. An Electro-Aerodynamic Solid-State Fan and Cooling System. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2008 IEEE Twenty-Fourth Annual IEEE. Sivut: 46-49. ISBN: 978-1-4244-2123-7. DOI: 10.1109/STHERM.2008.4509364.

Schubert E Fred. 2006. Light Emitting Diodes. Toinen painos. Cambridge. Cambridge University Press. 422 sivua. ISBN: 0-521-86538-7.

Scott Thomas Computer Networking. 2009. FAN_CMCPU3000+. Viitattu: 29.1.2009. Saatavissa: <http://www.scottthomasmfg.com/Fans.htm>.

Shabany Younes. 2007. High-Level Packaging Options for Outdoor Remote Units. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 18-23. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352387.

Shah Amit, Sammakia Bahgat G., Srihari Hari, Ramakrishna Koneru. 2004. A Numerical Study of the Thermal Performance of an Impingement Heat Sink-Fin Shape Optimization. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. Osa: 26. Numero: 1. Sivut: 3-5. ISSN: 1521-3331. DOI: 10.1109/TCAPT.2003.810756.

Shedd Timothy A. 2007. Fundamental Behaviors and Limits of Impingement Cooling. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 179-183. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352420.

Sikka Kamal K., Torrance Kenneth E., Scholler C.U., Salanova P.I. 2002. Heat Sinks With Fluted and Wavy Plate Fins in Natural and Low-Velocity Forced Convection. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. Osa: 25. Numero: 2. Sivut: 283-292. ISSN: 1521-3331. DOI: 10.1109/TCAPT.2002.1010019.

Sinkkonen Juha. 1996. Puolijohdeteknologian perusteet. Ensimmäinen painos. Otaniemi. Elektronifysiikan laboratorio, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Teknillinen Korkeakoulu. 308 sivua. Reports in Electron Physics 1996/11. ISBN: 951-22-3242-1.

Tae Ho Ji, Seo Young Kim, Keun Sun Chang. 2004. Cooling Performance of Triangular Folded Fin Heat Sinks in a Duct Flow. The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004, ITherm '04. Osa: 1. Sivut: 325-330. ISBN: 0-7803-8357-5.

Tasaka M., Shinohara K., Hayashi C., Kashima S., Koyama K. 1998. Cooling Performance of Heat Sinks with Corrugated-fins. The Sixth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 1998, ITherm '98. Sivut: 104-111. ISBN: 0-7803-4475-8. DOI: 10.1109/ITHERM.1998.689526.

The Engineering Toolbox. 2009. Methanol – Thermophysical Properties. Viitattu 6.3.2009. Saatavissa: http://www.engineeringtoolbox.com/methanol-properties-d_1209.html.

Thurlow Ernest, Prather Erik, Mansingh Vivek. 2000. Fan Swirl Effects on Cooling Heat Sinks and Electronic Packages. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2000, Sixteenth Annual IEEE. Sivut: 91-98. ISBN: 0-7803-5916-X. DOI: 10.1109/STHERM.2000.837067.

Treurniet Theo, Lammens Vicky. 2006. Thermal management in color variable multi-chip led modules. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 173-177. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625224.

TTIC Thermal Transtech International Corporation. 2009. Skived Fins HeatSinks, FC1280A-35. Viitattu 29.1.2009. Saatavissa: http://www.npowertek.com/product/index_heatsink.htm.

Tuma Phillip E. 2008. Fluoroketone C₂F₅C(O)CF(CF₃)₂ as a Heat Transfer Fluid for Passive and Pumped 2-Phase Applications. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2008 IEEE Twenty-Fourth Annual IEEE. Sivut: 173-179. ISBN: 978-1-4244-2123-7. DOI: 10.1109/STHERM.2008.4509386.

Vandersande Jan W., Fleurial Jean-Pierre. 1996. Fifteenth International Conference on Thermoelectrics, 1996. Sivut: 252-255. ISBN: 0-7803-3221-0. DOI: 10.1109/ICT.1996.553311.

Visser J.A., de Kock D.J., Conradie F.D. 2000. Minimisation of heat sink mass using mathematical optimisation. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2000, Sixteenth Annual IEEE. Sivut: 252-259. ISBN: 0-7803-5916-X. DOI: 10.1109/STHERM.2000.837091.

Wait Sydney M., Basak Sudipta, Garimella Suresh V., Raman Arvind. 2007. Piezoelectric Fans Using Higher Flexural Modes for Electronics Cooling Applications. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. Osa: 30. Numero: 1. Sivut: 119-128. ISSN: 1521-3331. DOI: 10.1109/TCAPT.2007.892084.

Weilin Qu. 2008. Comparison of Thermal-Hydraulic Performance of Single-Phase Micro-Pin-Fin and Micro-Channel Heat Sinks. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic

Systems 2008, IThERM 2008, 11th Intersociety Conference. Sivut: 105-112. ISBN: 978-1-4244-1700-1. DOI: 10.1109/ITHERM.2008.4544260.

Wiley-VHC. 2009. Plastic Optics Enable LED Lighting Revolution. Viitattu 15.1.2009. Saatavissa: http://www.wiley-vch.de/berlin/journals/op/07-04/OP0704_S42_S45.pdf.

Xiao Ping Wu, Mochizuki Masataka, Thang Nguyen, Saito Yuji, Wuttijumnong Vijit, Ghisoiu Horia, Kumthonkittikul Vichan, Sukkasaem Parichart, Nimitkiatkhai Pichit, Kiyooka F. 2007. Low Profile-High Performance Vapor Chamber Heat Sinks For Cooling High-Density Blade Servers. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 174-178. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352419.

Xiong Daxi, Azar Kaveh, Tavassoli Bahman. 2006. Experimental Study on a Hybrid Liquid/Air Cooling System. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. Sivut: 10-15. ISBN: 1-4244-0153-4. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625199.

Yang Michael C. 2001. Thermal Comparison of Plate, Extrusion Heat Sink, and Skive Heat Sink. Semiconductor Thermal Measurement and Management, 2001, Seventeenth Annual IEEE Symposium. Sivut: 102-106. ISBN: 0-7803-6649-2. DOI: 10.1109/STHERM.2001.915156.

Yaxiong Wang, Yinshan Feng, Dong Robert, Chou Phil. 2007. Investigation of CPU Thermal Solution Designs for BTX Desktop System. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium 2007, SEMI-THERM 2007, Twenty Third Annual IEEE. Sivut: 24-29. ISBN: 1-4244-09589-4. DOI: 10.1109/STHERM.2007.352388.

Yu J.H., Oepts W., Konijn H. 2008. PC board Thermal Management of High Power LEDs. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2008 IEEE Twenty-Fourth Annual IEEE. Sivut: 63-67. ISBN: 978-1-4244-2123-7. DOI: 10.1109/STHERM.2008.4509368.

Yu Tang Chen, Wei Chiang Wei, Shung Wen Kang, Chun Sheng. 2008. Effect of Nanofluid on Flat Heat Pipe Thermal Performance. Semiconductor Thermal Measurement and Management

Symposium, 2008 IEEE Twenty-Fourth Annual IEEE. Sivut: 16-19. ISBN: 978-1-4244-2123-7. DOI: 10.1109/STHERM.2008.4509359.

Yuan Liulin, Liu Sheng, Chen Mingxiang, Luo Xiaobing. 2006. Thermal Analysis of High Power LED Array Packaging with Microchannel Cooler. Electronic Packaging Technology 2006, ICEPT '06, 7th International Conference. Sivut: 1-5. ISBN: 1-4244-0619-6. DOI: 10.1109/ICEPT.2006.359826.

Žukauskas Artūras, Shur Michael S., Gaska Remis. 2002. Introduction to Solid-state Lighting. Ensimmäinen painos. New York. John Wiley & Sons Inc. 207 sivua. ISBN: 0-471-21574-0.

Liitteet

Liite 1: Komponenttialustan kuparointisimulaatioiden parametrit

SAUNA INFO REPORT

Date and time : 6-Mar-09 08:45
Model file : 32W on FR4 kupari1.smf
Calc type : Steady state
Sauna version : V3.90
Air pressure : One atmosphere
Units : Degrees C, mm, watts
Comments : None

ASSEMBLY INFORMATION

SINK

-- Basic Geometry --
Assembly type : Plate with fins
Orientation : XY plane
Origin point : (0, 0, -0.51)
Wide x high x thick : 80.00 x 80.00 x 5.00
Volume : 1.600E+5
Component side : Positive direction (front)
Edge area option : 50% assigned to each side
X node spacing : 2.11
Y node spacing : 2.11
In superassembly : No

-- Material Properties --
Material type : Alum Extrusion Alloy, 6063 T5
Thermal conductivity : 2.091E-1
Density : 2.700E-6
Specific heat : 942.00
Mass : 0.43 (0.95 lbm)
Capacitance : 406.94

-- Component Side Properties --
Surface type : Aluminum, Anodized
Emissivity : 0.81

-- Secondary Side Properties --
Surface type : Aluminum, Anodized
Emissivity : 0.81
Fin orientation : Vertical
Fin length : 50.00
Centerline spacing : 5.00
Fin thickness : 2.00
Number of fins : 16.00
End fin type : Both open
Short fin forced conv : Open (smooth transition to plt)
Nodes in fins : No

-- Component Side Dissipation --
Usable face area : 0.00
Usable edge area : 800.00
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type : None

-- Secondary Side Dissipation --
Usable face area : 6400.00
Conv/radiation area : 6400.00 (100.00% of usable)
Usable edge area : 800.00
Conv/radiation area : 800.00 (100.00% of usable)
Conv/radiation type : Isolated plate/board to ambient
Convection mode : Natural convection
Flow length type : Take from assembly/superassy
Flow length : 80.00
h vs. length : Use average h
Conv/radtn ambient : Room Amb (fixed, prompted T)

-- Edge Joins --
None

-- Stack Joins --

Assembly	Interface	Type	Area	Total R	Unit R
alusta	Flat, cond grease		6400.00	0.00	25.46

-- Edge Nodes --
None

```

ALUSTA
-- Basic Geometry --
Assembly type      : Circuit board
Orientation       : XY plane
Origin point      : (0, 0, 0)
Wide x high x thick : 80.00 x 80.00 x 0.51
Volume           : 3251.20
Component side    : Positive direction (front)
Edge area option  : 50% assigned to each side
X node spacing    : 2.11
Y node spacing    : 2.11
In superassembly  : No
-- Material Properties --
Base matl type    : NEMA FR4 Epoxy/Glass Composite
Thermal conductivity : 3.500E-4
Density          : 1.938E-6
Specific heat     : 1570.00
Mass             : 6.30E-3 (1.39E-2 lbm)
Capacitance      : 9.89
Number copper layers : 1
Copper weight    : 1 ounce
Base matl thickness : 0.47
Copper thickness  : 0.04
Copper coverage   : 5.00%
-- Component Side Properties --
Surface type      : Circuit Board, Generic
Emissivity       : 0.90
-- Secondary Side Properties --
Surface type      : Circuit Board, Generic
Emissivity       : 0.90
-- Component Side Dissipation --
Usable face area  : 6400.00
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Usable edge area  : 81.28
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type  : None
-- Secondary Side Dissipation --
Usable face area  : 0.00
Usable edge area  : 81.28
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type  : None
-- Edge Joins --
None
-- Stack Joins --
Assembly Interface Type Area Total R Unit R
sink Flat, cond grease 6400.00 0.00 25.46
-- Edge Nodes --
None
HEAT INPUT INFORMATION
-- Point Source Properties --
None
-- Plate/Board Distributed Wattages --
Assembly Wattage Uniform
alusta 32.00 No
sink 0.00 Yes
-- Wattage Totals --
Point sources : 0.00
Distributed : 32.00
Point + distributed : 32.00
-- Footprint Source Thermal Properties --
None
TEMPERATURE INFORMATION
-- Fixed Node Temperatures --
Label Temp
Room Amb 25.00
-- Point Source Temperatures --
None
-- Plate/Board Node Temperatures --
Min Max Aver
Assembly Temp Temp Temp
alusta 97.11 102.72 97.95
sink 97.11 98.56 97.76

```

-- Float Resistor Parameters --
Maximum float resistor error : 0.00%
Number of iterations : 1

Kuparin lisääminen:

Copper weight : 4 ounce
Copper coverage : 50.00%

Liite 2: Komponenttialustan ja jäähdytyslaitteen välinen liimakerros –simulaatio

SAUNA INFO REPORT

Date and time : 6-Mar-09 08:46
Model file : 32W on FR4 liima1.smf
Calc type : Steady state
Sauna version : V3.90
Air pressure : One atmosphere
Units : Degrees C, mm, watts
Comments : None

ASSEMBLY INFORMATION SINK

-- Basic Geometry --
Assembly type : Plate with fins
Orientation : XY plane
Origin point : (0, 0, -0.51)
Wide x high x thick : 80.00 x 80.00 x 5.00
Volume : 1.600E+5
Component side : Positive direction (front)
Edge area option : 50% assigned to each side
X node spacing : 2.11
Y node spacing : 2.11
In superassembly : No
-- Material Properties --
Material type : Alum Extrusion Alloy, 6063 T5
Thermal conductivity : 2.091E-1
Density : 2.700E-6
Specific heat : 942.00
Mass : 0.43 (0.95 lbm)
Capacitance : 406.94
-- Component Side Properties --
Surface type : Aluminum, Anodized
Emissivity : 0.81
-- Secondary Side Properties --
Surface type : Aluminum, Anodized
Emissivity : 0.81
Fin orientation : Vertical
Fin length : 50.00
Centerline spacing : 5.00
Fin thickness : 2.00
Number of fins : 16.00
End fin type : Both open
Short fin forced conv : Open (smooth transition to plt)
Nodes in fins : No
-- Component Side Dissipation --
Usable face area : 0.00
Usable edge area : 800.00
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type : None
-- Secondary Side Dissipation --
Usable face area : 6400.00
Conv/radiation area : 6400.00 (100.00% of usable)
Usable edge area : 800.00
Conv/radiation area : 800.00 (100.00% of usable)
Conv/radiation type : Isolated plate/board to ambient
Convection mode : Natural convection
Flow length type : Take from assembly/superassy
Flow length : 80.00
h vs. length : Use average h
Conv/radtn ambient : Room Amb (fixed, prompted T)
-- Edge Joins --


```

None
-- Stack Joins --
Assembly Interface Type Area Total R Unit R
liima Zero resistance 6400.00 0.00 0.00
-- Edge Nodes --
None
LIIMA
-- Basic Geometry --
Assembly type : Plate
Orientation : XY plane
Origin point : (0, 0, -0.01)
Wide x high x thick : 80.00 x 80.00 x 0.50
Volume : 3200.00
Component side : Positive direction (front)
Edge area option : 50% assigned to each side
X node spacing : 2.11
Y node spacing : 2.11
In superassembly : No
-- Material Properties --
Material type : Heat Sink Grease, Silicone
Thermal conductivity : 1.970E-4
Density : 0.000E+0
Specific heat : 0.00
Mass : 0.00 (0.00E+0 lbm)
Capacitance : 0.00E+0
-- Component Side Properties --
Surface type : Special
Emissivity : 0.00
-- Secondary Side Properties --
Surface type : Special
Emissivity : 0.00
-- Component Side Dissipation --
Usable face area : 0.00
Usable edge area : 80.00
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type : None
-- Secondary Side Dissipation --
Usable face area : 0.00
Usable edge area : 80.00
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type : None
-- Edge Joins --
None
-- Stack Joins --
Assembly Interface Type Area Total R Unit R
alusta Zero resistance 6400.00 0.00 0.00
sink Zero resistance 6400.00 0.00 0.00
-- Edge Nodes --
None
ALUSTA
-- Basic Geometry --
Assembly type : Circuit board
Orientation : XY plane
Origin point : (0, 0, 0.50)
Wide x high x thick : 80.00 x 80.00 x 0.51
Volume : 3251.20
Component side : Positive direction (front)
Edge area option : 50% assigned to each side
X node spacing : 2.11
Y node spacing : 2.11
In superassembly : No
-- Material Properties --
Base matl type : NEMA FR4 Epoxy/Glass Composite
Thermal conductivity : 3.500E-4
Density : 1.938E-6
Specific heat : 1570.00
Mass : 6.30E-3 (1.39E-2 lbm)
Capacitance : 9.89
Number copper layers : 1
Copper weight : 1 ounce
Base matl thickness : 0.47
Copper thickness : 0.04

```

Copper coverage : 5.00%
 -- Component Side Properties --
 Surface type : Circuit Board, Generic
 Emissivity : 0.90
 -- Secondary Side Properties --
 Surface type : Circuit Board, Generic
 Emissivity : 0.90
 -- Component Side Dissipation --
 Usable face area : 6400.00
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Usable edge area : 81.28
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Secondary Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 81.28
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Edge Joins --
 None
 -- Stack Joins --

Assembly	Interface	Type	Area	Total R	Unit R
liima	Zero resistance		6400.00	0.00	0.00

 -- Edge Nodes --
 None

HEAT INPUT INFORMATION

-- Point Source Properties --
 None
 -- Plate/Board Distributed Wattages --

Assembly	Wattage	Uniform
alusta	32.00	No
liima	0.00	Yes
sink	0.00	Yes

 -- Wattage Totals --
 Point sources : 0.00
 Distributed : 32.00
 Point + distributed : 32.00
 -- Footprint Source Thermal Properties --
 None

TEMPERATURE INFORMATION

-- Fixed Node Temperatures --

Label	Temp
Room Amb	25.00

Liite 3: Komponentin ja jäähdytyslaitteen välisen lämpöresistanssin arviointi, Philips LUXEON Rebel LXML-PWC1-0100

SAUNA INFO REPORT

 Date and time : 6-Mar-09 09:08
 Model file : valaisin - Rebel pinta-ala -alkio Rah sim3.smf
 Calc type : Steady state
 Sauna version : V3.90
 Air pressure : One atmosphere
 Units : Degrees C, mm, watts
 Comments : None

ASSEMBLY INFORMATION

PROFIILI

-- Basic Geometry --
 Assembly type : Plate with fins
 Orientation : XY plane
 Origin point : (0, 0, -2.66)
 Wide x high x thick : 17.50 x 17.50 x 5.00
 Volume : 1657.25
 Component side : Positive direction (front)
 Edge area option : 50% assigned to each side
 X node spacing : 0.53
 Y node spacing : 0.53
 In superassembly : No
 -- Material Properties --
 Material type : Alum Extrusion Alloy, 6063 T5

Thermal conductivity : 2.091E-1
 Density : 2.700E-6
 Specific heat : 942.00
 Mass : 4.47E-3 (9.86E-3 lbm)
 Capacitance : 4.22
 -- Component Side Properties --
 Surface type : Aluminum, Anodized
 Emissivity : 0.81
 -- Secondary Side Properties --
 Surface type : Aluminum, Anodized
 Emissivity : 0.81
 Fin orientation : Vertical
 Fin length : 20.00
 Centerline spacing : 1.00
 Fin thickness : 0.02
 Number of fins : 18.00
 End fin type : Both open
 Short fin forced conv : Open (smooth transition to plt)
 Nodes in fins : No
 -- Component Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 175.00
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Secondary Side Dissipation --
 Usable face area : 306.25
 Conv/radiation area : 306.25 (100.00% of usable)
 Usable edge area : 175.00
 Conv/radiation area : 175.00 (100.00% of usable)
 Conv/radiation type : Isolated plate/board to ambient
 Convection mode : Natural convection
 Flow length type : Take from assembly/superassy
 Flow length : 17.50
 h vs. length : Use average h
 Conv/radtn ambient : Room Amb (fixed, prompted T)
 -- Edge Joins --
 None
 -- Stack Joins --

Assembly	Interface Type	Area	Total R	Unit R
liima	Flat, dry	306.25	0.32	96.77

 -- Edge Nodes --
 None
 LIIMA
 -- Basic Geometry --
 Assembly type : Plate
 Orientation : XY plane
 Origin point : (0, 0, -2.46)
 Wide x high x thick : 17.50 x 17.50 x 0.20
 Volume : 61.25
 Component side : Positive direction (front)
 Edge area option : 50% assigned to each side
 X node spacing : 0.53
 Y node spacing : 0.53
 In superassembly : No
 -- Material Properties --
 Material type : Special
 Thermal conductivity : 1.460E-3
 Density : 1.000E-12
 Specific heat : 1.00
 Mass : 6.12E-11 (1.35E-10 lbm)
 Capacitance : 6.12E-11
 -- Component Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Secondary Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Component Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 7.00
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None

```

-- Secondary Side Dissipation --
Usable face area   : 0.00
Usable edge area   : 7.00
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type   : None
-- Edge Joins --
None
-- Stack Joins --
Assembly Interface Type Area Total R Unit R
al-oksidi Flat, dry      306.25 0.32 96.77
profilli Flat, dry      306.25 0.32 96.77
-- Edge Nodes --
None
AL-OXSIDI
-- Basic Geometry --
Assembly type      : Plate
Orientation        : XY plane
Origin point       : (0, 0, -0.96)
Wide x high x thick : 17.50 x 17.50 x 1.50
Volume            : 459.38
Component side     : Positive direction (front)
Edge area option   : 50% assigned to each side
X node spacing     : 0.53
Y node spacing     : 0.53
In superassembly   : No
-- Material Properties --
Material type      : Alumina, 96% Pure, T=100C
Thermal conductivity : 1.880E-2
Density           : 3.710E-6
Specific heat      : 880.00
Mass              : 1.70E-3 (3.76E-3 lbm)
Capacitance       : 1.50
-- Component Side Properties --
Surface type       : Special
Emissivity         : 0.00
-- Secondary Side Properties --
Surface type       : Special
Emissivity         : 0.00
-- Component Side Dissipation --
Usable face area   : 0.00
Usable edge area   : 52.50
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type   : None
-- Secondary Side Dissipation --
Usable face area   : 0.00
Usable edge area   : 52.50
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type   : None
-- Edge Joins --
None
-- Stack Joins --
Assembly Interface Type Area Total R Unit R
mcpcb-eris Zero resistance 306.25 0.00 0.00
liima Flat, dry      306.25 0.32 96.77
-- Edge Nodes --
None
MPCPB-ERISTE
-- Basic Geometry --
Assembly type      : Plate
Orientation        : XY plane
Origin point       : (0, 0, -0.76)
Wide x high x thick : 17.50 x 17.50 x 0.20
Volume            : 61.25
Component side     : Positive direction (front)
Edge area option   : 50% assigned to each side
X node spacing     : 0.53
Y node spacing     : 0.53
In superassembly   : No
-- Material Properties --
Material type      : Special
Thermal conductivity : 3.000E-3
Density           : 1.480E-6

```

Specific heat : 1530.00
 Mass : 9.07E-5 (2.00E-4 lbm)
 Capacitance : 0.14
 -- Component Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Secondary Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Component Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 7.00
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Secondary Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 7.00
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Edge Joins --
 None
 -- Stack Joins --

Assembly	Interface Type	Area	Total R	Unit R
kupari	Zero resistance	306.25	0.00	0.00
al-oksidi	Zero resistance	306.25	0.00	0.00

 -- Edge Nodes --
 None
 KUPARI
 -- Basic Geometry --
 Assembly type : Plate
 Orientation : XY plane
 Origin point : (0, 0, -0.66)
 Wide x high x thick : 17.50 x 17.50 x 0.10
 Volume : 30.63
 Component side : Positive direction (front)
 Edge area option : 50% assigned to each side
 X node spacing : 0.53
 Y node spacing : 0.53
 In superassembly : No
 -- Material Properties --
 Material type : Copper, Pure
 Thermal conductivity : 3.860E-1
 Density : 8.954E-6
 Specific heat : 383.09
 Mass : 2.74E-4 (6.05E-4 lbm)
 Capacitance : 0.11
 -- Component Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Secondary Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Component Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 3.50
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Secondary Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 3.50
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Edge Joins --
 None
 -- Stack Joins --

Assembly	Interface Type	Area	Total R	Unit R
juote	Std Solder,0.1 mm	306.25	0.01	2.04
mcpcb-eris	Zero resistance	306.25	0.00	0.00

 -- Edge Nodes --
 None
 JUOTE
 -- Basic Geometry --

Assembly type : Plate
 Orientation : XY plane
 Origin point : (0, 0, -0.52)
 Wide x high x thick : 17.50 x 17.50 x 0.14
 Volume : 42.87
 Component side : Positive direction (front)
 Edge area option : 50% assigned to each side
 X node spacing : 0.53
 Y node spacing : 0.53
 In superassembly : No
 -- Material Properties --
 Material type : Special
 Thermal conductivity : 5.700E-2
 Density : 8.000E-6
 Specific heat : 300.00
 Mass : 3.43E-4 (7.56E-4 lbm)
 Capacitance : 0.10
 -- Component Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Secondary Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Component Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 4.90
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Secondary Side Dissipation --
 Usable face area : 0.00
 Usable edge area : 4.90
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Edge Joins --
 None
 -- Stack Joins --

Assembly	Interface	Type	Area	Total R	Unit R
komponentt	Std Solder,0.1 mm		306.25	0.01	2.04
kupari	Std Solder,0.1 mm		306.25	0.01	2.04

 -- Edge Nodes --
 None

KOMPONENTTI

-- Basic Geometry --
 Assembly type : Plate
 Orientation : XY plane
 Origin point : (0, 0, 0)
 Wide x high x thick : 17.50 x 17.50 x 0.52
 Volume : 159.25
 Component side : Positive direction (front)
 Edge area option : 50% assigned to each side
 X node spacing : 0.53
 Y node spacing : 0.53
 In superassembly : No
 -- Material Properties --
 Material type : Special
 Thermal conductivity : 1.110E-2
 Density : 3.000E-6
 Specific heat : 500.00
 Mass : 4.78E-4 (1.05E-3 lbm)
 Capacitance : 0.24
 -- Component Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Secondary Side Properties --
 Surface type : Special
 Emissivity : 0.00
 -- Component Side Dissipation --
 Usable face area : 306.25
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Usable edge area : 18.20
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None

```

-- Secondary Side Dissipation --
Usable face area   : 0.00
Usable edge area  : 18.20
Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
Dissipation type  : None
-- Edge Joins --
None
-- Stack Joins --
Assembly Interface Type Area Total R Unit R
juote Std Solder,0.1 mm 306.25 0.01 2.04
-- Edge Nodes --
None

```

HEAT INPUT INFORMATION

```

-- Point Source Properties --
None
-- Plate/Board Distributed Wattages --
Assembly Wattage Uniform
al-oksidi 0.00 Yes
juote 0.00 Yes
komponentti 2.38 No
kupari 0.00 Yes
liima 0.00 Yes
mcpcb-eriste 0.00 Yes
profiili 0.00 Yes
-- Wattage Totals --
Point sources : 0.00
Distributed : 2.38
Point + distributed : 2.38
-- Footprint Source Thermal Properties --
None

```

TEMPERATURE INFORMATION

```

-- Fixed Node Temperatures --
Label Temp
Room Amb 20.00
-- Point Source Temperatures --
None
-- Plate/Board Node Temperatures --
Min Max Aver
Assembly Temp Temp Temp
al-oksidi 121.15 125.86 122.13
juote 121.54 135.44 122.99
komponentti 121.55 153.27 123.19
kupari 121.54 133.60 122.96
liima 120.07 122.26 120.54
mcpcb-eriste 121.42 131.05 122.70
profiili 119.13 119.20 119.16
-- Float Resistor Parameters --
Maximum float resistor error : 0.01%
Number of iterations : 1

```

Liite 4: Kevytliikennevalaisimen jäähdytykseen tarkoitettujen tavoitekokoisen jäähdytysprofiilin konvektio- ja lämpösäteilyresistanssien arviointi

SAUNA INFO REPORT

```

-----
Date and time : 6-Mar-09 09:02
Model file : valaisin - tavoiteprofiili - ei koteloa - säteilyllä.smf
Calc type : Steady state
Sauna version : V3.90
Air pressure : One atmosphere
Units : Degrees C, mm, watts
Comments : None

```

ASSEMBLY INFORMATION

PROFIILI

```

-- Basic Geometry --
Assembly type : Plate with fins
Orientation : XZ plane
Origin point : (0, 0, 0)
Wide x deep x thick : 200.00 x 80.00 x 5.00
Volume : 1.920E+5
Component side : Positive direction (top)

```

Edge area option : 50% assigned to each side
 X node spacing : 2.94
 Z node spacing : 2.86
 In superassembly : No
 -- Material Properties --
 Material type : Alum Extrusion Alloy, 6063 T5
 Thermal conductivity : 2.091E-1
 Density : 2.700E-6
 Specific heat : 942.00
 Mass : 0.52 (1.14 lbm)
 Capacitance : 488.33
 -- Component Side Properties --
 Surface type : Aluminum, Anodized
 Emissivity : 0.81
 Fin orientation : Front/back
 Fin length : 35.00
 Centerline spacing : 10.00
 Fin thickness : 2.00
 Number of fins : 20.00
 End fin type : Both open
 Short fin forced conv : Open (smooth transition to plt)
 Nodes in fins : No
 -- Secondary Side Properties --
 Surface type : Aluminum, Anodized
 Emissivity : 0.81
 -- Component Side Dissipation --
 Usable face area : 1.600E+4
 Conv/radiation area : 1.600E+4 (100.00% of usable)
 Usable edge area : 1400.00
 Conv/radiation area : 1400.00 (100.00% of usable)
 Conv/radiation type : Isolated plate/board to ambient
 Convection mode : Natural convection
 Flow length type : Take from assembly/superassy
 Flow length : 80.00
 h vs. length : Use average h
 Conv/radtn ambient : Room Amb (fixed, prompted T)
 -- Secondary Side Dissipation --
 Usable face area : 1.600E+4
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Usable edge area : 1400.00
 Conv/radiation area : 0.00 (0.00% of usable)
 Dissipation type : None
 -- Edge Joins --
 None
 -- Stack Joins --
 None
 -- Edge Nodes --
 None
 HEAT INPUT INFORMATION
 -- Point Source Properties --
 None
 -- Plate/Board Distributed Wattages --
 Assembly Wattage Uniform
 profilli 76.00 Yes
 -- Wattage Totals --
 Point sources : 0.00
 Distributed : 76.00
 Point + distributed : 76.00
 -- Footprint Source Thermal Properties --
 None
 TEMPERATURE INFORMATION
 -- Fixed Node Temperatures --
 Label Temp
 Room Amb 55.00
 -- Point Source Temperatures --
 None
 -- Plate/Board Node Temperatures --
 Min Max Aver
 Assembly Temp Temp Temp
 profilli 121.64 121.64 121.64
 -- Float Resistor Parameters --
 Maximum float resistor error : 0.01%

Number of iterations : 1

Liite 5: Tavoitekokoisen kevytliikennevalaisimen kokonaislämpöresistanssin

laskeminen

Qkomponentti = 2,38
komponenttimaara = 32
Tymparisto = 55
Tkomponenttimaksimi = 135
a = 0,2
b = 0,08
h = 0,04
d = 0,002
lambda = 100
eh = 0,8
eps = 0,9
epu = 0,9
theeta = 0,000000569
Tah = 34
Tk1s1 = 122 - Tymparisto
Tk1 = 141 - Tymparisto
Q = Qkomponentti * komponenttimaara
Raymaksimi = (Tkomponenttimaksimi - Tymparisto) / Q
Rahkomponentti = Tah / Qkomponentti
Rah = Rahkomponentti / komponenttimaara
Rhymaksimi = Raymaksimi - Rah
Rk1s1 = Tk1s1 / Q
Rk1 = Tk1 / Q
Rs1 = (Rk1 * Rk1s1) / (Rk1 - Rk1s1)
Rhyik = Rk1s1
Rayik = Rah + Rk1s1
Ak2 = (2 * a * h) + (a * b) + (2 * b * h)
Aj = (2 * a * h) + (a * b) + (2 * b * h)
Lk2 = (a + b) / 2
Qk1 = Tk1s1 / Rk1
alfak2 = 0,7 * (Tk2 / Lk2)^{0,25}
Qk1 = alfak2 * Tk2 * Ak2
Rk2 = 1 / (alfak2 * Ak2)
F = 1 / ((1 / eh) + (1 / eps) - 1)
Rs2 = Rs1 / F
Rj = d / (lambda * Aj)
Ak3 = (2 * a * h) + (a * b) + (2 * b * h)
Lk3 = (h * (a + b)) / ((2 * h) + a + b)
alfak3 = 1,4 * (Tk3 / Lk3)^{0,25}
Q = alfak3 * Tk3 * Ak3
Rk3 = 1 / (alfak3 * Ak3)
Tpabs = Tk3 + Tymparisto + 273
Rs3 = 1 / (4 * epu * theeta * (Tpabs³) * Ak3)
Rhykotelo = ((Rs2 * (Rk1 + Rk2)) / (Rs2 + Rk1 + Rk2)) + Rj + ((Rs3 * Rk3) / (Rs3 + Rk3))
Raykotelo = Rah + Rhykotelo

Aj=0,0384
Ak2=0,0384
Ak3=0,0384
alfak2=4,838
alfak3=11,96
F=0,7347
Lk2=0,14
Lk3=0,03111
Q=76,16
Qk1=59,33
Rah=0,4464
Rahkomponentti=14,29
Rayik=1,326
Raykotelo=4,116
Raymaksimi=1,05
Rhyik=0,8797
Rhykotelo=3,67
Rhymaksimi=0,604
Rj=0,0005208
Rk1=1,129

Rk1s1=0,8797
Rk2=5,383
Rk3=2,177
Rs1=3,982
Rs2=5,42
Rs3=1,056
Tk1=86
Tk1s1=67
Tk2=319,4
Tk3=165,8
Tpabs=493,8

Liite 6: Kiehumispinnan lämpötilan arviointi

qy = 6000
myyn = 0,0004
hke = 1125000
g = 9,81
rhoon = 764
rhoon = 0,77
theetank = 0,02
cn = 2798
tsat = 64,5
bpn = 0,003
prn = 5
m = 1,7
qy = myyn * hke * (((g * (rhoon - rhoon)) / theetank)^0,5) * ((cn * (ts - tsat)) / (bpn * hke * (Prn^m)))
ts=64,91
(Cengel 2003; The Engineering Toolbox 2009)