

Elektronisen laitteen lämpösuunnittelu

Johdanto

Kaikki elektroniset laitteet tuottavat toimiessaan normaalisti lämpöä

Virran kulkiessa passiivisen komponentin tai puolijohdekomponentin läpi osa tehosta häviää lämpöenergiana.

Liika lämpö voi aiheuttaa

- laitteen tai komponentin vaurioitumisen, jos laitteen lämpötila tai puolijohdekomponentin liitoslämpötila ylittää valmistajan suositteleman suurimman turvallisen lämpötilan
- puolijohteessa kasvattaa vapaiden elektronien liikkumista ja täten lisää signaalin kohinaa
- komponenttien suorituskyky, elinaika ja luotettavuus voi huonontua merkittävästi.

Elektroniikkasuunnittelijan on huolehdittava siitä, että elektronisten komponenttien lämpötila pysyy kaikissa tuotteelle spesifioituissa olosuhteissa alle valmistajan suositteleman maksimilämpötilan.

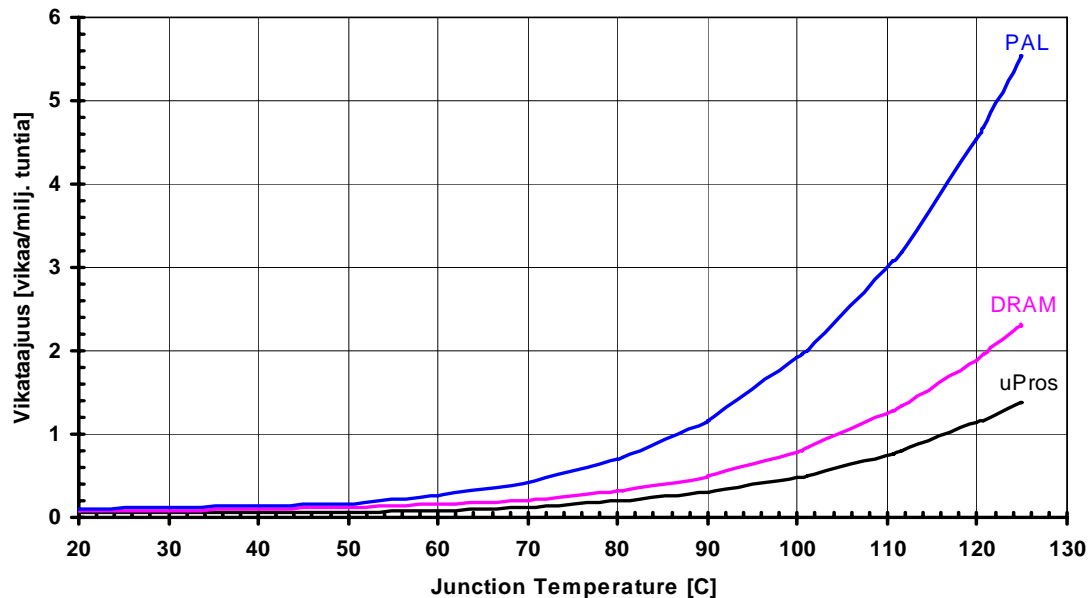
Lämmönsiirtymistä tapahtuu, kun kaksi pintaa on eri lämpötilassa. Lämpö siirtyy kuumemmasta kylmempään. Mitä suurempi lämpötilaero, sitä suurempi määrä lämpöä siirtyy:

$$\text{Lämpö määrä} \propto \text{lämpötilaero}$$

Lämmön siirtyminen pois laitteesta tai komponentista voi tapahtua kolmella eri tavalla:

- konvektio (convection)
- johtuminen (conduction) tai
- säteily (radiation).

Esimerkki erään prosessori- DRAM- ja PAL-piirin luotettavuudesta liitoslämpötilan (= ic-chip) funktiona:



Terminologiaa

Lämpökuorma Q, Heat Load

- kuinka paljon komponentti/laitte tuottaa lämpöä
- yksikkönä [W].

Ympäristön lämpötila T_{amb} , Ambient Temperature

- ilman lämpötila välittömästi jäähdytettävän laitteen ympärillä.

Maksimi liitoslämpötila T_{jmax} , Maximum Junction Temperature

- maksimi lämpötila, joka komponentilla on pn-rajapinnassa.

Lämpöresistanssi R_{θ} , R_{th} , tai θ Thermal Resistance

- resistanssi, jonka lämpö kohtaa kun se etenee kuumemmasta kylmempään

$$R_{th} = \frac{T_2 - T_1}{Q} = \frac{\Delta T}{Q} \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (1)$$

- mitä pienempi luku sen paremmin lämpö siirtyy
- vertaa Ohmin laki

Konvektio

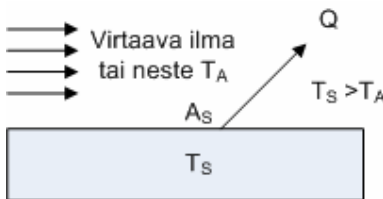
Konvektiolla tarkoitetaan lämpövirtausta liikkuvassa nesteessä tai kaasussa ja erityisesti nesteestä kiinteään pintaan tai päinvastoin.

Vaikka lämmönsiirto yksittäisten partikkelien välillä tapahtuu johtumalla, hallitsee aineen mukana siirtyvä energia lämmönsiirtoa.

Konvektion kuvaamiseksi matemaattisesti täytyy siis yhdistää aineensiirtoa ja lämmönjohtumista kuvaavat peruslait.

Konvektiota sanotaan pakotetuksi, jos nesteen tai kaasun virtaus aiheutuu ulkoisista syistä ja vapaaksi, jos virtaus tapahtuu itsestään, ts. virtaus aiheutuu tiheyseroista voimakentässä (painovoima tai keskipakovoimakenttä).

- veden kiehuminen kattilassa on esimerkki vapaasta konvektiosta ja
- metallitangon jäähdyttäminen virtaavassa vedessä on esimerkki pakotetusta konvektiosta



Konvektiossa siirtyvän lämpötehon määrää voidaan arvioida yhtälöllä

$$Q = h_c \cdot A_s (T_s - T_A) \quad (2)$$

missä

- Q = pinnasta virtaava lämpövuoto [W]
- A_s = pinta-ala, mistä lämmön virtaus tapahtuu [m^2]
- T_s = pinnan lämpötila [$^{\circ}\text{C}$] tai [K]
- T_A = jäähdyttävän väliaineen lämpötila [$^{\circ}\text{C}$] tai [K]
- h_c = konvektiokerroin (heat transfer coefficient) [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$]

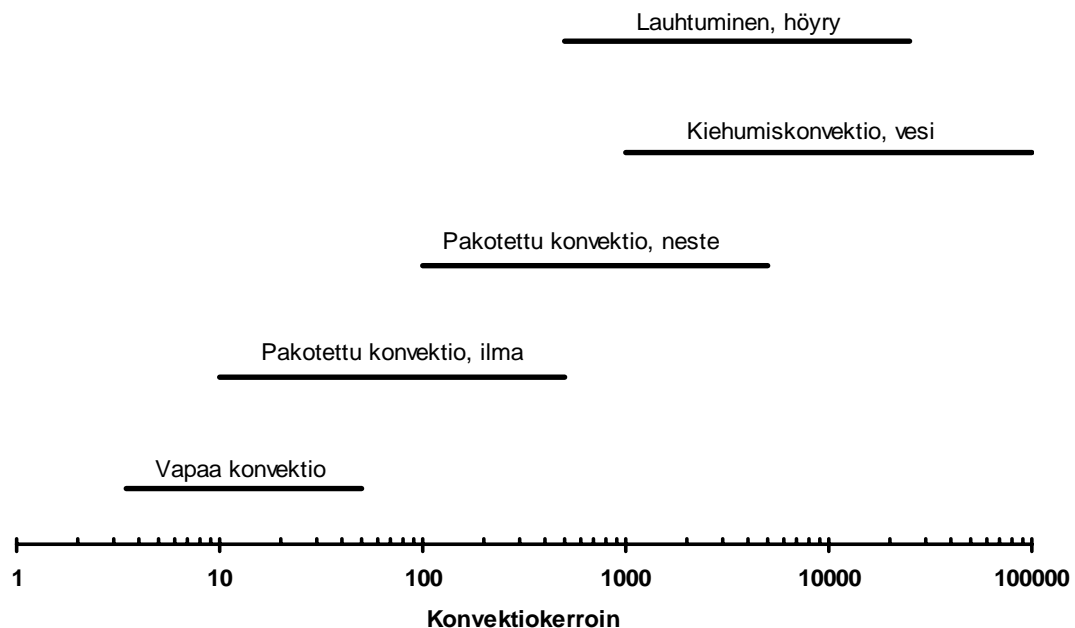
Yhtälö esitetään usein muodossa:

$$\Delta T = (T_s - T_a) = \frac{1}{h_c \cdot A_s} \cdot Q \quad (3)$$

Konvektiolla tapahtuvan lämmönvaihdon lämpöresistanssiksi R_{th} saadaan

$$R_{th} = \frac{1}{h_c \cdot A_s} \quad (4)$$

Konvektiokertoimen h_c arvoja eri tapauksissa:



Konvektiivisen lämmönsiirron tarkka matemaattinen käsittely muodostuu lähes aina hyvin monimutkaiseksi.

Usein vastaan tulevat ongelmat ovat myös niin monimutkaisia, että niiden teoreettinen käsittely on hankalaa ja on tyydyttävä käytännön kokeiden perusteella johdettuihin korrelaatioyhtälöihin.

Konvektiota kuvaaville yhtälöille on useita eri vaihtoehtoja ja on huomattava, että epätarkkuus aineominaisuuksien määrittämisessä, koevirheet, pinnan karheuden vaihtelut, geometriset poikkeamat jne. saattavat aiheuttaa huomattavia

poikkeamia korrelaatioyhtälöiden ja käytännön välillä. Virhe voi olla yhtälöiden pätevyysrajojen rajoilla tai muuten epäedullisessa tapauksessa huomattava.

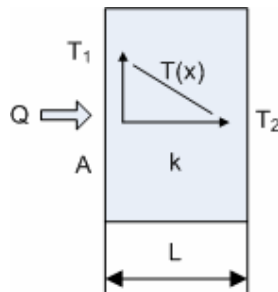
Lämmön johtuminen

Johtuminen on lämmönsiirtymistä korkeamman energian (lämpötila) matalamman suhteellisen energian alueelle

Johtumisessa energia siirtyy vierekkäisten molekyylien välillä ja osittain myös vapaiden elektronien ja hilavärähtelyjen avulla.

Lämmönjohtumisessa ei tapahdu molekyylien siirtymistä.

Usein monissa sovellutuksissa lämpö siirtyy johtumisella laitteesta tai komponentista ja virtaus sitten jäähdyttää lämmönjohtavaa pintaa kuten esim. jäähdytyslevyä.



Yksidimensionaalisissa systeemeissä lämmönjohtavuutta voidaan kuvata yhtälöllä

$$Q = \frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_1 - T_2) \quad (5)$$

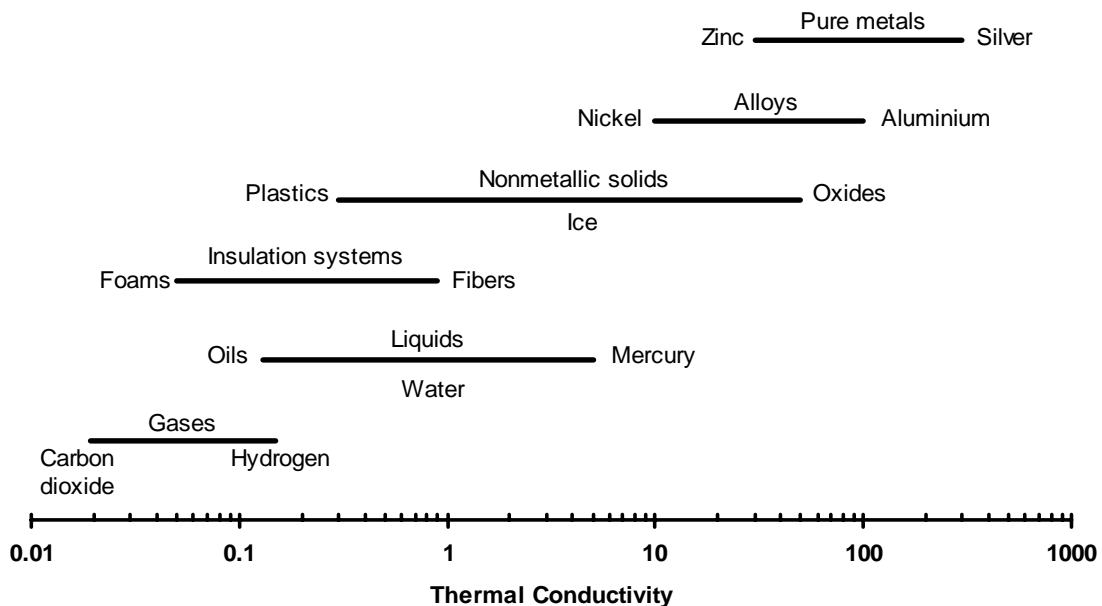
missä

- Q = johtumalla siirtyvä lämpöteho [W]
- k = materiaalin lämmönjohtokyky (thermal conductivity) $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
- A = lämpöä johtavan kappaleen pinta-ala [m^2]
- $\Delta T = T_1 - T_2$ = lämpötilaero [$^{\circ}C$] tai [K]
- L = lämpöä siirtävän kappaleen paksuus [m]

Koska kappaleen lämmönsiirtokyky on suoraan verrannollinen kappaleen lämmönjohtavuuteen, lämpötilaeroon ja poikkipinta-alaan, lämpötilannousu saadaan laskettua kaavasta

$$\Delta T = \frac{L}{k \cdot A} \cdot Q = R_{th} \cdot Q \quad (6)$$

Oheisessa kuvassa on esitetty eri aineiden tyypillisiä lämmönjohtavuuskertoimia:



Lämpösäteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota jokainen kappale lähettää pelkästään lämpötilansa perusteella. Lämpösäteilyksi kutsutaan sitä osaa sähkömagneettisesta säteilystä, jonka aallonpituus on alueella 0.3 – 50 μm . Toisin kuin lämmönsiirto johtumisen ja konvektion avulla tapauksessa ei lämpösäteilyssä vaadi erillistä väliainetta.

Säteily on ainoa tapa, millä lämmön siirtymistä tapahtuu tyhjiöstä ja säteilyn määrä riippuu säteilevän kohteen lämpötilasta.

Vaikka säteilyn kaikkia fysikaalisia mekanismeja ei vielä tunneta, se näyttäisi olevan seurausta sähkömagneettisen säteilyn ja fotonien etenemisestä.

Mustan kappaleen säteily

Jokainen kappale, joka on absoluuttista nollapistettä korkeammassa lämpötilassa, lähettää lämpösäteilyä ympäristöönsä laajalla kaistalla aallonpituuksia.

Reaalisen kappaleen pinnasta lähtevän säteilyenergian määrä tietyllä aallonpituudella riippuu kappaleen materiaaliominaisuuksista, pinnan ominaisuuksista sekä pinnan lämpötilasta. Tästä johtuen samassa lämpötilassa olevat ulkoisilta dimensioiltaan identtiset kappaleet saattavat emittoida hyvinkin erisuuret määrät säteilyä pinta-alayksikköä kohti.

Siten onkin kiinnostavaa tietää mikä on tietyssä lämpötilassa olevan kappaleen lähettämän säteilyn maksimiarvo. Ideaalinen säteilijä musta kappale toimii vertailukohtana reaalisiin säteilypintoihin. Musta kappale (black body) on määritelty siten, että se on säteilyn kannalta täydellinen säteilijä ja absorboija. Musta kappale absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn, riippumatta säteilyn aallonpituudesta tai tulosuunnasta. Sen lisäksi musta kappale säteilee lämpöä tasaisesti joka suuntaan eli se on diffuusi (suunnasta riippumaton) säteilijä. Termisessä tasapainotilanteessa musta kappale asettuu tiettyyn vakio­lämpötilaan T , jossa absorboitu ja emittoitu säteilyteho ovat samat. Mustan kappaleen säteily noudattaa Planckin lakia:

$$L_b(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot m} \right] \quad (7)$$

- missä h on Planckin vakio $6.6261 \cdot 10^{-34}$ Js
- c on valon nopeus tyhjiössä $2.9979 \cdot 10^8$ ms⁻¹
- k on Boltzmannin vakio $1.3807 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹
- λ on valon aallonpituus [m]
- T on mustan kappaleen absoluuttinen lämpötila [K]

$L_b(\lambda, T)$ kertoo siis sen, kuinka paljon lämpötilassa T oleva musta kappale säteilee aallonpituudella λ tehoa pinta-alayksikköä kohti tiettyyn avaruuskulmaan ja tietyllä aallonpituudella.

Mustan kappaleen lähettämä säteilyteho pinta-alayksikköä kohden kaikilla aallonpituuksilla koko puoliavaruuteen on kokeellisesti määritetty ja saadaan integroimalla yhtälö (7) kaikkien aallonpituuksien ja koko puoliavaruuden yli

$$E_b(T) = \sigma \cdot T_s^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (8)$$

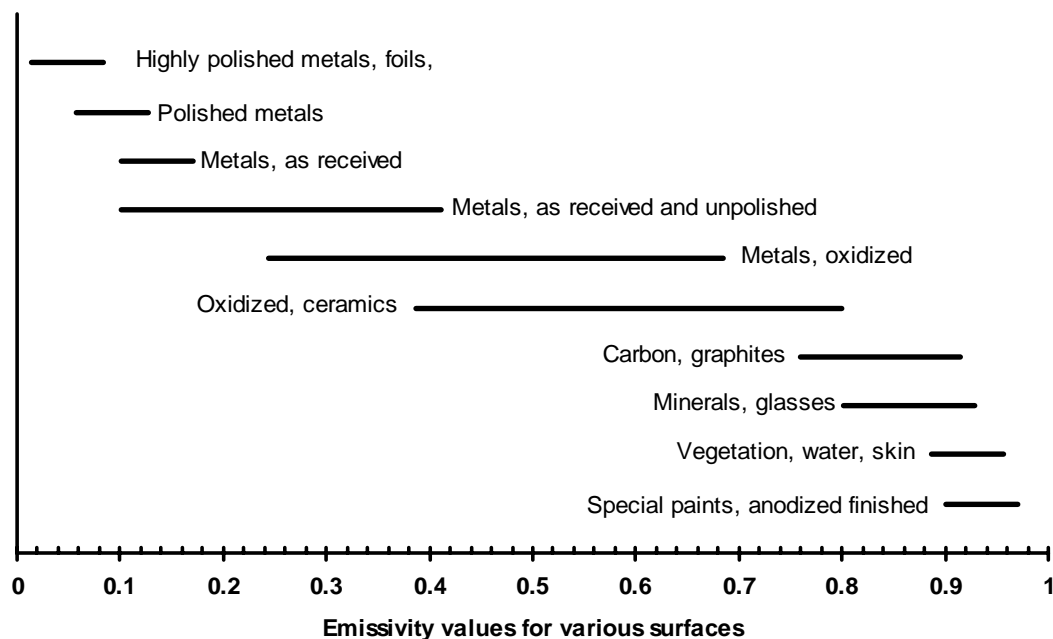
- missä $\sigma = 5.66961 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ on Stefan-BolzmANNin vakio ja T_s on pinnan lämpötila [K].

Yhtälö (8) on paremmin tunnettu Stefan-BolzmANNin lakina ja E_b :tä kutsutaan mustan kappaleen säteilemisvoimakkuudeksi.

Reaalinen kappale lämpötilassa T ei emittoi yhtä paljon säteilyä, kuin musta kappale, koska se ei absorboi kaikkea tulevaa säteilyä vaan heijastaa osan sellaisenaan. Reaalisen kappaleen säteilemä teho $E(T)$ pinta-alayksikköä kohti pienenee kertoimella ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), jota kutsutaan kappaleen emissiokertoimeksi. Yleensä emissiokerroin on aallonpituuden funktio, eli $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$. Jos emissiokerroin ε ei riipu aallonpituudesta, puhutaan harmaasta kappaleesta (gray body). Mustan kappaleen emissiokerroin = 1 kaikilla aallonpituuksilla. Emissiokerroin määritellään siis

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (9)$$

Eräiden materiaalipintojen emissiokertoimia:



Säteily luonnollisesta kappaleesta

Säteilemällä siirtyvä lämpö kahden kappaleen välillä, jotka ovat lämpötilassa T_1 ja T_2 , saadaan kaavasta

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{1,2} \cdot A_s (T_1^4 - T_2^4) \quad (10)$$

missä

- Q = säteilemällä siirtyvä lämpöteho [W]
- ε = säteilevän pinnan emissiokerroin (hyvin heijastava pinta $\varepsilon = 0$, hyvin absorboiva pinta $\varepsilon = 1$).
- $F_{1,2}$ = kappaleiden 1 ja 2 välinen muotokerroin tai näkyvyyskerroin (≤ 1)
- A_s = säteilevän pinnan pinta-ala [m^2]
- T_1, T_2 = kappaleiden 1 ja 2 lämpötila.

Säteilyä ei yleensä pidetä merkittävänä lämmönsiirtomekanismina, paitsi jos

- säteilevän kappaleen lämpötila on erittäin korkea
 - esim. lämpötilassa $+50^\circ\text{C}$ oleva musta kappale (siis $\varepsilon = 1$) säteilee $+20^\circ\text{C}$ ympäristöön noin 200 W/m^2 :n teholla, eli kännykän (N70) kokoinen kappale maksimissaan noin 4 W :n teholla
- kappaleiden lämpötilaero on erittäin suuri, kuten esimerkiksi auringon ja avaruusaluksen välillä.

Jotta säteilyä voidaan verrata muihin lämmönsiirtomekanismeihin, yhtälöstä (10) saadaan:

$$\begin{aligned} Q &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{1,2} \cdot A (T_1^2 - T_2^2) (T_1^2 + T_2^2) = \\ &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{1,2} \cdot A (T_1^2 - T_2^2) (T_1 + T_2) (T_1 - T_2) = \quad (11) \\ &= h_r \cdot A \cdot (T_1 - T_2) = h_r \cdot A \cdot \Delta T \end{aligned}$$

eli

$$\Delta T = \frac{1}{h_r \cdot A} \cdot Q = R_{th} \cdot Q \quad (12)$$

- missä $h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{1,2} (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2)$ on kappaleen säteilyn lämmönsiirtokerroin $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$.

Elektroniikkalaitteen jäähdytystarpeen määrittäminen

Ensimmäinen askel laitteen jäähdytyksen suunnittelulle on systeemissä syntyvän häviötehon eli jäähdytyskuorman laskenta. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan systeemiin tuotava energia on tasapainotilassa yhtä suuri kuin systeemistä poistuva energia.

Olettamalla, että systeemistä lähtevä teho on kokonaisuudessaan sen resistansseissa syntyvää lämpöä. Laitteen häviöteho eli jäähdytyskuorma on yhtä suuri kuin laitteen tehonkulutus. Tämä pätee usein miten yksittäisen komponentin tapauksessa, mutta on toki muistettava, että suurin osa sähkölaitteista on sellaisia, joissa suurin osa niistä lähtevästä tehosta on sähköenergiaa (mm. taajuusmuuttaja, tutka).

Siten laitteen lämpökuorma on eksaktimmin määritelty laitteen otto- ja lähtötehon erotuksena. Vastaavasti lämpökuormanlaskenta voidaan tehdä myös askel askeleelta eli määrittämällä jokaisen systeeminmuodostavan komponentin häviöteho ja summaamalla ne lopuksi yhteen.

Kun lämpökuorma on saatu määritettyä lisätään siihen vielä tietty varmuusmarginaali. Täten laitteeseen voidaan tulevaisuudessa lisätä komponentteja tai piirikortteja ilman, että jäähdytystehoa on erikseen suurennettava.

Varmuusmarginaalin asetuksessa on kuitenkin oltava varovainen, sillä rankasti ylimitoitettu jäähdytys kasvattaa laitteen kokoa sekä lisää laitteen kokonaiskustannuksia.

- ei ole mitään järkeä mitoittaa laitteeseen järeätä ja äänekästä puhallinta ainoastaan varmuuden vuoksi, jos pienempikin puhallin on laskennallisesti riittävä
- vastaavasti on arveluttavaa mitoittaa laitteeseen huoltoa vaativaa ja vaurioherkkää nestejäähdytystä mikäli ilmajäähdytykselläkin pärjätään.

On aina pidettävä mielessä, että kaikkein ihanteellisin jäähdytysratkaisu on vapaaseen konvektioon perustuva ilmajäähdytys, koska siinä ei ole liikkuvia osia, se on äänetön, varmatoiminen ja mikä parasta, se on ilmainen!

Jäähdytyksen suunnittelussa on myös otettava tarkasti huomioon jäähdytettävän laitteen käyttöympäristö. Varsinkin ulkotiloissa käytettävien laitteiden tapauksessa on jäähdytysmenetelmän valinnassa oltava tarkkana. Huomioon otettavia seikkoja ovat mm.

- käyttöympäristön lämpötila
- sen likaisuus/pölyisyys

- tarvitaanko suljettua vesijäähdytystä vai
- riittääkö avoin vesikierto jne.

Laitteen toimintajakso eli se osa kokonaisajasta, jolloin laite on päällä, on otettava huomioon jäähdytyksen suunnittelussa. Mikäli laitteen toimintajakso on alhainen, on laitteessa lämmöksi muuttuva häviöteho pienempi kuin laitteen nimellinen häviöteho.

- Esimerkiksi nimelliseltä häviöteholtaan 5 W oleva transistori kuluttaa ainoastaan 2 W tehoa, jos se on aktiivinen ainoastaan 40 % kokonaisajasta.
- mitoituksellisesti on tärkeintä saada tieto myös siitä, saavuttaako komponentti toimintajakson aikana tasapainotilaa vastaavan käyttölämpötilan vai ei.

Kun sähkölaite ei ole päällä, on se ympäristönsä kanssa termisessä tasapainotilassa eli laitteen lämpötila on sama kuin ympäristön lämpötila.

- käynnistettäessä laitteen komponenttien ja samalla koko laitteen lämpötila alkaa nousta
- laitteen lämpötila jatkaa nousuaan kunnes saavutetaan tila, jossa jäähdytysjärjestelmän pois kuljettava lämpö on yhtä suuri kuin laitteen komponenttien yhteenlaskettu häviöteho
- tässä pisteessä laitteen sanotaan toimivan jatkuvuustilassa. Periodi, jossa laitteen lämpötila nousi, kutsutaan transienttivaiheeksi.

Laitteen toimintalämpötilan vaihteluista johtuvat lämpöjännitykset heikentävät laitteen luotettavuutta. Kokeellisten analyysien avulla on todettu, että yli 20 °C toimintalämpötilan vaihteluun altistettujen sähkölaitteiden vikataajuus kasvoi kahdeksankertaiseksi.

Lämpöjännitysten aiheuttamat mekaaniset värähtelyt ja lämpöiskut ovat myös yleisiä vikojen aiheuttajia ja näin ollen ne on myös otettava mitoituksessa huomioon.

Suurin osa sähkö- ja elektroniikkalaitteista toimii yhtäjaksoisesti pitkiä jaksoja, jolloin niiden jäähdytysjärjestelmät mitoitetaan jatkuvuustilan mukaisesti. Toisaalta tietyissä sovelluksissa laitteet toimivat niin lyhyen ajan, etteivät ne ikinä saavuta termistä jatkuvuustilaa.

Lämpöinen/sähköinen analogia

Edellä kuvattiin kaikki kolme mekanismia, joilla lämpö voi siirtyä paikasta toiseen. Yleensä ympäristöään korkeammassa lämpötilassa olevasta kappaleesta, esim. elektronisesta komponentista, lämpö siirtyy kaikkia kolmea tapaa käyttäen.

Lämpöisiä kytkentöjä voidaan mallittaa sähköisiä piirejä vastaavalla ekvivalenttisella kytkennällä:

$$\text{Lämpöinen:} \quad T_1 - T_2 = \theta \cdot P_D$$

$$\text{Sähköinen:} \quad V_1 - V_2 = R \cdot I$$

- Lämpötilaero ($^{\circ}\text{C}$ tai K) $T_1 - T_2$ vastaa sähköpiirien potentiaaliero $V_1 - V_2$, siirrettävä häviöteho $[\text{W}]$ P_D vastaa virtaa I ja termien resistanssi (thermal resistance) θ vastaa sähköpiirien resistanssia R .
- termiset resistanssit $[\text{K/W}]$ tai $^{\circ}\text{C/W}$ eri lämmönsiirtomenetelmille on määritetty edellä.

Termisiä resistansseja voidaan käsitellä kuten sähköisiä:

- Sarjakytkentä:

$$\theta_{\text{series}} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots$$

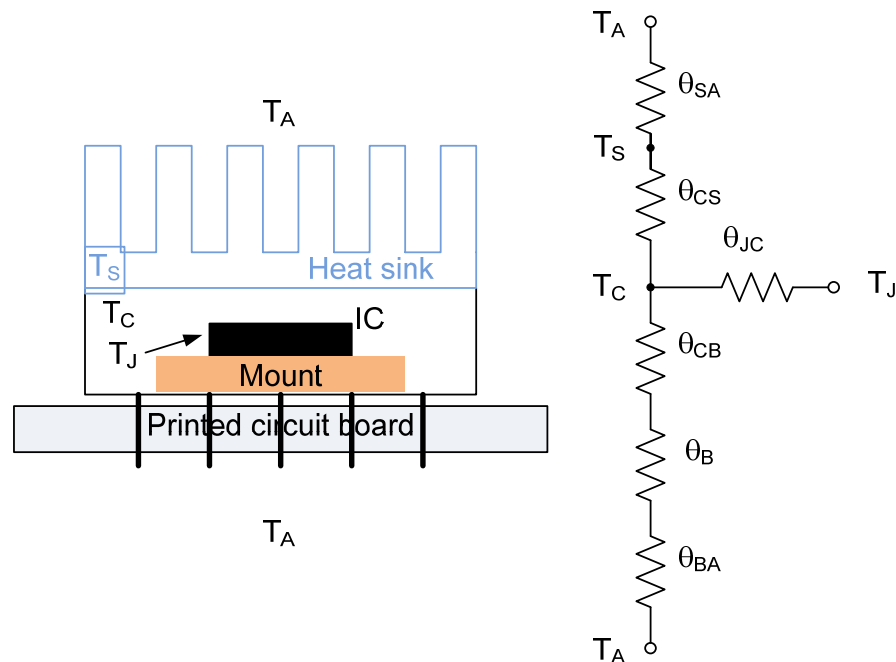
- Rinnankytkentä:

$$\frac{1}{\theta_{\text{parallel}}} = \frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2} + \frac{1}{\theta_3} + \dots$$

Komponenttivalmistajat ilmoittavat yleensä komponenteille lämpöresistanssin liitoksesta ympäristöön (θ_{JA}) ja maksimin liitoslämpötilan (T_1 tai T_J). Kun suunnittelija tietää komponentin tehohäviön ja ympäristön lämpötilan (T_2 tai T_A) hän voi mitoittaa jäähdytysalueen, jotta lämpöresistanssi tulee oikeaksi.

Merkintätapoja, joita yleisesti käytetään:

- θ_{JA} = theta JA (junction to ambient tai junction to air)
- θ_{JC} = theta JC (junction to case)
- θ_{CS} = theta CS (case to heatsink)
- θ_{SA} = theta SA (heatsink to ambient)
- θ_{CB} = theta CB (case to board)
- θ_B = theta B (board)
- θ_{BA} = theta BA (board to ambient)

Piirilevyllä olevan IC-piirin ja siihen kytketyn jäähdytyslevyn lämpömalli

Kriittinen parametri on kotelon sisällä olevan chipin liitoslämpötila T_J , joka on useimmille ic-piireille aina pidettävä alle 150°C.

Kuvassa on esitetty eri lämpötilat ja eri rajapintojen lämpöresistanssit

- T_A on ympäristön (ambient) lämpötila
- T_S on jäähdytyslevyn (heat sink) lämpötila
- T_C on ic-piirin kotelon (case) lämpötila
- T_J on liitoslämpötila.

Ilman jäähdytyslevyä liitoksen ja ympäristön välinen lämpöresistanssi θ_{JA} on

$$\theta_{JA} \approx \theta_{JC} + \theta_{CA}$$

- tämä on yleensä (katso liite) useita kymmeniä °C/W, joten θ_{CA} täytyy pienentää jäähdytyslevyllä, tms. θ_{JC} :hen ei pystytä vaikuttamaan.

Jäähdytyslevy yleensä kiinnitetään ic-piiriin siten, että ic-piirin kotelon ja jäähdytyslevyn lämpötilaero on mahdollisimman pieni

- siis θ_{CS} pienennetään, yleensä se saadaan helposti < 1°C/W
- piirasvaa (johtaa hyvin lämpöä) kotelon ja jäähdytyslevyn väliin
- hiotaan pinnata tasaiseksi
- jos sähköistä eristystä tarvitaan, kiillelevy on asetettava väliin

Nyt liitoksen ja ympäristön lämpöresistanssi θ_{JA} on

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}$$

Liitoksen lämpötilaksi T_J saadaan

$$T_J = P_D \cdot \theta_{JA} = P_D \cdot (\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA})$$

Nyt tunnetaan maksimi liitoslämpötila $T_{J(MAX)}$, maksimi ympäristön lämpötila $T_{A(MAX)}$ ja $P_{D(MAX)}$, joten jäähdytyslevyn θ_{SA} (+ θ_{CS}) voidaan laskea ja oikeanlainen jäähdytyslevy valita:

$$T_{J(MAX)} - T_{A(MAX)} = P_{D(MAX)} \cdot \theta_{JA}$$

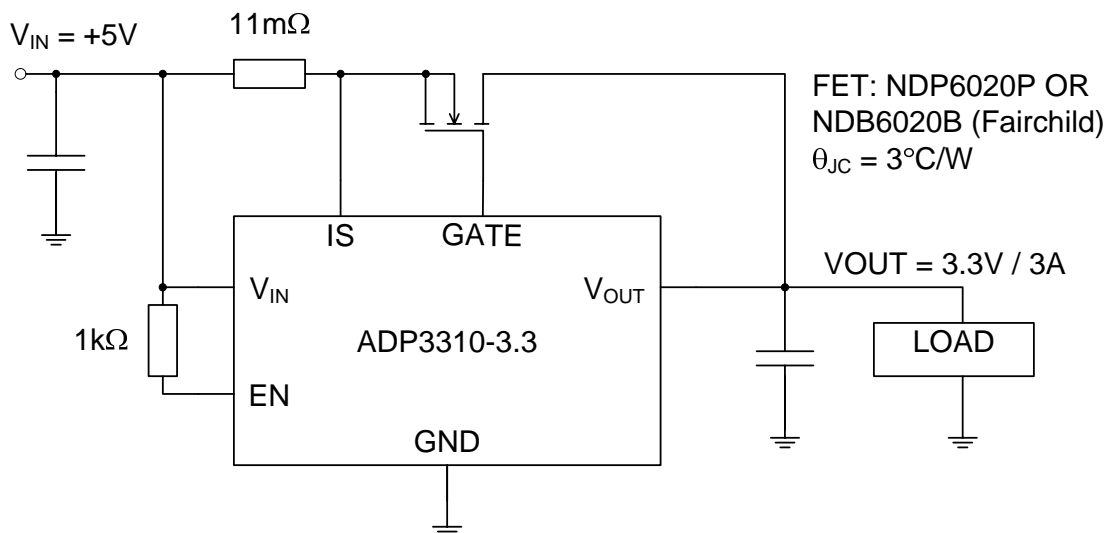
joten jäähdytyslevyn lämpöresistanssille saadaan arvo

$$\theta_{SA} = \theta_{JA} - \theta_{JC} - \theta_{CS} = \frac{T_{J(MAX)} - T_{A(MAX)}}{P_{D(MAX)}} - \theta_{JC} - \theta_{CS} \approx \frac{T_{J(MAX)} - T_{A(MAX)}}{P_{D(MAX)}} - \theta_{JC}$$

- likiarvoistus, jos θ_{CS} on riittävän pieni, yleensä $< 1^\circ\text{C/W}$.

Esimerkki

LDO-regulaattoria ADP3310-3.3 käytetään tekemään +5 V:n tulojännitteestä 3.3 V:n lähtöjännite kuormaan, joka ottaa 3 A virtaa.



Kytkenässä käytetään pääteasteena ulkoista transistoria, jonka yli jää 1.7 V jännitettä ja jonka läpi kulkee 3 A:n kuormavirta. MOS-transistorin on kestävä tehohäviö $P_D = 5.1$ W.

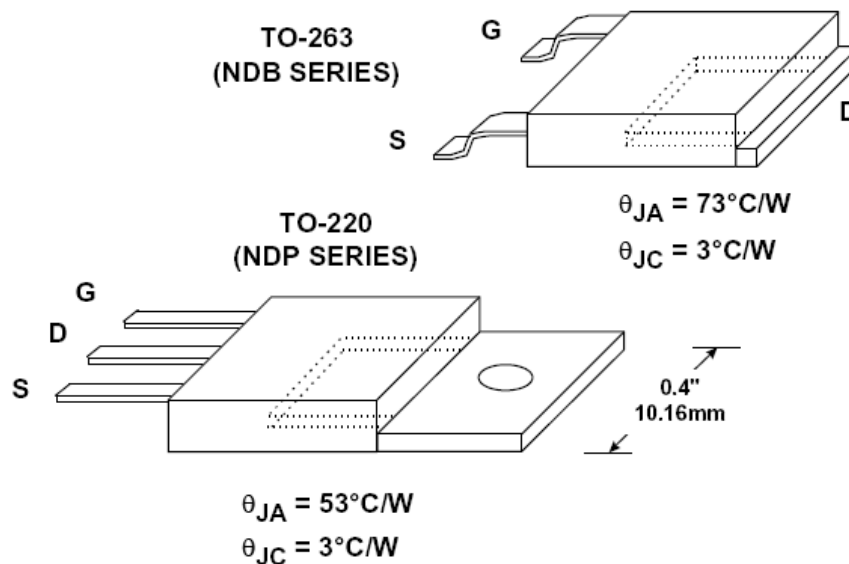
Valmistajan lupaama suurin sallittu liitoksen lämpötila on $T_{J(MAX)} = +125^\circ\text{C}$ ja suunniteltu suurin ympäristön lämpötila on $T_{A(MAX)} = +50^\circ\text{C}$.

Transistorin kotelon lämpöresistanssi θ_{JC} liitoksesta koteloon on 3°C/W , joten lämpöresistanssi kotelosta ympäristöön θ_{SA} voidaan laskea olevan

$$\theta_{SA} \approx \frac{T_{J(MAX)} - T_{A(MAX)}}{P_{D(MAX)}} - \theta_{JC} = \frac{125 - 50}{5.1} - 3 = 14.71 - 3 \approx 11.7^\circ\text{C/W}.$$

MOS-transistoria on saatavana kahdella eri kotelotyypillä TO-220 ja TO-263 eli D²PAK:

TO-220 AND TO-263 (D²PAK) PACKAGES FOR FAIRCHILD NDP6020P/NDB6020P FETs



Kotelon TO-220 lämpöresistanssi liitoksesta ympäristöön $\theta_{JA} = 53^\circ\text{C/W}$ ilman ilmavirtausta ja siinä on kiinnitysreikä ruuvia varten jäähdytyslevyyn.

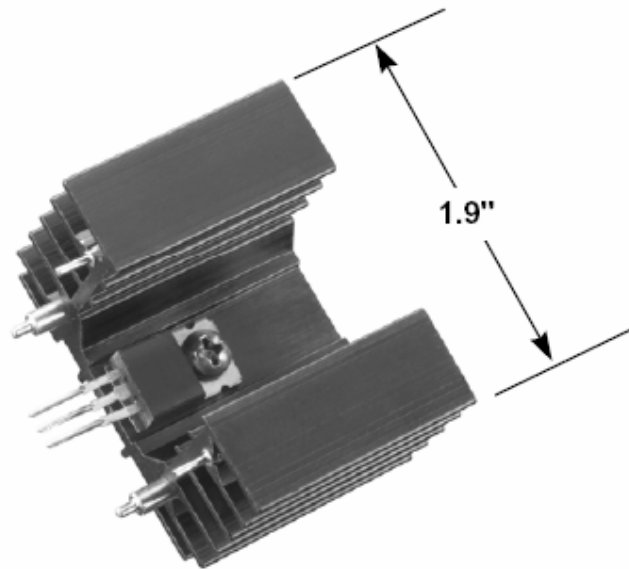
TO-263-tyyppisen kotelon lämpöresistanssi $\theta_{JA} = 53^\circ\text{C/W}$ ilman ilmavirtausta ja kotelo on pintaliitoskotelo ja suunniteltu asennettavaksi suoraan piirilevyn

pintaan. Pinni D on tarkoitus juottaa suoraan piirilevyllä olevalle piirikuviolle (padille), jonka on tarkoitus toimia samalla jäähdytyslevynä.

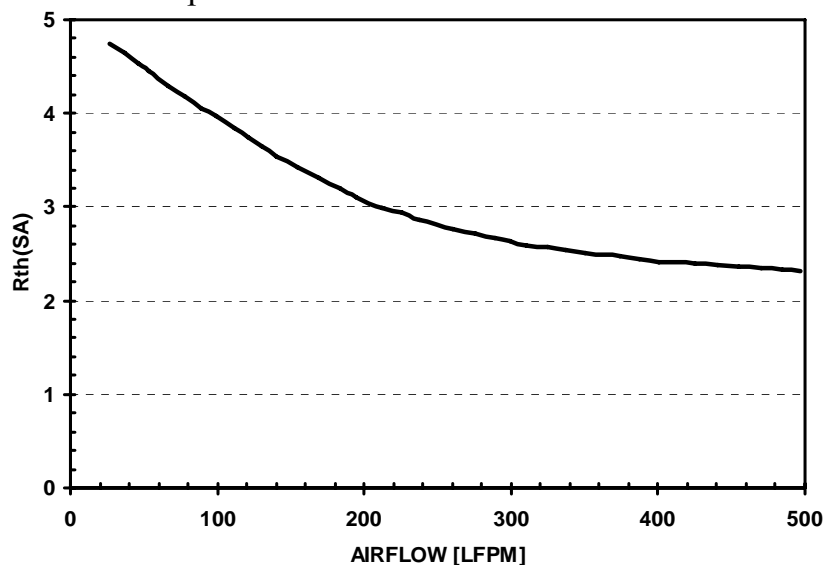
Seuraavaksi etsitään oikeanlainen jäähdytyslevy, joille löytyy monia eri valmistajia.

Esimerkiksi AAVID Thermal Technologies valmistaa lukuisia eri jäähdytyslevyjä, valintakriteerejä (www.aavidthermalloy.com/products/heatsinks.shtml)

- nimellishäviöteho
- lämpöresistanssi
- fyysinen koko (ja jäähdytyskyky) eri kotelotyypeille



Lämpöresistanssi ilmavirtauksen funktiona

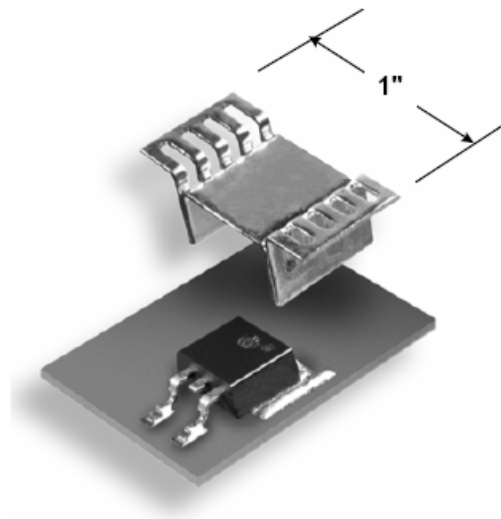


- LFPM = Linear feet per minute

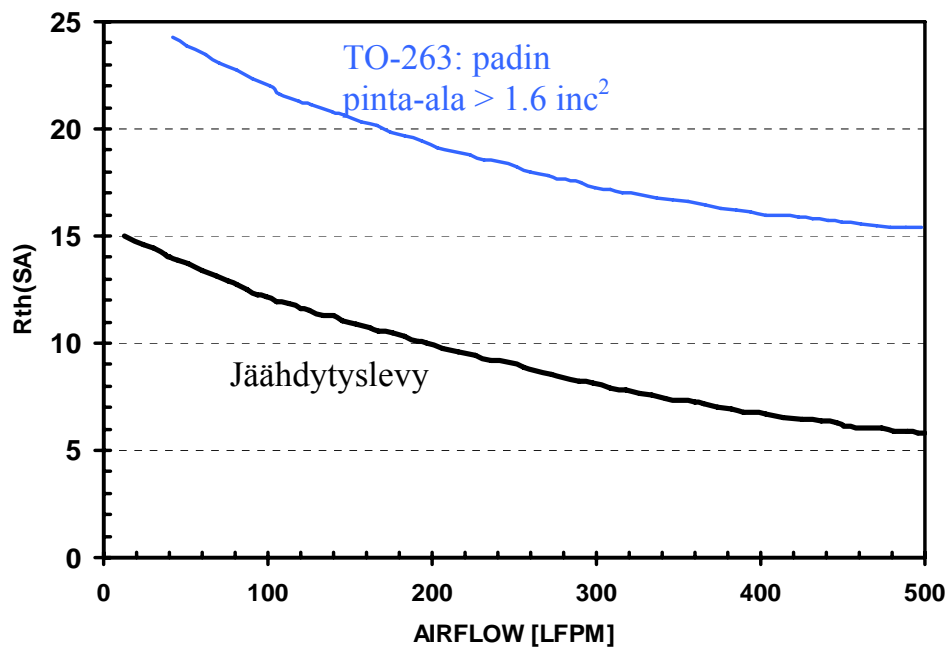
Esimerkki sopivasta tyypistä (582002B12500):

- pultataan piirilevylle kiinni
- lämpöresistanssi θ_{JA} on noin 5°C/W ilman ilmavirtausta, eli noin puolet vaaditusta 11.7°C/W .

TO-263 kotelolle sopiva (573300):



Lämpöresistanssi ilmavirtauksen funktiona

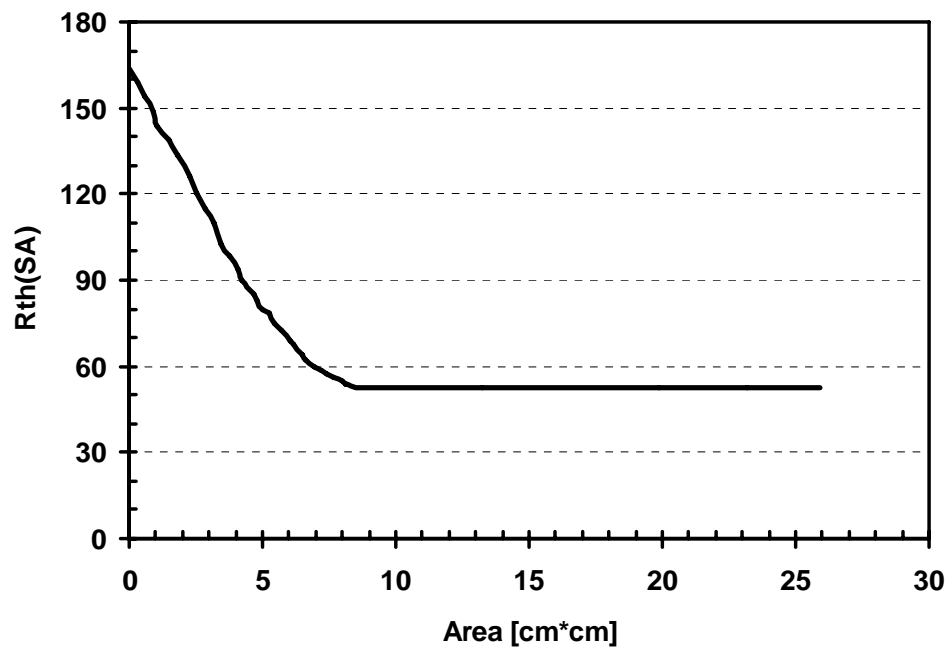
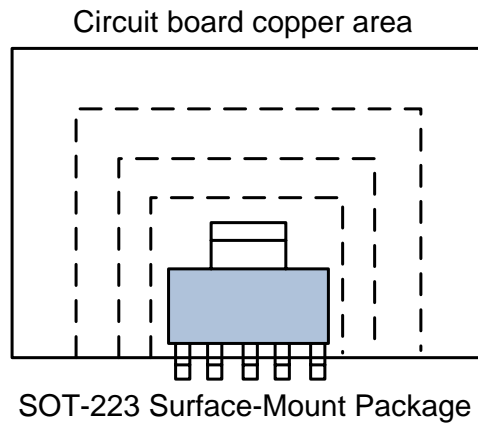


- Pintaliitosjäähdytyslevyn lisääminen pienentää lämpöresistanssia arviolta $10^{\circ}\text{C}/\text{W}$:iin, kun ilmavirtauksen voidaan olettaa olevan kohtalainen 200 LFPM.
- kuvassa näkyy myös lämpöresistanssi ilman jäähdytyslevyä ilmavirtauksen funktiona.

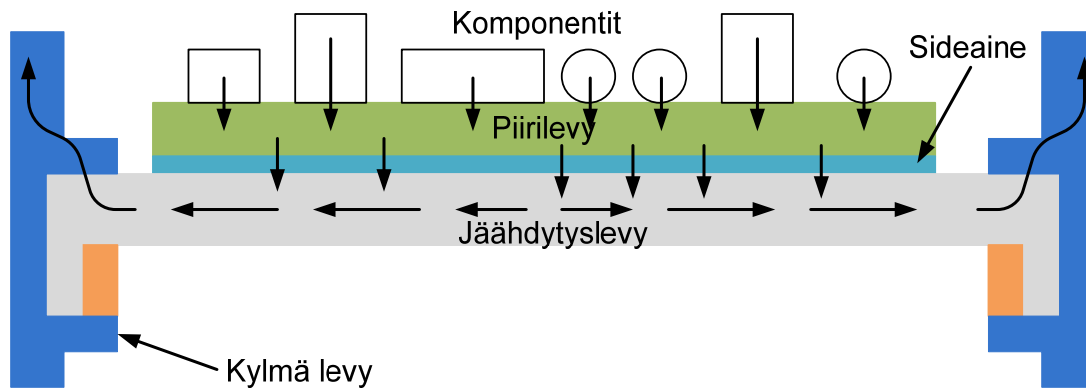
Jäähdytysmenetelmiä

Piirilevyn käyttö

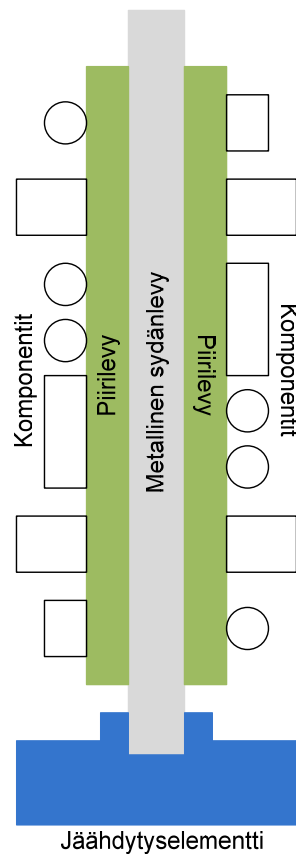
- Piirilevyn pinnan kuparia voi käyttää jäähdytykseen. Esimerkiksi piirilevyn lämpöresistanssi SOT-223 kotelolla:



- vaikutusta voidaan tehostaa pakotetulla konvektiolla eli kierrättämällä ilmaa esim. tuulettimella
- piirilevy voidaan myös sijoittaa jäähdytyslevylle esimerkiksi siirtämällä komponenteissa syntyvä lämpö piirikortin ja sideaineen läpi jäähdytyslevyyn keskelle, josta se kulkee jäähdytyslevyä pitkin lopulliseen jäähdytyslementtiin tai kylmään levyyn, joka on ulkoisesti jäähdytetty.



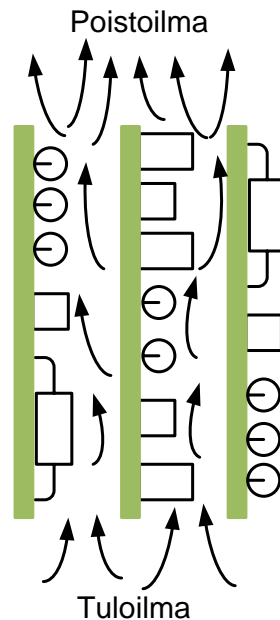
- tai



- Jäähdytyslevy tarjoaa lämmölle pienen lämpöresistanssin omaavan reitin piirikortista lopulliseen jäähdytyselementtiin. Mitä paksumpi jäähdytyslevy on, sitä pienempi on se lämpöresistanssi ja siten sitä pienempi lämpötilaero syntyy jäähdytyslevyn keskipisteen ja sen reunojen välille.
- Piirikortin keskipisteessä olevat komponentit toimivat siten korkeimmassa lämpötilassa ja piirikortin reunoilla olevat komponentit ovat matalimmassa lämpötilassa. Mikäli lopullinen jäähdytyselementti on asennettuna piirikortin molemmille reunoille, niin kortin vasemmalla puoliskolla syntyvä lämpöteho virtaa jäähdytyslevyä pitkin kohti vasenta jäähdytyselementtiä ja oikealla puoliskolla syntyvä lämpöteho vastaavasti kohti oikeata jäähdytyselementtiä (1D-tapaus).
- Kaksidimensioiseen lämmönsiirtotehtävään joudutaan, mikäli piirikortti jäähdytetään sen jokaisesta neljästä sivusta. Jäähdytyslevyä käytettäessä lämpö siirtyy johtumalla piirikortin epoksikerroksen läpi sen paksuussuunnassa, joten epoksikerroksen lämpöresistanssi on huomattavasti pienempi kuin tapauksissa, joissa lämpö johtuu epoksikerroksen pituussuunnassa. Epoksikerroksen lämpöresistanssia voidaan vielä tästäkin pienentää tekemällä epoksikerrokseen reikiä ja täyttämällä ne kuparilla. Reiät ovat yleensä halkaisijaltaan noin 1mm ja niiden keskipisteet ovat muutaman mm päässä toisistaan.
- Piirikorttien jäähdytys johtumislämmönsiirron avulla voidaan myös toteuttaa kuvan oikean osan mukaisesti siten, että molemmin puolin komponentteja sisältävän piirikortin keskiosaan on asennettu kuparista tai alumiinista tehty sydänlaatta, joka puolestaan on kiinnitetty jäähdytyselementtiin. Lämpökuorma tässä tapauksessa on kaksinkertainen verrattuna tapaukseen, jossa komponentteja on vain piirilevyn yhdellä puolella.
- Komponenteissa syntyvä häviölämpö siirtyy johtumalla piirilevyn läpi metalliseen sydänlaattaan, joka toimii tehokkaana lämmönsiirtoreittinä piirilevyn ja jäähdytyselementin välillä.
- Sydänlaatan paksuus on valittava siten, että komponenttien toimintalämpötila pysyy niille määrätyn maksimilämpötilan alapuolella.

Vapaa konvektio

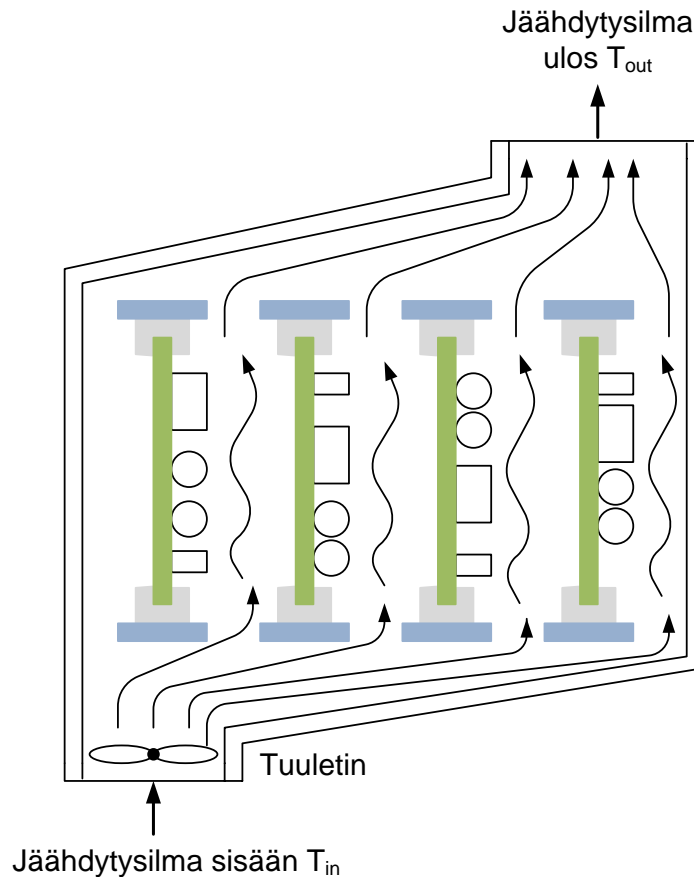
- Vapaalla konvektiolla jäähdytettävät piirikorttiryhmittä on sijoitettava koteloon pystysuoraan tuloilmaan nähden lämmönsiirtopinta-alan maksimoimiseksi ja siten riittävän lämmönsiirtotehokkuuden takaamiseksi.
- Siten myös minimoidaan mahdollisia kuumia kohtia aiheuttavat ilmataskut.
- Jäähdytettävät piirikortit eivät saa olla liian kaukana toisistaan, jotta kotelon koko ei kasvaisi kohtuuttoman suureksi. Optimaalinen korttien etäisyys toisistaan on n. 2 cm.



- Piirikortit, joiden häviöteho on 5 W tai joiden lämpövuoto on n. 0.02 W/cm^2 , kyetään jäähdyttämään vapaan konvektion avulla. Piirikorttien lämmönsiirtoa voidaan analysoida approksimoimalla ne levyiksi, joissa häviöteho ja siten lämpö on tasaisesti jakautunut kortin toiselle puolella ja toinen puoli kortista on lämpöeristetty.
- Piirikorteilla, joissa komponentteja on kortin molemmin puolin, lämpökuorma on kaksinkertainen verrattuna yksipuolisiin kortteihin.
- On muistettava, että vapaa konvektio tapahtuu ainoastaan väliaineen ja gravitaatiokentän ollessa läsnä. Siten avaruuselektroniikkaan ei voida soveltaa vapaaseen konvektioon perustuvia menetelmiä, johtuen pääasiassa väliaineen puuttumisesta.
- Sama tilanne tulee vastaan tapauksissa, joissa poistoilma-aukot ovat tukkeutuneet (liian tms. takia), jolloin ilman kierto laitteen sisällä estyy ja lämmönsiirto tapahtuu johtumalla.

- Luonnollisella konvektiolla ja säteilemällä tapahtuvaa lämmönsiirtotehoa voidaan parantaa kiinnittämällä jäähdytettäviin pintoihin jäähdytysripoja.

Pakotettu konvektio



- Mikäli vapaaseen konvektioon perustuva jäähdytys on riittämätön, voidaan systeemiin lisätä tuuletin, jonka avulla jäähdytysilman nopeutta ja siten lämmönsiirtotehoa voidaan säätää halutulla tavalla. Riippuen tuulettimen koosta pakotetulla konvektiolla päästään jopa kymmenkertaiseen lämmönsiirtotehokkuuteen vapaaseen konvektioon verrattuna.
- Pakotetun konvektion tapauksessa jätetään säteilylämmönsiirto huomioon ottamatta kahdesta syystä.
 - Ensinnäkin pakotetun konvektion lämmönsiirtoteho on tarkasteltavilla lämpötilaeroilla huomattavasti säteilylämmönsiirtoa suurempi ja
 - pakotetussa konvektiossa jäähdytettävät komponentit on sijoitettu koteloihin, joissa komponentit ovat lähestulkoon samassa lämpötilassa.

- Siten jäähdytettävillä komponenteilla ei ole 'näkyvyyttä' suhteessa kylmempiin komponentteihin eli eri komponenttien välinen säteilylämmönsiirto on käytännössä olematonta.
- Huomaa, että vakiona pysyvällä jäähdytysaineen massavirralla myös jäähdytysaineen lämpötilaero pysyy vakiona.
 - Mitä korkeampi on tuloilman lämpötila sitä korkeampi on poistoilman lämpötila ja siten myös jäähdytettävien komponenttien pintalämpötila.
- Hyvin suunnitellussa pakotettuun konvektioon perustuvassa jäähdytysjärjestelmässä tulee jäähdytysilman lämpötila nousu rajoittaa arvon $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja poistoilman maksimilämpötila rajoittaa $70\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Siten jäähdytettävien komponenttien pintalämpötila on alle $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Jäähdytyslevyt

- Jäähdytyslevyt ovat kaikkein yksinkertaisin jäähdytysmuoto pintakonvektion jälkeen elektroniikkalaitteille.
- Tyypillinen jäähdytyslevy on massiivinen metallikappale, jonka lämmönsiirtopinta-alaa on kasvatettu rivoittamalla.
- Jäähdytyslevyjä voidaan valmistaa sekä muotoilla monella eri tavoin, mutta jäähdytyslevyn päätarkoituksena on aina lisätä lämmönsiirtoa jäähdytyslevyn pinnasta ulommaiseen jäähdytysaineeseen, joka yleensä on jäähdytyslevyä ympäröivä ilma.
- Pääosa jäähdytyslevyistä on valmistettu alumiinista.
 - Alumiini johtaa erinomaisen hyvin lämpöä, on kevyt ja suhteellisen halpa materiaali.
 - Kuparilla on alumiinia parempi lämmönjohtavuus, mutta sen korkean hinnan vuoksi se ei ole kovin yleinen materiaali.
 - Kun verrataan alumiinia teräkseen, niin terästä tarvittaisiin kaksinkertainen ja ruostumatonta terästä nelinkertainen määrä alumiiniin verrattuna, jotta saavutettaisiin sama jäähdytysteho.
- Toinen tärkeä asia parametri jäähdytyslevyn tehokkuutta arvioitaessa on materiaalin lisäksi sen lämmönsiirtopinta-ala.
 - Mitä suurempi on jäähdytyslementin lämmönsiirtopinta-ala, sitä tehokkaampaa on lämmönsiirto jäähdytyslevystä ympäristöön konvektion ja säteilyn avulla.
- Eri lämmönsiirtomuotojen tehokkuus on kuitenkin vahvasti riippuvainen kappaleen ja ympäristön lämpötiloista sekä pinnan säteilyominaisuuksista.
- Jäähdytyslevyt voidaan jaotella valmistusmenetelmien sekä muotojen perusteella. Yleisimpien ilmajäähdytteisten jäähdytyslevyjen jako valmistustekniikan mukaan:
 - Meistäminen (stampings):

- Kupari- tai alumiinilevyt painetaan haluttuun muotoon. Käytetään perinteisissä ilmajäähdytteisissä elektroniikkakomponenteissa ja ne ovat edullinen ratkaisu alhaisen jäähdytyskyvyn laitteisiin.
 - Ne sopivat massatuotantoon, koska niiden valmistus on halpaa
 - Lisäksi niiden asentaminen on yksinkertaista.
- Puristus (extrusion):
 - Tämä valmistustekniikka mahdollistaa kaksiulotteisten muotojen tekemisen, jolloin lämmönhaihdutus on suurta.
 - Puristustekniikka rajoittaa jäähdytysripojen tiheyden ja paksuuden tiettyihin alarajoihin.
- Elementtijäähdytyslevyt (bonded/fabricated fins):
 - Näissä korkean suorituskyvyn omaavissa jäähdytyslevyissä hyödynnetään lämmönjohtavaa alumiinitäytteistä epoksia, josta jäähdytysrivat valmistetaan.
 - Rivat kiinnitetään levyn uritettuun pohjaan.
 - Tällä tavoin saadaan enemmän pinta-alaa ja huomattavasti suurempi jäähdytyskyky edelliseen menetelmään verrattuna ilman, että levyn kokoa kasvatetaan.
- Valetut (castings):
 - Valamalla valmistetaan jäähdytyslevyjä alumiinista tai kuparista/pronssista.
 - Tällä tekniikalla pystytään valmistamaan korkean jäähdytysripatiheyden omaavia jäähdytyslevyjä.
- Aallotetut jäähdytyslevyt (folded fins):
 - Alumiini- tai kuparilevystä valmistetut rivat lisäävät jäähdytyslevyn pinta-alaa.
 - Jäähdytysrivat asennetaan jäähdytyslevypohjaan tai suoraan jäähdytettävään komponenttiin liimaamalla tai juottamalla.
 - Sallii suuren suorituskyvyn jäähdytyslevyjen valmistamisen sovelluskohtaisesti.
- Erilaisten jäähdytyslevyjen ominaisuudet eri tuuletusolosuhteissa vaihtelevat paljon. Tämän vuoksi on määritelty termi lämmönsiirtotehokkuus η kuvaamaan erilaisten jäähdytyslevyjen tehokkuutta:

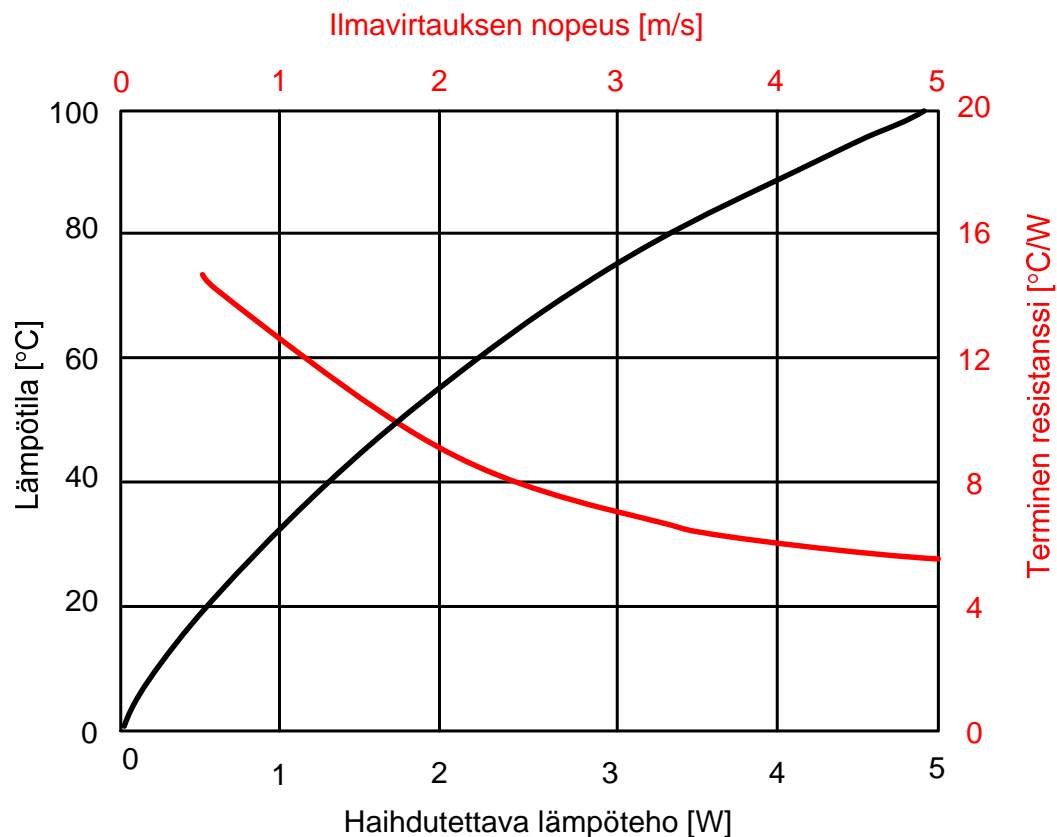
$$\eta = \frac{Q}{q_m \cdot c_p \cdot \Delta T_{SA}}$$

- missä Q on lämpöteho,
- q_m on ilman jäähdytyslevylle tuleva massavirta,
- c_p on fluidin (ilman) ominaislämpökapasiteetti ja

- ΔT_{sa} jäähdytyslevyn ja ympäröivän ilman keskimääräinen lämpötilaero.
- Erilaisten jäähdytyslevyjen lämmönsiirtotehokkuuden arvoja on esitetty oheisessa taulukossa



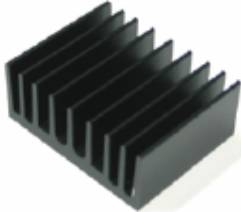

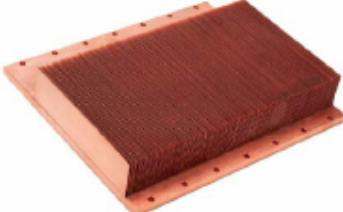

<i>Jäähdytyslevytyyppi</i>	<i>η [%]</i>
Meistetyt (stampings) jäähdytyslevyt	10 - 18
Rivalliset muottiin puristetut (extrusion) jäähdytyslevyt	15 - 22
Tuuletinkäyttöön tehdyt jäähdytyslevyt	25 - 32
Kanavilla varustetut jäähdytyslevyt	45 - 58
Kanavoiduilla rivoilla varustetut sekä elementtijäähdytyslevyt	78 - 90

- Jäähdytyslevyjen ominaiskuvaajat



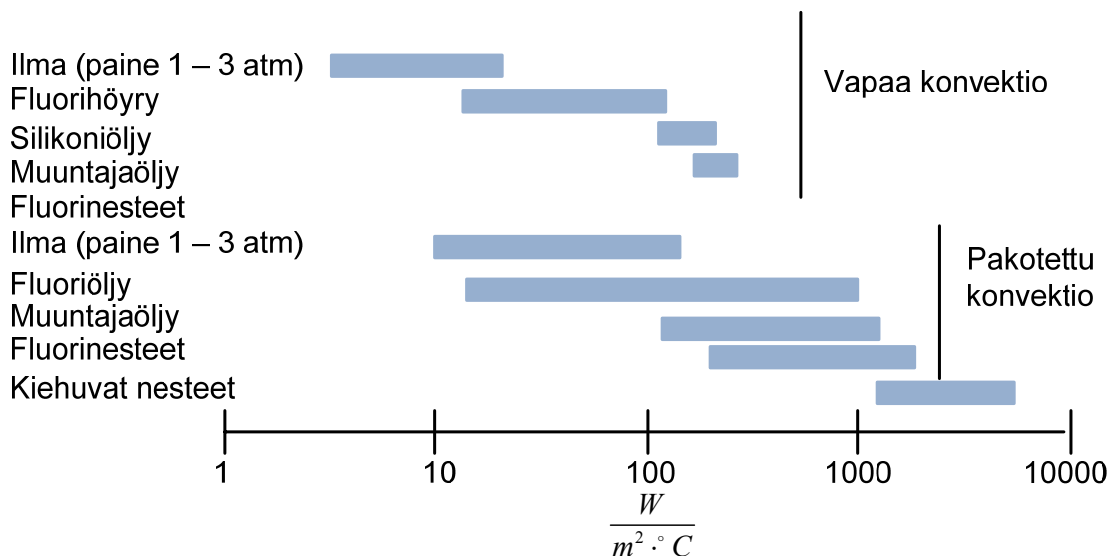
- Kuvassa on yhdistettynä kaksi erillistä käyrää. Oletuksena on, että jäähdytyslevy on asennettu oikein sekä virtauksen suunta on levyyn nähden oikea.
 - Alhaalta nolasta lähtevä musta käyrä kuvaa jäähdytyslevyn lämpötilan ΔT_{sa} nousun haihdutettavan lämpötehon Q funktiona luonnollisessa konvektiossa.
 - Oletuksena on, että jäähdytyslevy on maalattu tai eloksoitu mustaksi (säteilyn osuus maksimoitu).
 - Laskeva punainen käyrä kuvaa puolestaan pakotetun konvektiolämpöresistanssia ilmavirtauksen nopeuden funktiona.
 - Pakotetussa virtauksessa ΔT_{sa} on suoraan verrannollinen haihdutettavaan lämpötehoon Q ja θ_{sa} on ainoastaan riippuvainen virtausnopeudesta.
 - Kuitenkin luonnollisessa virtauksessa ilmiö on epälineaarinen, joten tämän vuoksi ΔT_{sa} on esitettävä Q :n funktiona.
- Suunnittelija voi hyödyntää ominaiskäyrästöjä valitessaan sopivaa jäähdytyslevyä sekä pakotetun konvektion tapauksessa määrittäessään tarvittavan virtauksen miniminopeuden.
 - Jos pakotetussa konvektiossa vaadittu terminen resistanssi on 8 °C/W , nähdään kuvaajasta, että tuuletuksen virtausnopeuden tulisi olla vähintään $2,4\text{ m/s}$.
 - Luonnollisen konvektion tapauksessa jäähdytyslevyn tunnettu lämpöresistanssi θ_{sa} kerrotaan haihdutettavalla lämpöteholla Q , jonka tuloksena saadaan maksimilämpötila ΔT_{sa} .
- Kuvan kuvaajassa pitäisi näillä samoilla ΔT_{sa} :n ja Q :n arvoilla pysyä lämpötila-tehokäyrän yläpuolella, jotta jäähdytyslevy olisi riittävän suuri.

- Kuvissa a) – d) on erilaisia alumiinista valmistettuja jäähdytyslevyjä. Kuvassa e) on kuparista valmistettu jäähdytyslevy. Kuvassa f) on Swiftech:n jäähdytin, joka on suunniteltu maksimaaliseen jäähdytykseen hiljaisilla 80/92mm laitetuulettimilla.

 <p>a) Materiaali: eloksoitu alumiini Koteloille: TO-126 / TO-220 Lämpöresistanssi 31 °C/W Mitat (P*L*K): 19x19x10 mm</p>	 <p>b) Materiaali: eloksoitu alumiini Koteloille: TO-126 / TO-220 Lämpöresistanssi 7 °C/W Mitat (P*L*K): 25x32x20 mm</p>
 <p>c) Materiaali: eloksoitu alumiini Suuri jäähdytyslevy Lämpöresistanssi 4,5 °C/W Mitat (P*L*K): 50x63x25 mm</p>	 <p>d) Materiaali: eloksoitu alumiini IC-piireille Koteloille: DIL-14 / DIL-16 Lämpöresistanssi 31 °C/W Mitat (P*L*K): 21x10,5x7,3 mm</p>
 <p>e) Materiaali: kupari Mitat (P*L*K): 12x17,3x2,75 mm</p>	 <p>f) Materiaali: alumiini/kupari 80/92mm laitetuulettimille Lämpöresistanssi : jäähdytyslevy ja tuuletin 0,3 °C/W Mitat (P*L*K): 75 x 75 x 41,5mm</p>

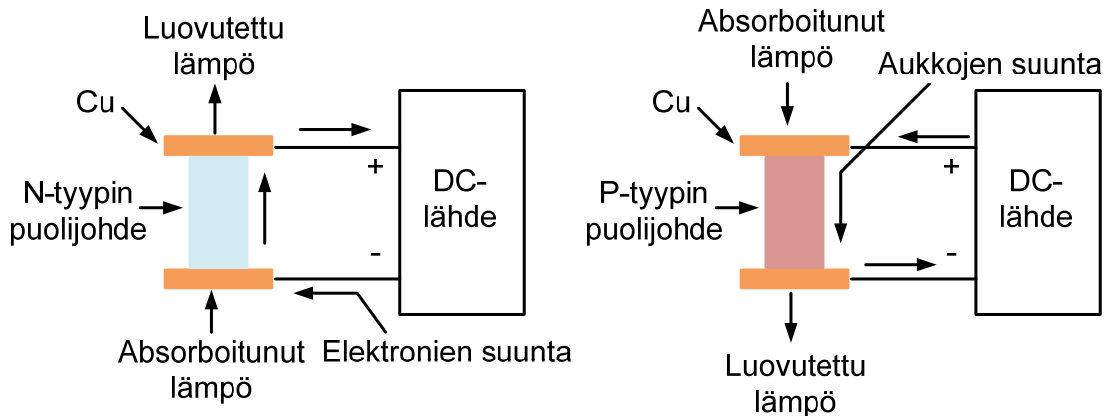
Nestejäähdytys

- Nesteiden lämmönjohtavuus on yleensä huomattavasti suurempi kuin kaasuilla, joten myös niiden lämmönsiirtokertoimet sekä lämmönsiirtotehokkuus ovat kaasujen vastaavia arvoja suurempia.
- Nestejäähdytykseen liittyy kuitenkin omat ongelmansa ja riskinsä, kuten vuodot, korroosio, laitteiston suuri paino ja jäähdytysnesteen kondensoituminen.
 - ⇒ nestejäähdytystä käytetään vain suuritehoisissa laitteissa, joissa ilmajäähdytys ei enää riitä.
- Nestejäähdytys voidaan jakaa suoraan ja epäsuoraan nestejäähdytykseen.
 - Suorassa nestejäähdytyksessä jäähdytettävät komponentit ovat suorassa kosketuksessa jäähdytysnesteen kanssa, eli ne on upotettu jäähdyttävään nesteeseen.
 - Epäsuorassa nestejäähdytyksessä jäähdytettävät komponentit eivät ole suorassa kosketuksessa jäähdytysnesteen kanssa, vaan niiden välissä on erillinen lämmönsiirtopinta, jonka läpi lämpö siirtyy johtumalla.
- Nestejäähdytys jaetaan myös avoimen ja suljetun kierron järjestelmiin.
 - Avoimen kierron nestejäähdytyksessä jäähdytysneste poistetaan järjestelmästä viemäriin tms.
 - Suljetussa kierrossa lämmennyt jäähdytysneste jäähdytetään lämmönsiirtimessä ja kierrätetään takaisin systeemiin. Suljettu kierto on lämpötilansäädön kannalta avointa kiertoa tarkempi.
- Eräiden dielektristen fluidien lämmönsiirtokertoimia:



Peltier-elementti

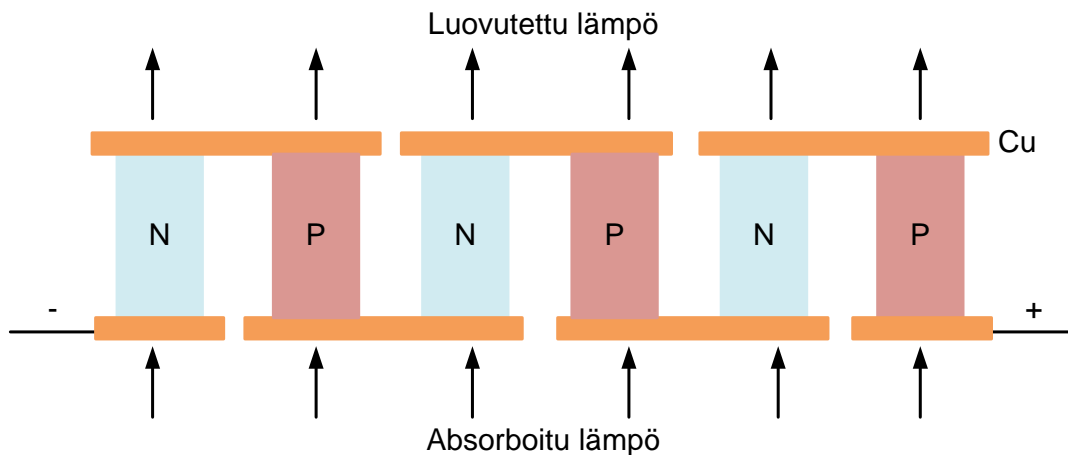
- Lämpösäähkötöknologian (TE-technology) pääperiaate on ns. Peltier-ilmiö, joka keksittiin 1800-luvun alkupuolella.
- Peltier-ilmiö syntyy kun sähkövirta kulkee kahden erityyppisen metallijohtimen muodostaman liitospinnan läpi.
 - Virran suunnasta riippuu absorboiko vai vapauttaako liitos lämpöä.
- Peltier-ilmiö synnytetään käyttämällä puolijohteita kuten bismuntti ja telluridi, koska niiden avulla Peltier-elementit voidaan optimoida käyttökohteen mukaisiksi ja koska puolijohteita käyttämällä suunnittelija voi valita käytettävät varauksenkuljettajat.
- Peltier-elementti on yksinkertaisimmillaan puolijohdepelletti, joka on juotettu kummastakin päästään liitoksen toisena osana toimivaan sähköä johtavaan materiaaliin, joka on yleensä kupari.
- On tärkeää havaita, että lämpöä siirretään varauksenkantajien kulkusuuntaan eli varauksenkuljettajat toimivat lämmön siirtäjinä.
 - Mikäli elementissä käytettävä puolijohde on N-tyyppinen ja elementti on kytketty DC-jännitelähteeseen, niin elektronit liikkuvat negatiivisesta navasta kohti positiivista napaa, jolloin Peltier-elementin pohja absorboi kuvan mukaisesti lämpöä itseensä ja sen kansi puolestaan luovuttaa lämpöä ympäristöönsä.
 - P-tyypin puolijohdetta käytettäessä varauksenkantajina ovat aukot, jotka liikkuvat positiivisesta navasta negatiiviseen, jolloin lämmön absorboituminen ja luovutus tapahtuu N-tyypin puolijohdeeseen nähden päinvastaisessa suunnassa.



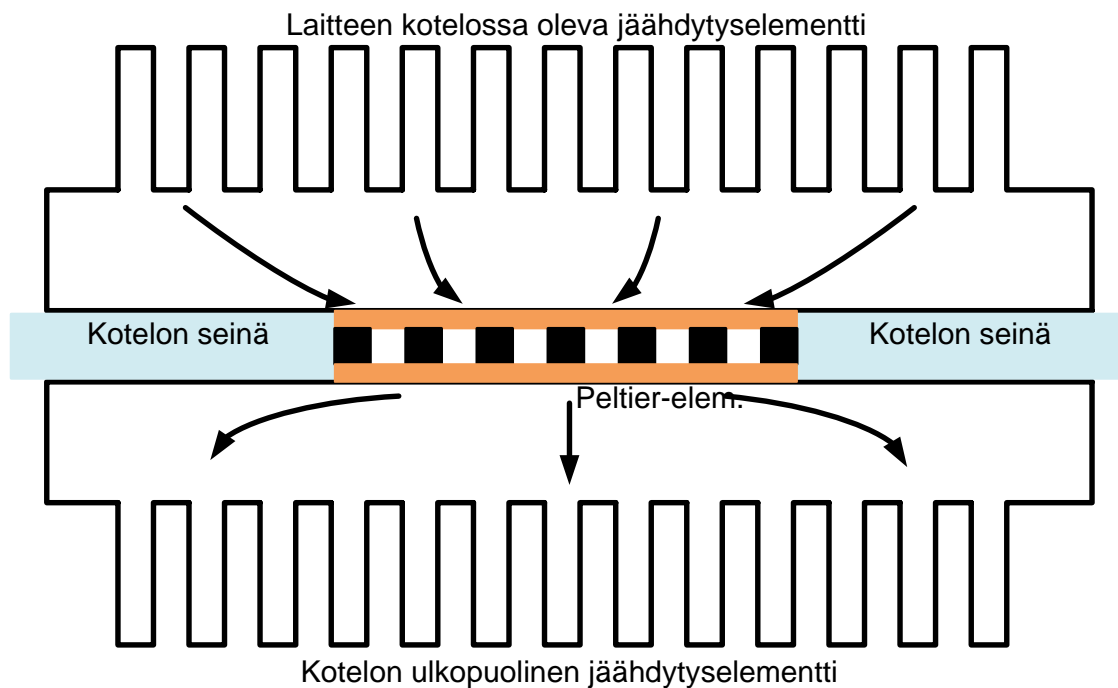
- Yksittäisellä puolijohdepelletillä siirrettävä lämpömäärä on varsin pieni, joten käytännön sovelluksissa pellettejä on elementtiä kohden useampia.
- Yksittäinen puolijohdepelletti kykenee johtamaan 5 A virran jännitteen ollessa ainoastaan 60 mV, joten pellettien rinnankytkentä on käytännössä

poissuljettu vaihtoehto johtuen juuri pellettien matalasta jännitekestoisuudesta.

- Kaikkein yleisimmässä kaupallisessa sovelluksessa pelletit on kytketty sarjaan siten, että N- ja P-tyypin puolijohteet muodostavat kuvan mukaisesti pareja, jossa eri tyyppin puolijohteet on kytketty toisiinsa kupariliuskan avulla. Varsinainen Peltier-liitos muodostuu siten puolijohteen ja kuparin välille.
- Parit kytketään sarjaan siten, että ne kaikki absorboivat lämpöä samasta suunnasta ja vastaavasti luovuttavat absorboimansa lämmön samaan suuntaan eli termisesti parit on kytketty rinnan.
- Tällä tavalla saadaan valmistettua riittävän lämmönsiirtokyvyn omaavia Peltier-elementtejä, jotka soveltuvat suoraan kytkettäväksi 12 - 16 voltin DC-jännitteeseen.



- Kaikkein yleisin tällä tavalla valmistettu Peltier-elementti sisältää 254 puolijohdepellettiä ja sen nimellisjännite ja virta ovat 16 V ja 5 A.
- Koska Peltier-elementti koostuu suuresta joukosta pieniä puolijohdepellettejä, on pelletit elementin mekaanisen kestävyys takaamiseksi suljettu kahden keraamilevyn väliin, joiden pintaan on kiinnitetty erityyppiset pelletit sähköisesti yhdistäviä johdinliuskoja.
 - Elementit ovat muodoltaan neliöitä ja niiden paksuus on yleensä muutamia millijä.
- Keraamilevyjen ulkopinta toimii elementin ja ympäristön välisenä termisenä rajapintana.
- Periaatekuva Peltier-elementin käytöstä laitteen jäähdytykseen:

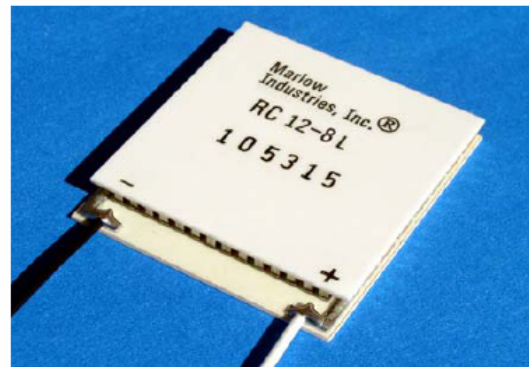


- Kuvassa elementti absorboi lämpöä laitteen kotelossa olevasta jäähdytyslevystä ja luovuttaa lämmön kotelon ulkopuoliseen jäähdytyslevyyn.
- Tavoitteena on siirtää kotelon sisällä oleva lämpö kotelon ulkopuoliseen jäähdytyslementtiin, josta lämpö siirtyy konvektion avulla ilmaan.
- Kooltaan pienempi jäähdytyslementti, joka jäähdytetään kotelossa olevan ilman lämpötilan alapuolelle, on sijoitettu laitteen kotelon sisään.
- Peltier-elementti on sijoitettuna jäähdytyslementtien väliin, jolloin tasavirran kulkiessa elementin läpi, se imee lämpöä kotelon sisältä ja luovuttaa lämmön kotelon ulkopuoliseen jäähdytyslementtiin.
- Useissa sovelluksissa käytetään puhallinta sekä kotelon sisässä että kotelon ulkopuolella kasvattamaan lämmönsiirtotehoa.
- On vielä muistettava, että kotelon ulkopuolisen jäähdytyslementin kautta poistetaan kotelon sisältä pumpattavan lämpötehon lisäksi myös Peltier-elementin itsensä synnyttämä häviöteho.
- Peltier-elementtien jäähdytystehokkuus on varsin alhainen ja valmiit ratkaisut ovat hinnaltaan kalliita.

- Valmistajia esim. Marlow Industries, www.marlow.com

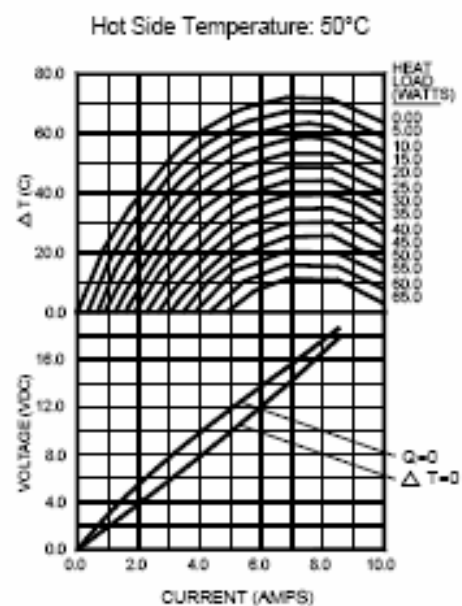
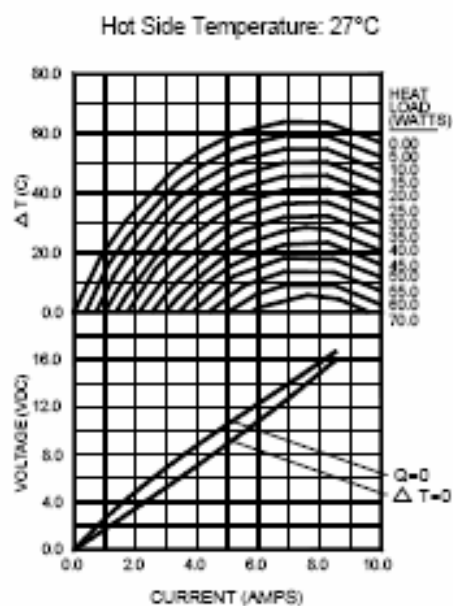
Performance Values

Hot Side Temperature (°C)	27°C	50°C
ΔT_{max} (°C-dry N ₂):	66	74
Q _{max} (watts):	71	78
I _{max} (amps):	7.4	7.4
V _{max} (vdc):	14.7	16.4
AC Resistance (ohms):	1.6	---



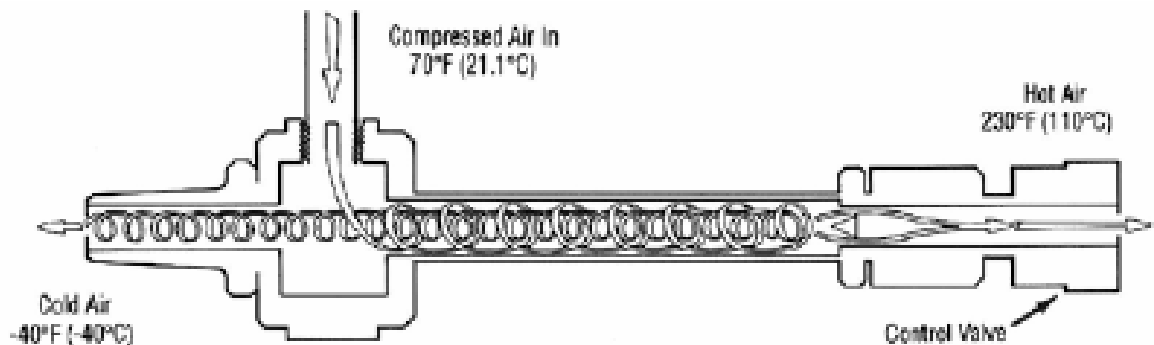
Performance Curves

Environment: One atmosphere dry nitrogen



Vortex-putki

- Vortex-putken kehitti ranskalainen fyysikko G. J. Rangué 1930-luvun alussa ja sen toimintaperiaate on esitettyä kuvassa



- Vortex-putkessa olevaan sylinterimäiseen pyörregeneraattoriin, jonka halkaisija on itse Vortex-putken halkaisijaa suurempi, johdetaan paineilmaa.
- Ilma virtaa edelleen pyörregeneraattorista putkeen suuttimen kautta, jolloin ilman virtaus muuttuu pyörteiseksi.
- Ilman pyörimisnopeus saavuttaa jopa 1 000 000 rpm nopeuden, kun se pakotetaan virtaamaan putken pidemmän (kuumaan) osan sisäpintaa pitkin.
- Putken kuumen osan päässä on säädettävä neulaventtiili, jonka avulla putkesta poistettavaa kuumaa ilmaa voidaan säätää.
- Loput ilmasta pakotetaan virtaamaan takaisin tulovirtauksen sisäpuolella, paluuvirtauksen nopeuden ollessa huomattavasti tulovirtausta pienempi. Samalla lämpöä siirtyy paluuvirtauksesta tulovirtaukseen.
- Jäähdytynyt ilma virtaa pyörregeneraattorin läpi sen kylmässä osassa olevaan poistoilmaputkeen, josta se johdetaan jäähdytettävään kohteeseen.
- Vortex-putken pääperiaate on siten jakaa pyörteinen ilmavirtaus kuumaan ja kylmään virtaukseen.
- Vortex-putki tarvitsee aina paineilmaa toimiakseen, joten se on varsin kallis jäähdytyslaite. Vortex-putkien pääasiallinen käyttö onkin suurten elektroniikkajärjestelmien kaappien jäähdytys.

Eräiden kotelotyyppien lämpöresistansseja

<i>Kotelo</i>	$\theta_{JA} [^{\circ}\text{C}/\text{W}]$	$\theta_{JC} [^{\circ}\text{C}/\text{W}]$
3 pin SOT-23	300	180
5 pin SOT-23	190	
6 pin SOT-23	165	92
8 pin muovinen DIP	90	
8 pin keraaminen DIP	110	22
8 pin SOIC	160	60
8 pin metallikotelo	150	45
10 pin metallikotelo	150	25
12 pin metallikotelo	100	30
14 pin muovinen DIP	150	
14 pin keraaminen DIP	110	130
14 pin SOIC	120	
15 pin SIP	41	2
16 pin muovinen DIP	120	40
16 pin keraaminen DIP	95	22
16 pin SOIC	85	
18 pin keraaminen DIP	120	35
20 pin muovinen DIP	102	31
20 pin keraaminen DIP	70	10
20 pin SOIC	74	24