



ELEKTRONIIKAN JÄÄHDYTYSRATKAISUT TIETOKONEISSA JA ÄLYPUHELIMISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2021

Eero Salonen

Tarkastaja: TkT Markku Nikku

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Eero Juhani Salonen

ELEKTRONIIKAN JÄÄHDYTYSRATKAISUT TIETOKONEISSA JA ÄLYPUHELIMISSA

Energiatekniikan kandidaatintyö

27 sivua, 6 kuvaa, 1 taulukko ja 0 liitettä

Tarkastaja: TkT Markku Nikku

Avainsanat: elektroniikan jäähdytys, lämmönsiirto, lämmönsiirrin, lämpöputki, jäähdytyslementti, kylmäaine

Tässä kandidaatintyössä käsitellään modernien elektronisten laitteiden kuten tietokoneiden ja älypuhelimien jäähdytysratkaisuja nykyaikana, ja mitä trendejä niiden kehitykselle on nykypäivänä. Työssä pyritään kirjallisuuskokoelmana keräämään tietoa erilaisten laitteistojen toiminnasta ja niiden soveltuvuudesta elektroniikan jäähdytykseen, sekä arvioidaan miten ne voivat vastata elektroniikan kehityksen trendeihin, ja uniikkeihin vaatimuksiin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Eero Juhani Salonen

ELECTRONICS COOLING SOLUTIONS IN COMPUTERS AND SMARTPHONES

Bachelor's thesis

2021

27 pages, 6 figures, 1 table and 0 appendices

Examiners: postdoctoral researcher Markku Nikku

Keywords: electronics cooling, heat transfer, heat exchanger, heat pipe, heat sink, coolant

This bachelor's thesis consists of analysis and explanation of modern cooling solutions for electronics devices, and what trends their development follows. This thesis aims to gather information on operation and viability of modern electronics cooling technology and evaluate how they can answer the unique demands of developmental trends of electronic devices in the future.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m ²]
E	emissiivinen teho	[W/m ²]
T	lämpötila	[°C]
x	etäisyys	[m]
k	lämmönjohtavuus	[W/(m·K)]
h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² · K)]
q	lämpöteho	[W]

Kreikkalaiset

α	absorptiokerroin	[-]
ε	emissiviteetti	[-]
σ	Stefan-Boltzmannin vakio	[5.670 · W · m ⁻² · K ⁻⁴]

Alaindeksit

∞	ympäristö
s	pinta

Lyhenteet

UTHP	ultraohut lämpöputki	Ultra Thin Heat Pipe
TEG	lämpösähköinen sähköntuotanto	Thermo Electric Generation
TDP	lämpösuunnitteluteho	Thermal Design Power
CPU	prosessori	Central Processing Unit
RAM	keskusmuisti	Random-Access Memory

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
2	Lämmönsiirron ilmiöt.....	8
2.1	Johtuminen	8
2.2	Konvektio	9
2.3	Säteily.....	10
3	Lämmönsiirron ratkaisut elektronisissa laitteissa.....	11
3.1	Älypuhelinien lämmönsiirto	12
3.2	Tietokoneiden lämmönsiirto.....	13
4	Lämmönsiirrintyytit ja jäähdytin laitteet.....	16
4.1	Jäähdytys-elementti	16
4.2	Lämpöputki	17
4.3	Neste jäähdytys järjestelmä.....	20
4.4	Lämpösähköinen-ilmiö ja siihen perustuvat jäähdyttimet.	21
4.5	TEG	22
4.6	Mikrokanava jäähdytin.....	22
4.7	Tuulettimet ja pumput.....	23
5	Kylmäaineet.....	25
5.1	Nanofliidit	26
6	YHTEENVETO	27
	Lähteet	28

1 Johdanto

Jatkuva yhteiskunnan digitalisaatio on tehnyt elektroniikasta entistä oleellisempaa sen toiminnalle. Elektroniikan jäähdytyksellä on tarve kehittyä laitteiden ja niiden entistä vaativampien toiminta kriteerien ympärillä. Tietokoneiden ja älypuhelimien tehon tarve on noussut viime vuosikymmeninä huomattavasti, ja edelleen jokaisen uuden sukupolven laitteistossa tehon tarve kasvaa. Uudet ja tehokkaat laitteistolle sopivat jäähdytusratkaisut ovat ja tulevat olemaan tärkeässä asemassa tulevaisuudessakin pullonkaulojen välttämiseksi.

Tämä työ pyrkii esittelemään nykyaikaisien elektronisten laitteiden, mutta erityisesti tietokoneisiin, älypuhelimiin, ja vastaaviin laitteisiin soveltuvia jäähdytysratkaisuja ja teoriaa lämmönsiirron ympärillä, sekä analysoimaan nykyaikaisten edellä mainittujen elektronisten laitteiden tarpeita ja uniikkeja piirteitä, ja miten jäähdytysratkaisut soveltuvat elektroniikan käyttötarkoituksiin. Eri ratkaisujen toimintaa ja ominaisuuksia esitellään tieteellisen kirjallisuuden ja tutkimusten perusteella, ja rakennetaan yleiskuvaa nykyaikaisista teknologioista, ja erityisesti niiden soveltuvuudesta elektroniikan jäähdytykseen.

2 Lämmönsiirron ilmiöt

Lämpötilaerot kappaleiden sisällä ja välillä aiheuttavat aina lämmönsiirtoa. Lämmönsiirto siis kuvaa siirtyvää lämpöenergiaa, jonka aiheuttaa lämpötilaero. Lämmönsiirrolla on eri muotoja, joilla lämpö siirtyy ympäristön ja kappaleiden välillä ja sisällä. Lämmönsiirtoa tapahtuu kolmessa eri muodossa, joista jokainen on vaikuttavana tekijänä elektroniikan jäähdytysratkaisuissa. Lämmönsiirron eri mekanismit ovat johtuminen, konvektio, ja säteily (Incropera et. al. 2017 s.2).

2.1 Johtuminen

Johtuminen kuvaa lämpöenergian siirtymistä kappaleen sisällä, kun se tavoittelee tasapainotilaa. Molekyylylasolla lämpö on hiukkasten liikettä kuten värähtelyä, joka siirtyy läheisiin hiukkasiin kontaktin kautta. Tämä energia siirtyy lämpötilagradientin mukaisesti, kunnes tasapainotila on saavutettu. Lämmönsiirto tapahtuu aina lämpötilagradientin mukaisesti laskevaan suuntaan, kun kontaktissa saatavilla oleva molekyylien energia tasaantuu hiukkasten välillä. Molekyylien satunnaisesta liikkeestä johtuvaa energian siirtymistä kutsutaan sen diffuusioksi. Johtumisen voimakkuudelle kappaleessa on monia tekijöitä kuten olomuoto. Nesteissä ja kiinteissä aineissa molekyylit ovat tiukemmin asettuneena kuin kaasuisissa, jolloin värähtely siirtyy tehokkaammin aineen sisällä. Yksiulotteisesti johtumisella siirtynyttä lämpöenergiaa voidaan määrittellä Fourierin lain avulla, joka on esitettyä kaavassa (1) (Incropera et. al. 2017 s.3-4).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Kaavassa k kuvaa kappaleen lämmönjohtavuus kykyä ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), joka on materiaali kohtainen. Yleisesti lämmönsiirron ratkaisuihin halutaan esimerkiksi metalleja, joilla on korkea lämmönjohtavuus kyky. A on kappaleen poikkipinta-ala johtumisen suunnassa (m^2), ja

dT/dx eli lämpötilagradientti kuvaa lämpötilan muutosta suhteessa etäisyyteen (Incropera et. al. 2017 s.4).

2.2 Konvektio

Konvektio on kappaleen pinnan ja fluidin välistä lämmönsiirtoa. Kuten johtuminen se sisältää lämmön diffuusiota yksittäisten molekyylien satunnaisen liikkeen johdosta aineiden välillä, mutta konvektion toinen tärkeä osa on fluidin molekyylien yhteisen liikkeen, eli fluidin virtauksen vaikutus lämmönsiirtoon. Konvektio jaetaan kahteen tyyppiin, jotka ovat pakotettu konvektio ja vapaa konvektio. Pakotettu konvektio kuvaa pakotettua fluidin virtausta jonkin kappaleen yli, kuten jäähdytysratkaisuissa tuulettimet tai nestevirtaus putkissa. Vapaa konvektio tapahtuu luonnollisesti fluidin sisäisten lämpötilaerojen johdosta aiheutuvien nostovoimien mukaisesti. Lämpötilaerot fluidin sisällä aiheuttavat tiheyseroja, jotka johtavat vapaa konvektion virtaukseen fluidissa. Newtonin jäähdytyslaki kuvaa konvektion lämpövirtaa kappaleen ja virtaavan fluidin välillä, jossa h kuvaa konvektiivista lämmönsiirtokerrointa. T_{∞} ja T_S kuvaavat fluidin ja seinämän lämpötiloja (Incropera et. al. 2017 s.6–8).

$$q = hA(T_{\infty} - T_S) \quad (2)$$

Yleisesti konvektiivinen lämmönsiirto on tehokkaampaa nesteillä kuin kaasuilla, joka esitetään konvektiivisten lämmönsiirtokerrointen arvoilla taulukossa (1).

Taulukko 1: Tyypillisiä konvektiivisen lämmönsiirtokerrointen arvoja fluidille. (Incropera et. al. 2017 s.8)

Prosessi	h ($W/m^2 \cdot k$)
Kaasun vapaa konvektio	2 - 25
Kaasun pakotettu konvektio	25 - 250
Nesteen vapaa konvektio	50 - 1000
Nesteen pakotettu konvektio	100 - 20000

Virtaavan fluidin tullessa kontaktiin kappaleen pinnan kanssa syntyy näiden välille fluidissa rajakerros riippuen suureesta. Rajakerroksen kehittyessä sen suuren arvo vaihtelee fluidissa pinnan arvosta fluidin arvoon. Lämmönsiirron kannalta kolme tärkeintä rajakerrosta ovat nopeuden rajakerros, terminen rajakerros, ja tiheyden rajakerros (Incropera et. al. 2017 s.344).

2.3 Säteily

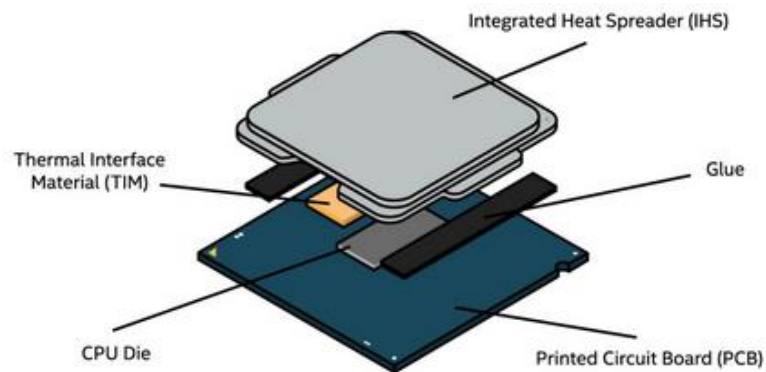
Lämpöenergiaa voi siirtyä aineen emittoimana lämpösäteilynä. Hiukkasten värähtely aiheuttaa elektronien, eli varautuneiden hiukkasten liikettä, josta sähkömagneettisen säteilyn emissio syntyy. Lämpösäteilyssä lähtevän ja vastaanottavan pinnan ominaisuudet ovat suuressa osassa säteilyn lämmönsiirrossa. Pinnan emissiviteetti merkitsee pinnan kykyä lähettää säteilyä, joka vaihtelee 0 ja 1 välillä, jossa 1 kuvaa mustan kappaleen kykyä lähettää säteilytehoa. Stefan Boltzmannin lain (3) mukaisesti Emissiivinen teho voidaan määrittää emissiviteetin ε , Stefan-Boltzmannin vakion σ , sekä säteilevän pinnan lämpötilan mukaan yksikössä (W/m^2) (Incropera et. al. 2017 s.8–9).

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

Pinnan vastaanottamalle lämpöenergia määrälle on vastaava termi absorptio kerroin, joka kuten emissiviteetti saa arvon 0 ja 1 välillä kuvaamaan sen kykyä vastaanottaa säteilyä suhteessa mustaan kappaleeseen. Säteily voi lisäksi heijastua tai läpäistä kappaleen, jolloin lämpösäteily ei absorboidu kappaleeseen. Realistisessa tarkastelussa kappaleiden välillä voi olla lisäksi säteilevää väliainetta.

3 Lämmönsiirron ratkaisut elektronisissa laitteissa

Yleisesti jäähdytys elektronisissa laitteissa keskittyy tärkeimpiin komponentteihin, joiden lämpenemisellä on suurin vaikutus laitteen suorituskykyyn. Yleensä tämä on laitteen CPU (Central Processing Unit) eli prosessori, joka kuumenee suuren työtaakan alla (Intel 2021a). Useimmiten prosessoriin on integroituna näytönohjain puhelimissa, ja mahdollisesti tietokoneissa, joissa ulkoinen näytönohjain voidaan nähdä tarpeettomaksi (Intel 2021b). Prosessorin rakenne esitetään kuvassa (1). Prosessoriin on integroituna kiinni lämpöelementtinä ja suojana toimiva metallinen kansi, joka on kiinnitetty prosessoriin hyvin lämpöä johtavan materiaalin kautta (Intel 2021c).



Kuva 1 Prosessorin rakenne (Intel 2021c)

Komponenttien mitoitus on oleellisessa osassa niiden laitteistoa suunniteltaessa. Prosessori tuottaa huomattavasti enemmän lämpöä, mitä enemmän sillä on kuormitusta, ja tästä kuormituksesta syntyvä hukkalämpö madaltaa laitteen suorituskykyä entisestään (Ogrenci-Memik 2016). Intel (2021c) on implementoinut prosessoreihinsa suoja liikalämpönvaralle,

jossa prosessori madaltaa suorituskykyään pienentääkseen syntyvää lämpötehoa, ja näin olen suojelee prosessoria vahingolta.

Älypuhelimien prosessorin tehon tarve huippukuormalla on tyypillisesti ollut vuonna 2018 3-5 W, ja tämä arvo on jatkuvassa nousussa. Sen saavuttaminen käytössä aiheuttaa toimintakyvyn- ja luotettavuuden heikkenemistä. Prosessorin koko on myös jäädytystä vaikeuttava tekijä rajoitetun lämmönsiirto pinta-alan vuoksi (Tang et. al. 2018). Muita tärkeitä tehokasta jäädytystä vaativia komponentteja on esimerkiksi RAM (Random-Access Memory) eli keskusmuisti ja virtalähde. Keskusmuisti yksikköihin on yleisesti kiinnitetty jäädytysselementti levittämään lämpöä laitteelta, ja Virtalähteeseen on yleensä sisäänrakennettuna oma tuuletin jäädyttämään laitetta (Intel 2021d).

Ylimääräisellä lämmöllä on kaksi tärkeää haittavaikutusta komponenteille, jotka ovat luotettavuus ja suorituskyky. Lämpö voi aiheuttaa piirien komponenttien sisäisiä teknisiä ongelmia, sekä kulumista ja epämuodostumista komponenteissa laajenemisen johdosta. Nämä ongelmat voivat johtaa komponenttien heikentyneeseen toimintaan, tai jopa hajoamiseen. Liika lämpö kasvattaa lisäksi komponenttien kokemaa lämpötilan vaihtelua, jolla on monia haittavaikutuksia komponentista riippuen (Ogrenci-Memik 2016).

Yleisesti lämmönsiirto kompakteissa laitteissa toimii periaatteella, että liika lämpö siirretään kauemmas tärkeiltä komponentilta, josta se pyritään siirtämään ympäristöön, jollain laitteen vaatimusten täyttämällä tavalla, kuten ohuissa älypuhelimissa puhelimen kuorella, rungolla, tai muulla lämmönsiirto järjestelmällä (Samant 2020).

3.1 Älypuhelinien lämmönsiirto

Raja älypuhelimien ja tietokoneitten välillä hälvenee jatkuvasti, kun älypuhelimilta vaaditaan jatkuvasti enemmän suorituskykyä ja ominaisuuksia. Esimerkiksi vaativat mobiilipelit, ja mediakäyttö suuremmilla resoluutiolla ja ruudunpäivitysajoilla vaativat jatkuvasti enemmän suorituskykyä laitteelta, joka johtaa komponenttien suurempaan lämpötehon tuotantoon. Tämä hukkalämpö ja sen vaikutukset laitteen suorituskykyyn ovat nousseet pullonkaulaksi tehokkaampien älypuhelinien suunnittelussa, joten tehokkaampien lämmönsiirto menetelmien kehittäminen on noussut hyvin tärkeään asemaan (Ogrenci-Memik 2016).

Älypuhelimien uniikit vaatimukset nostavat esiin monia ongelmia niiden lämmönsiirrinten suunnittelussa. Nykyajan älypuhelin trendien mukaan niiden täytyy olla mahdollisimman ohuita ollakseen miellyttäviä ulkoasultaan kuluttajalle, mutta tämä tekee esimerkiksi tuuletin järjestelmän asentamisen ohueen älypuhelimeen järkevästi mahdottomaksi. Myöskään mikään järjestelmä, joka pitäisi ääntä voidaan nähdä häiritseväksi kuluttajan kannalta. Vesitiiviys voidaan nähdä kehitettävänä ominaisuutena älypuhelimissa (Clemm et. al. 2020). Puhelimissa ei siis yleensä voi olla minkäänlaista aktiivista ilma virtausta tärkeiden komponenttien yli, jolloin jäähditys usein toteutetaan passiivisella järjestelmällä.

Passiivinen järjestelmä on hyvin oleellinen jäähdityksen tehonkäytön minimoimiseksi, koska tehoa kuluttava aktiivinen järjestelmä vaikuttaisi negatiivisesti laitteen akunkestoon ja energiatehokkuuteen, jonka Carrol & Heiser (2010) ovat todenneet tutkimuksessaan älypuhelimille erittäin tärkeäksi ominaisuudeksi.

Clemm et. al. (2020) mukaan älypuhelimien näytöt kasvavat jatkuvasti. Tämä on hyödynnetty myös niiden jäähdityksessä. Monissa älypuhelimissa on täysin alumiininen runko ja takapaneeli, jotka toimivat jäähdityselementtinä puhelimelle. Näin ollen hyvän lämmönjohtavuuskyvyn omaava takapaneeli toimii lämmönlevittimenä, että laitteen kuori ei kuumenisi vain komponenttien kohdalta, vaan tasaantuisi koko takapaneelin alueelle, joka tehostaisi konvektiota ympäristön kanssa. Tyypillisesti alumiininen takapaneeli ei ole aina kuitenkaan suorassa kontaktissa jäähdytettävien komponenttien kanssa, joten lämmönsiirto tapahtuu säteilemällä ja ilman kautta vapaalla konvektiolla. Tämä tarkoittaa, että systeemin lämmönsiirto ominaisuudet voivat olla jokseenkin heikot, ja rungon käyttö jäähdityselementtinä johtaa sen kuumenemiseen käyttäjän kädessä. Tämä järjestelmä on usein yhdistetty lämpöputkiin, joilla lämpö ensin siirretään pois jäähdytettävältä komponentilta (Samant 2020).

3.2 Tietokoneiden lämmönsiirto

Modernien tietokoneiden prosessorilla voi Intel:n (2021b) mukaan olla jopa 125 W TDP eli ”Thermal Design Power” luokitus, ja kuumenevien sirujen saatavilla oleva lämmönsiirto pinta-ala on hyvin rajoitettu. Näiden yhdistelmä luo tilanteen missä ylimääräinen

hukkalämpö aiheuttaa luotettavuuden ja suorituskyvyn menetystä. Optimaalisen toiminnan takaamiseksi komponenttien tulisi toimia alle 70 °C lämpötiloissa, koska luotettavuus alkaa laskea merkittävästi sen yläpuolella (Liu et. al. 2015). Tämä raja on kuitenkin suositus, ja realistisissa tietokone kokoonpanoissa pyritään monesti alle 85 °C lämpötiloihin.

Westover (2014) mukaan kannettavien tietokoneiden ulkomuoto noudattaa jokseenkin samoja trendejä kuin älypuhelimet. Laitteista halutaan kompakteja mahdollisimman ohuita, ja jopa ammatti käyttöön tarkoitettut laitteet asettavat kompaktin ulkokuoren ja suoritus kyvyn jäähdytys kykyjä oleellisemmaksi. Tämä voi johtaa laitteisiin, joiden suorituskyky menee ohi niiden jäähdytys kyvyistä, johtaen ongelmiin ylikuumenemisen kanssa. Lisäksi jäähdytyslaitteiston kuluminen ja likaantuminen voivat aiheuttaa jäähdytystehon laskemista. Kannettavia tietokoneita löytyy kuitenkin monissa eri koko luokissa, ja suuremmat laitteet avaavat paljon vaihtoehtoja jäähdytys järjestelmälle. Esimerkiksi suuremmat tuuletin järjestelmät ovat mahdollisia, ja ilmaa pystytään ajamaan laitteen läpi laskien sen lämpötilaa muuallakin kuin tärkeimpien komponenttien läheisyydessä. Aktiivisilla tuuletin järjestelmällä lämpötilaero komponenttien ja kotelon sisätilan välillä saadaan korkeammaksi. Jäähdytyksen pääperiaatteet eivät kuitenkaan muutu, ja lämpö ajetaan edelleen yleisesti lämpöputkilla tai jäähdytyselementillä kauemmas jäähdyttävästä komponentista, josta se siirretään ympäristöön (Intel 2021c).

Tietokoneissa käytetään myös nestejäähdytysjärjestelmiä, joissa hukkalämpö siirretään suuren lämpökapasiteetin omaavaan kiertoaineeseen, jota pyritään jäähdyttämään ja kierrättämään takaisin komponentille. Tietokoneissa on usein verkkovirtaan kiinnitetyt virtalähteet, jolloin aktiiviset järjestelmät eivät vaikuta negatiivisesti akunkestoon kuten kannettavissa laitteissa. Yleisti jäähdytin kiinnitetään prosessoriin metallisen vastinpalan kautta, joka nähdään kuvassa (2). Jäähdytimen vastinpalan ja prosessoriin integroidun jäähdytyselementin väliin lisätään yleisesti jäähdytystahnaa minimoimaan kontaktivastusta näiden välillä (Intel 2021a).



Kuva 2 Yleinen prosessorin jäähdytyslaitteelle tarkoitettu kiinnitysjärjestelmä (Noctua 2021a)

4 Lämmönsiirintyypit ja jäähdytinlaitteet

Elektroniikan jäähdytys järjestelmissä käytetään monia erilaisia lämmönsiirtimiä, ja niiden yhdistelmiä. Yleisesti rajoittunut tila ja laitteen akun koko antavat rajoitteet mahdollisille jäähdyttimille. Yleensä ainoastaan laitteen tärkeimmille komponenteille, joille hukkalämpö voi aiheuttaa kriittistä suorituskyvyn ja luotettavuuden laskua käytetään jäähdytyslementtiä tehokkaampaa lämmönsiirrin ratkaisua. Vähemmän tärkeille komponenteille yleinen ilma-virtaus laitteiston yli auttaa madaltamaan laitteen sisäistä lämpötilaa tehostaen lämmönsiirtoa (Intel 2021d).

Yleisesti lämmönsiirrin ja jäähdytin ratkaisut jaetaan passiivisiin ja aktiivisiin järjestelmiin. Passiiviset järjestelmät eivät vaadi, ulkoista tehonlähdettä toimintaansa, kun taas aktiivisessa järjestelmässä on tehoa vaativia komponentteja, kuten sähköisiä tuulettimia tai pumppuja. Luonnollisesti aktiiviset järjestelmät ovat yleisesti tehokkaampia, kuin passiiviset järjestelmät, mutta tehontarpeella voi olla negatiivisia vaikutuksia esimerkiksi akkukäyttöisen elektronisten laitteiden ratkaisuissa akunkestoon, kun passiivinen järjestelmä olisi riittävän tehokas tyydyttävään toteutukseen (Murshed & Castro 2017). Aktiiviset järjestelmät ovat myös yleensä äänekkäämpiä kuin passiiviset järjestelmät, ja ne voivat aiheuttaa häiritsevää tärinää laitteelle (Intel 2021c).

4.1 Jäähdytyslementti

Jäähdytyslementti on yleinen termi jäähdytettävään laitteeseen liitettävästä korkean lämpökapasiteetin ja lämmönjohtavuuskyvyn omaavasta laitteesta, jonka päätarkoitus on ottaa lämpöä vastaan johtumalla ja levittää se tehokkaasti kauemmas jäähdytettävältä komponentilta (Samant 2020). Jäähdytyslementit lisäksi laajentavat jäähdytettävää pinta-alaa, jolloin konvektiivinen lämmönsiirto tehostuu.

Järjestelmä on erittäin kustannustehokas, yksinkertainen, ja luotettava, mutta sen kyky jäähdyttää ei sovellu vaativimpiin elektroniikan jäähdytys ratkaisuihin (Robinson 2009).

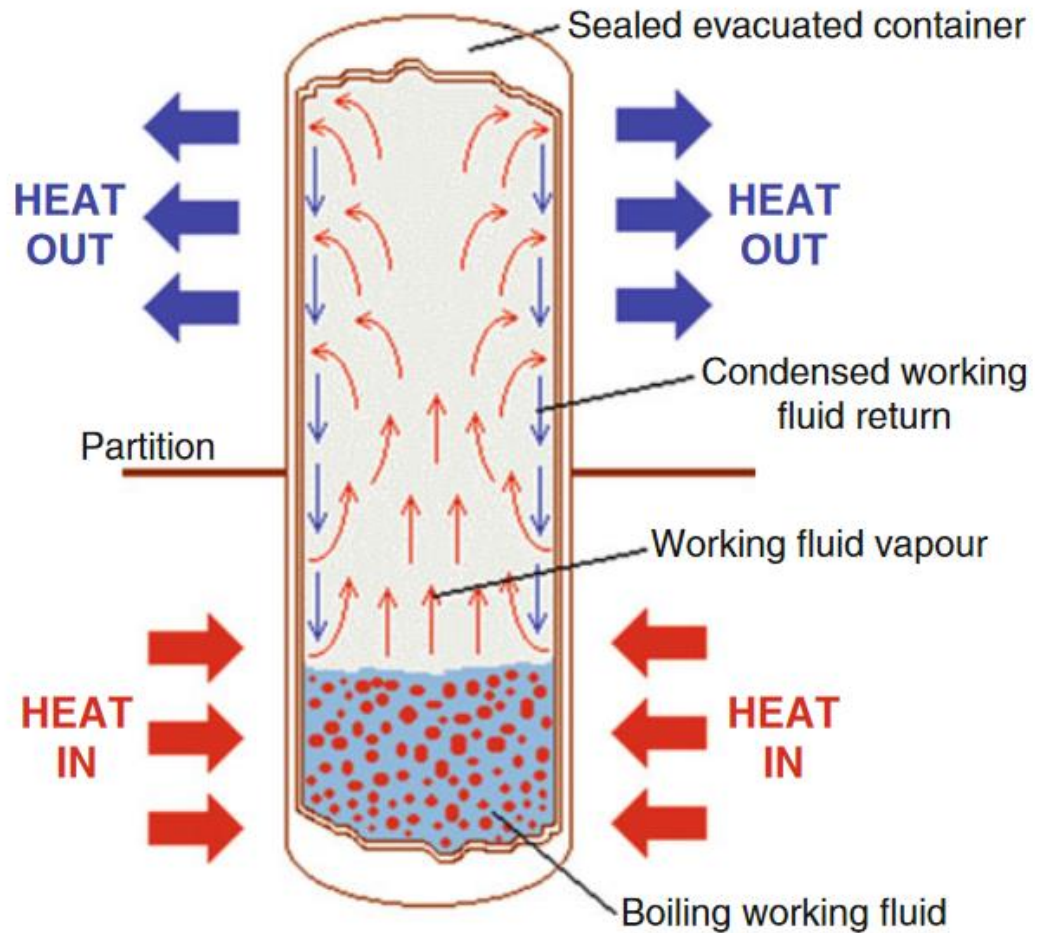
Perinteisten jäähdytyslementtien konvektiivinen lämmönsiirto toimii yleisesti ilman avulla, joka on yleisesti vähemmän tehokasta kuin nesteen konvektio kuten esitettynä taulukossa (1), ja tällöin ei pystytä myöskään hyödyntämään kehittyvää kylmäaine teknologiaa lämmönsiirron tehostamiseen.

Yleisesti elementit valmistetaan metalleista, kuten kuparista tai alumiinista, näiden hyvien lämmönjohtavuus kykyjen ja ekonomisuuden johdosta, mutta myös monia epämetalleja ratkaisuja kuten hiilikuitulevyjä on käytetty (Tang et. al. 2018). Jäähdytyslementtien tehokkuus laitteissa riippuu saatavilla olevasta konvektiivisesta virtauksesta, ja usein ilmatiiviissä puhelimissa, se on hyvin rajoitettua. Näin ollen niiden toiminta voi olla rajoitettu lämmönlevittämiseen, eikä niinkään ripa rakenteella toimivaan konvektiivisen lämmönsiirron jäähdyttimeen.

4.2 Lämpöputki

Lämpöputki on passiivinen lämmönsiirrin, jossa työneste liikkuu kapillaari ilmiöllä suljetussa kierrossa. Kierro on kaksifaasinen, jolloin neste höyrystyessään ja tiivistyessään siirtäen lämpöenergiaa kauemmas kuumenevalta komponentilta. Kapillaari-ilmiön voimat syntyvät luonnollisesti lämmönsiirtoprosessista kapillaarirakenteen avulla, joka on liitettynä putken sisäpintaan. Tämä tekee järjestelmästä täysin passiivisen. Lämpöputken rakenne koostuu yksinkertaisesti ilmatiiviistä putkesta, joka jaetaan höyrystimeen, lauhduttimeen (Zohuri 2016 s.4).

Lämpöputken kierrossa kiertoaine höyrystyy höyrystimellä, ja lähtee putken lauhdutin osioon adiabaattisen osion läpi tiivistymään takaisin nesteeksi siirtäen lämpöä putken ulkokuoren kautta ympäristöön. Lauhduttimessa kylmäaineen tiivistyessä takaisin nesteeksi fluidi siirtyy kapillaarirakenteen uriin, joiden avulla se siirtyy takaisin höyrystimelle adiabaattisen osion kautta (Zohuri 2016 s.5–7). Lämpöputken rakenne ja toiminta esitetään kuvassa (3).

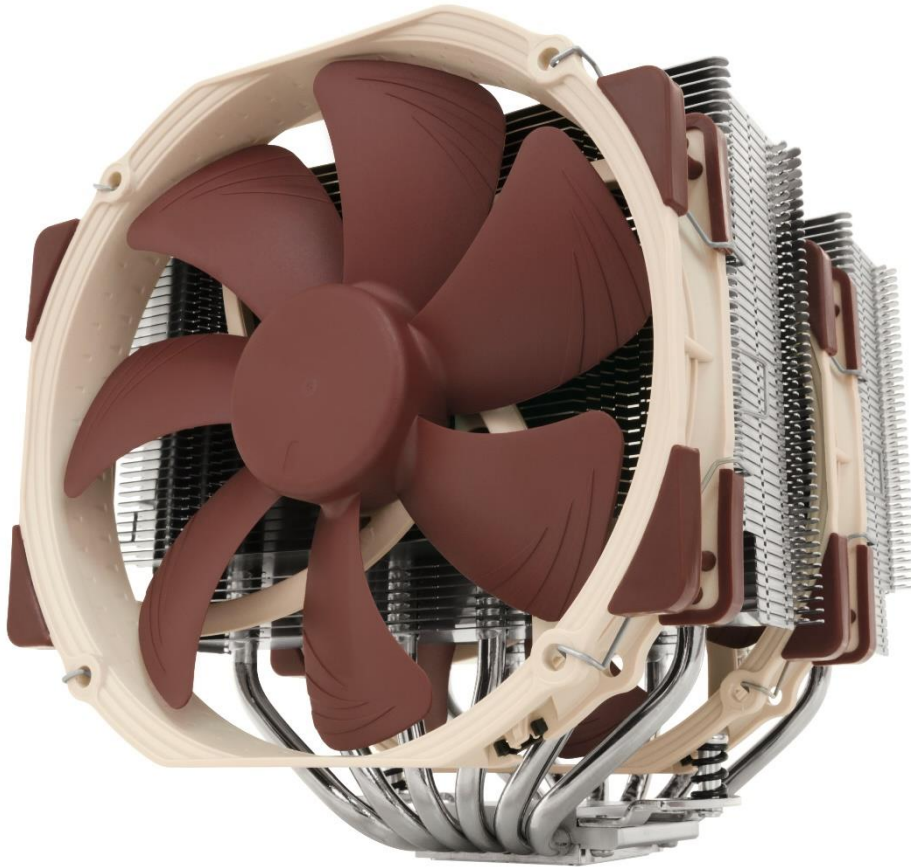


Kuva 3. Lämpöputken toiminta (Zohuri 2016 s.18)

Lämpöputki on yleisesti käytössä oleva jäähdytysjärjestelmiä elektronisissa laitteissa sen monien sopivien ominaisuuksien myötä. Lämpöputki on täysin passiivinen ja kompakti lämmönsiirrin. Jäähdytys laitteen toiminta täytyy olla tehokasta missä tahansa laitteen orientaatioissa, johon lämpöputki hyvin suunnitellulla kapillaari rakenteella pystyy (Yosefi et. al. 2013). On kuitenkin hyvä huomioida, että normaaleissa lämpöputki rakenteissa painovoiman tulisi olla prosessin nestekierron mukainen maksimaalisen lämmönsiirron saavuttamiseksi. Painovoiman negatiivista vaikutusta voidaan kuitenkin minimoida eri rakenteilla (Zohuri et. al. s.23).

Pääosin lämpöputken tehtävä älypuhelimien jäähdytyksessä on siirtää hukkalämpö pois prosessorilta ympäristöön. Lämpöputket voivat olla rivoitettu lämmönsiirtopinta-alan kasvattamiseksi tila rajoitteiden puitteissa. Erityisesti tietokoneiden ja kookkaampien laitteiden jäähdytyksessä lämpöputki on liitettynä jäähdytysiili kokonaisuuteen kuten kuvassa (4), jota

voidaan pakotetun konvektion avulla jäähdyttää suuren lämmönsiirto pinta-alan johdosta erittäin tehokkaasti.



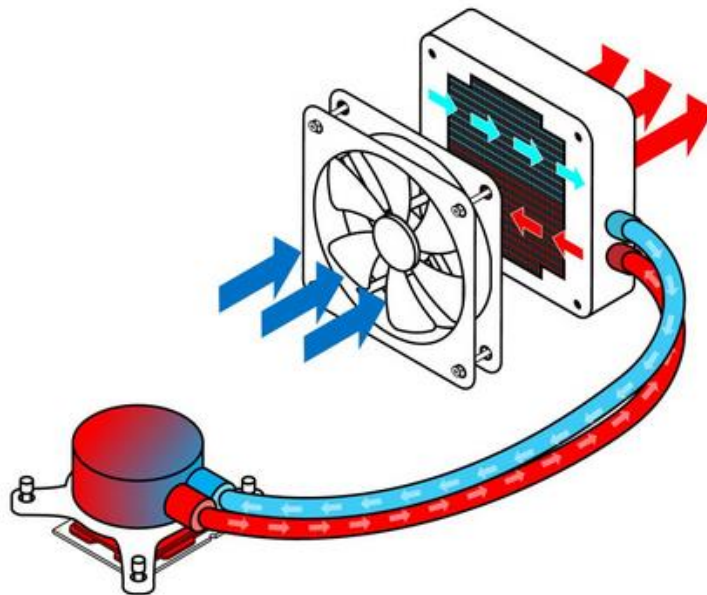
Kuva 4. Prosessorin jäähdytykseen tarkoitettu jäähdytysiili (Noctua 2021b)

Älypuhelinien muuttuessa yhä kompaktimmiksi perinteiset sylinterimäiset mikrolämpöputket eivät enää pysty täyttämään vaativimpien mobiililaitteiden asettamia koko vaatimuksia. UTHP (Ultra thin heat pipe) teknologia mahdollistaisi entistä ohuempien lämpöputkien suunnittelun. Ohuissa lämpöputkissa tulee ongelmaksi kapillaarirakenteen kyky tehokkaasti kierrättää fluidia laitteessa. UTHP määritellään alle 2 mm paksuna lämpöputkena, joka siis soveltuu erityisen hyvin pienten elektronisten laitteiden sovelluksiin (Tang et. al. 2018). Aoki et. al. (2010) tutkimuksen mukaisesti kannettaviin tietokoneisiin, joiden maksimi teho jää noin 20 W putkien paksuus voi olla 1 mm laitteen asennosta riippuen, ja mobiililaitteisiin ja muihin noin 5 W maksimitehon sovelluksiin putket voivat olla jopa 0.7 mm paksuja. Tämä tekee UTHP ratkaisusta erittäin lupaavia elektroniikan jäähdytykseen kompakteissa käyttö-tarkoituksissa kuten älypuhelimissa, sekä kannettavissa tietokoneissa. Ohuita lämpöputkia

voidaan käyttää monilla lämpöputkirakenteilla, kuten silmukkarakenteisina tai levyrakenteisina (Li et.al. 2019).

4.3 Nestejäähdytysjärjestelmä

Neste jäähdytys järjestelmä on yleisesti tietokoneissa käytössä oleva tehokas jäähdytys järjestelmä, joka koostuu blokista, pumpusta, putkistosta, jäähdyttimestä, ja nestesäiliöstä. Yleisesti jäähdyttimiin on lisätty tuulettimia konvektiivisen lämmönsiirron tehostamiseksi ympäristön kanssa (Robinson 2009). Nestejäähdytys tietokoneessa on yleisesti toteutettu epäsuorasti blokissa olevan vastinkappaleen kautta, joka on yleensä valmistettu korkean lämmönjohtavuuden omaavasta metallista, joka on kiinnitetty jäähdytystahnan kanssa komponenttiin (Intel 2021a). Yleinen prosessorin jäähdytykseen käytettävän nestejäähdytysjärjestelmän rakenne on esitettyä kuvassa (5).



Kuva 5. Nestejäähdytysjärjestelmän rakenne. (Intel 2021c)

Järjestelmän toiminta on riippuvainen jäähdyttimen koosta ja tehokkuudesta, mutta jäähdytin voidaan putkiston avulla asentaa kauemmas kuumenevalta komponentilta, jolloin tilan tarve komponentin välittömässä läheisyydessä on suhteellisen pieni, kuten näemme kuvassa (5). Tämä on kuitenkin silti liikaa tilaa kompakteimpiin ratkaisuihin, kuten älypuhelimiin, ja aktiivinen tuuletinjärjestelmä tuottaa ääntä, ja kuluttaa laitteen akkua.

Elektroniikan käyttötarkoituksessa nestejäähdytyksen käyttö voi aiheuttaa riskejä ongelmien, kuten vuotojen kanssa, sillä monen yleisen kylmäaineen kuten veden pääsy kosketuksiin komponenttien kanssa voi aiheuttaa kriittistä vahinkoa (Mohapatra 2006).

Nestejäähdytys järjestelmä voidaan toteuttaa, joko epäsuorasti kylmälevyn kautta tai suoraan jäähdytettävälle pinnalle. Suihkuilla jäähdyttäminen on todettu tehokkaammaksi, kuin perinteinen epäsuora nestejäähdytys, mutta sen ylläpitäminen myös vie enemmän tehoa. Yleisesti suihkutusta toteutetaan monen suuttimen muodostelmalla. Monella suuttimella virtauksen aiheuttama konvektiivinen lämmönsiirto tapahtuu tasaisemmin koko pinta-alalle, kuin yhden suihkun ratkaisussa (Sung & Mudawar 2008).

Immersiojäähdytys on toinen suoran nestejäähdytyksen muoto, jossa laitteisto upotetaan dielektriseen kylmäaineeseen, joka omaa ilmaan verrattuna tehokkaamman lämmönjohtavuuskyvyn sekä lämpökapasiteetin (Popescu & Panaite 2009). Ratkaisulla pystytään tehokkaasti jäähdyttämään laitteiston ympäristöä ja vähemmän kriittisiä komponentteja, mutta yleisesti ratkaisu on kallis ja vie tilaa. Ratkaisua onkin yleisimmin käytetty serveri ratkaisussa, joissa laitteisto on oikeastaan koko käyttöikänsä stationäärinenä.

4.4 Lämpösähköinen-ilmiö ja siihen perustuvat jäähdyttimet.

Lämpösähköiseen-ilmiöön perustuvat lämmönsiirtimet ovat yksinkertaisia laitteita, joiden toiminta perustuu lämpösähköiseen ilmiöön, jossa sarjassa kytkettyjen p- ja n-tyyppisten puolijohteiden välille muodostetaan jännite-ero, joka luo virran suunnan mukaisesti puolijohteiden välillä oleville kuumalle ja kylmälle puolelle lämpötilaeron. Järjestelmän kuumalla puolella voi olla asennettuna yleensä jonkinlainen jäähdytys-elementti, mutta sen toiminta voidaan yhdistää muihinkin lämmönsiirtimiin lisä tehon saavuttamiseksi (Liu et. al. 2015).

Järjestelmässä ei ole liikkuvia osia, joka tekee siitä luotettavan ja hiljaisen ratkaisun, joka soveltuu moneen elektroniikan sovellukseen. Lämpösähköiseen ilmiöön ei liity potentiaalisti ympäristölle haitallisia kiertoaineita, joten se nähdään ympäristöystävällisempänä jäähdytys muotona, kuin mahdollisesti ympäristölle haitallisia perinteisiä kylmäaineita hyödyntävät ratkaisut. mutta se ei myöskään pysty hyötymään kylmäaineteknologian kehitystä yksinään (Liu et. al. 2015).

4.5 TEG

TEG eli "Thermal Electric Generation" tai suomeksi lämpösähköinen sähköntuotanto on järjestelmä, jossa hukkalämpöä voidaan hyödyntää lämpösähköisellä-ilmiöllä. Järjestelmä pystyy kuumenevan komponentin lämmöstä tuottamaan omaan jäähdytykseensä tarvittavan sähköön, joka yhdistettynä johonkin aktiiviseen ratkaisuun luo autonomisen jäähdytysjärjestelmän, joka ei tarvitse ulkoista virtalähdettä toimintaansa. Järjestelmän autonomisuus ja ympäristöystävällisyys tekevät siitä erittäin lupaavan, kun samalla pystytään käyttämään hyväksi aktiivisia jäähdytys ratkaisuja (Kiflemariam & Lin 2015).

TEG on kehittyvä teknologia, mutta tutkimukset ovat osoittaneet, että TEG sähköntuotannolla kuumenevasta komponentista pystytään ajamaan esimerkiksi mikrokanava jäähdytys-elementtiä tai tuuletinta, joista jälkimmäinen voidaan yhdistää moneen passiiviseen järjestelmään lisätehon saavuttamiseksi. TEG tuottaa sähköä perustuen lämpötilaeroon, joten optimaalinen toiminta vaatii mahdollisimman tehokkaan viilennyksen komponentin vastaiselle puolelle, että lämpötilaero pystyy ajamaan jäähdytintä (Martínez et. al. 2011).

4.6 Mikrokanava jäähdytin

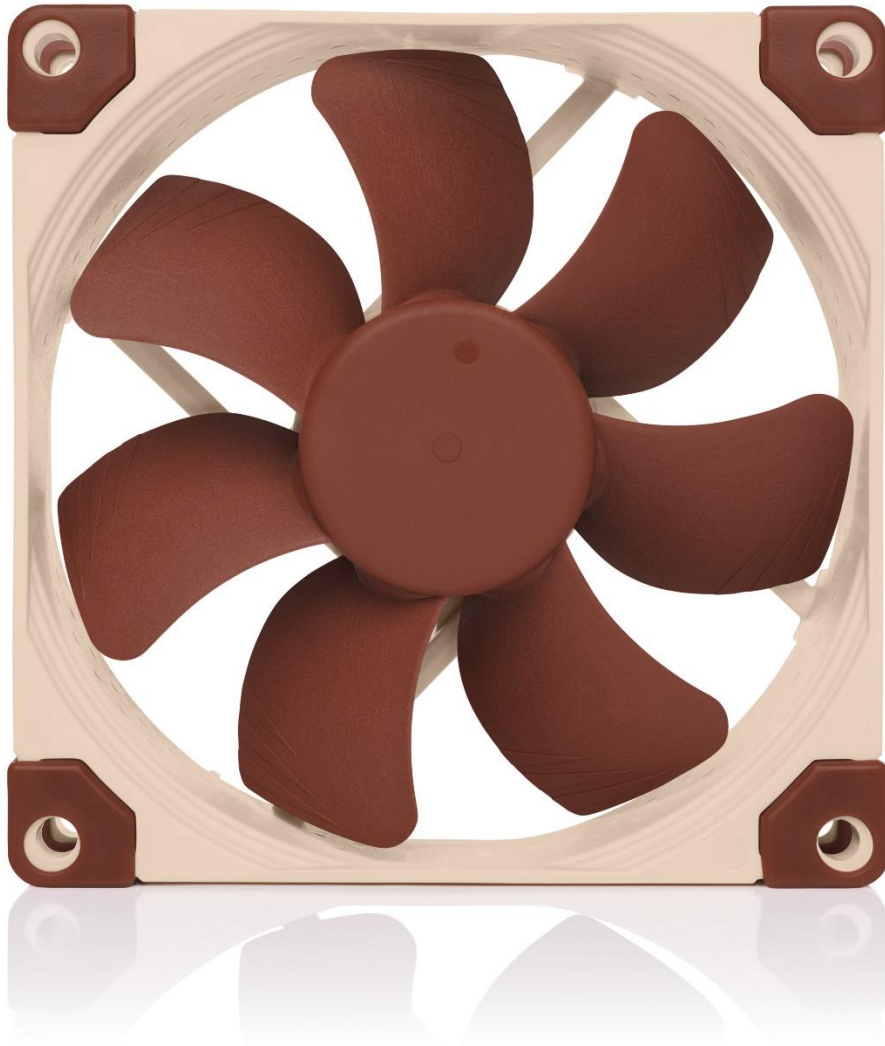
Mikrokanava jäähdytys-elementeissä fluidia ajetaan läpi erittäin pienistä kanavista, jotka saattavat olla esimerkiksi vain 50 mikrometriä leveitä ja 300 mikrometriä korkeita (Murshed & Castro 2017). Pääosin työnesteenä perinteisesti toimii ilma tai vesi, mutta monia kehittyviä moderneja kylmäaine ratkaisuja on tutkittu (Chein & Huang 2005). On kuitenkin hyvä

huomioida esimerkiksi nanofluidien, tai muiden kylmäaineiden mahdolliset heikot virtausominaisuudet korostuvat pienissä kanavissa, jolloin lämmönsiirron määrä suhteessa vaadittuun pumppaus tehoon saattaa pienentyä (Bahiraei & Heshmatian 2018).

Tämä pakotettu nestejäähdytys muoto on tehokas ja kompakti kooltaan, joka tekee siitä lupaavan vaihtoehdon modernille elektroniikalle. Erityisesti sen tehokkuus pienellä pinta-alalla tekee siitä lupaavan vaihtoehdon elektroniikan jäähdytys järjestelmiin (Chein & Huang 2005). Mikrokanava jäähdytin voidaan asentaa suoraan kiinni jäähdytettävään komponenttiin kuten mikroprosessoriin, jossa se on kompaktimpi, kuin perinteinen jäähdytyslementti, ja soveltuu todella vaativiin käyttötarkoituksiin älypuhelin ja tietokone ratkaisuisissa.

4.7 Tuulettimet ja pumput

Tuulettimia ja pumppuja käytetään elektroniikan jäähdytys ratkaisuisissa pakotetun konvektion luomiseksi. Tuulettimia käytetään usein liitettynä rivoitettuun jäähdytyslementtiin, jonka laajennetun lämmönsiirtopinta-alan kanssa yhdistettynä tuulettimen pakotettu konvektio tuottaa aktiivisen ratkaisun (Popescu & Panaite 2009). Tuulettimia käytetään yleisesti laitteiden ilmanvaihdossa, että ilma laitteen sisällä ei jää kiertämään, vaan vaihtuu uuteen viileämpään ilmaan, että lämpötilaero laitteen ja ympäristön välillä pysyy mahdollisimman suurena. Tietokoneisiin suunniteltu tuuletin malli on esitettynä kuvassa (6).



Kuva 6 Tietokoneiden jäähdytykseen suunniteltu 12 mm tuuletin (Noctua 2021c)

Nämä toimintaperiaatteet voidaan validoida konvektiivisen lämmönsiirron kaavasta (2), josta voidaan todeta, että konvektiiviseen lämmönsiirtoon vaikuttavia tekijöitä on lämpötilaero ympäristön välillä. Lisäksi virtauksen kasvaessa konvektiivinen lämmönsiirto pinnan ja fluidin välillä tehostuu. On kuitenkin hyvä huomioida virtauksen lämmönsiirron heikkeneminen tulevilla komponenteilla, kun edeltävät komponentit ovat jo luovuttaneet lämpöä virtaukseen (Ogrenci-Memik 2016).

Pumput ajavat tuulettimien asemaa nestejäähdytys ratkaisuihin, joissa ne luovat pakotettua konvektiota fluidin virtauksella, sekä siirtävät kiertoainetta tehokkaasti prosessin eri pisteiden välillä. Aktiivisissa nestejäähdytysratkaisuihin pumppaamisteho on yleisesti jäähdytysprosessin tehoa kuluttava osa, ja saatu jäähdytysteho on syytä suhteuttaa pumpun kulutukseen.

5 Kylmäaineet

Elektronisten laitteiden jäähdytys ratkaisua suunniteltaessa oikean kylmäaineen valinta on prosessin tehokkuuden kannalta olennaista. Kylmäaineelta vaaditaan optimaalisen toiminnan halutuissa olosuhteissa lisäksi monia ominaisuuksia takaamaan laitteen pitkäaikainen luotettava toiminta (Murshed 2016).

Tehokkuuden kannalta tärkeimpänä ominaisuutena voidaan nähdä kylmäaineen termiset ominaisuudet, kuten hyvä lämmönjohtavuus kyky tai korkea höyrystymislämpö, jos prosessi käyttää hyväksi kaksifaasista virtausta lämmönsiirtoon (Popescu & Panaite 2009). Aineen täytyy käyttäytyä stabiilisti altistettuna lämpötilavaihtelulle, jotta kiertoaine käyttäytyy oikein prosessin eri osissa, ja ei näin ollen tuota ongelmia kierrolle. Kylmäaineen kiehumis- ja jäätympisteiden täytyy olla tarpeeksi kaukana lämpötiloista, joille laite altistuu ei-haluttujen faasimuutosten välttämiseksi, jotka voisivat riskeerata koko laitteen toiminnan. On kuitenkin hyvä huomioda, että suljetut kierrot voivat tapahtua eri paineissa. Kylmäaineen viskositeetin on oltava riittävän matala ja tasainen, että aineen kierrossa tai pumppaamisessa ei synny ongelmia, tai tarpeetonta lisätehon tarvetta (Mohapatra 2006).

Vesi on yleisesti käytetyin kylmäaine sen saatavuuden, lämmönjohtavuuskyvyn, sekä lämpökapasiteetin johdosta (Murshed & Castro 2017). Vesipohjaiset kylmäaineet eivät kuitenkaan yleisesti sovi suljetun kierron jäähdytysratkaisuihin sen korkean jäätympisteensä johdosta (Mohapatra 2006). Jäätyessään vesi laajenee aiheuttaen vahinkoa jäähdyttimelle, ja potentiaalisesti jäähdytettävälle komponentille. Vesi ei myöskään ole dielektrinen kylmäaine, joten vahinko sen tullessa kontaktiin komponentin kanssa voi olla kriittinen. Yleisesti Dielektriset kylmäaineet omaavat huonommat termiset ominaisuudet, kuin ei-dielektriset

vaihtoehdot, mutta näitä on yleisesti käytössä, kuten fluorihiiilevedyt tai silikonipohjaiset kylmäaineet (Murshed & Castro 2017).

5.1 Nanofluidit

Nanofluidit ovat kehittyvän teknologian kylmäainetyyppi, jossa perinteisten kylmäaineiden joukkoon sekoitetaan nanopartikkeleita tehostamaan aineen lämmönjohtavuus kykyä. Nanopartikkelit ovat yleisesti kooltaan alle 100 nanometrin luokkaa (Colangelo et. al. 2017), ja partikkeleiden pieni koko on oleellista monien ongelmien välttämiseksi. Liian suuret hiukkaset saattaisivat aiheuttaa kertymiä ja virtausongelmia, ja nanopartikkelit tarpeeksi pienen kokonsa tähden välttävät kyseiset ongelmat (Chein & Huang 2005). Kun heterogeenisessä seoksessa on liikaa nanopartikkeleita alkaa syntyä ongelmia viskositeetin, kertymien ja ylimääräisen tehontarpeen virtauksen ylläpitämiseksi kautta (Arshad & Ali 2017). Tämä on erityisen ongelmallista passiivisissa ratkaisuisissa, kuten lämpöputkissa, jossa heikentyneitä virtausominaisuuksia on vaikea kompensoida, mutta tutkimuksissa on todettu, että pienikin määrä nanopartikkeleita tehostaa seoksen lämmönjohtavuutta huomattavasti. Nanofluidien tehokkuutta perinteisiin kylmäaineisiin nähden on tutkittu jo yli kaksi vuosikymmentä, ja nanopartikkeleiden positiiviset vaikutukset voivat olla merkittäviä (Sun & Liu 2017). Esimerkiksi Yousefi et. Al (2013) tutkimuksessa 25 W tehon alla nanofluidi ratkaisu tuotti jopa 22 % vähennyksen termiseen vastukseen prosessorin jäähdytin järjestelmässä, kun Al_2O_3 -vesi seosta käytettiin lämpöputken kiertoaineena eri kallistuskulmissa.

Alirezae et. al. (2018) mukaan nanopartikkeleiden valmistaminen on kallis prosessi, joka tekee nanofluidien ekonomisesta kannattavuudesta kyseenalaista, mutta matalan konsentraation nanofluidit voisivat olla teknisesti ja ekonomisesti perusteltuja elektroniikassa sirujen ja laitteiston kehityksen myötä.

YHTEENVETO

Elektroniikan jäähdytys tulee olemaan suurempi ongelma tulevaisuudessa, kun teknologia kehittyy entisestään. Yksinkertaiset ilmajäähdytteiset jäähdytys-elementit ovat todettu, jo tässä vaiheessa riittämättömiksi tehokkaasti viilentämään tehokkaita komponentteja, ja komponenttien teho on noussut tasolle, jossa ne voivat aiheuttaa vahingollisen määrän hukkalämpöä, ellei sitä asianmukaisesti käsitellä. Jäähdytyslaitteiston tehostuminen on pakollista vastaamaan nousevaa tehontarvetta, ja sen täytyy tapahtua pääosin prosessin tehokkuuden parantamisella, ja pyrkiä välttämään elektronisen laitteen käyttökokemusta heikentävien muutosten, kuten, äänen, koon, tai vastaavien ominaisuuksien implementointia. Akkuteknologian ja mahdollisen TEG teknologian kehittäminen tekee aktiivisista tehoa kuluttavista ratkaisuihin kannattavampia, mutta laitesuunnittelun trendit tekevät niiden implementoinnista vaikeaa tulevaisuudessakin, koska akunkesto ja energiatehokkuus tulee olemaan tärkeä ominaisuus.

Neste pohjaisten jäähdytysjärjestelmien asema tulee kehittymään laitteiden tarpeiden mukana, kun ilma ei sen lämmönsiirto-ominaisuuksien johdosta enää sovellu tehokkaampiin käyttötarkoituksiin. Nanofliidit tulevat todennäköisesti kehittymään entistä tärkeämpään asemaan, kun laitteistosta halutaan entistä enemmän tehoa samassa mittakaavassa, ja kustannustehokkaiden ja virtausominaisuuksiltaan optimaalisten kylmäaineiden kehittäminen jatkuu.

Erityisen lupaavaksi lämmönsiirrin ratkaisuksi älypuhelimissa voidaan nimetä ohut lämpöputki teknologia, joka pystyy toimimaan tehokkaasti, ja vastaamaan jatkuvasti kompaktimpiin koko rajoitteisiin laitteissa. Passiivisena ja kompaktina järjestelmänä lämpöputki täyttää hyvin kompaktien elektronisten laitteiden kehityksen asettamat vaatimukset.

Lähteet

Arshad, W. & Ali, H. M. (2017) Graphene nanoplatelets nanofluids thermal and hydrodynamic performance on integral fin heat sink. *International journal of heat and mass transfer*, 2017-04, Vol.107, p.995-1001 [Artikkeli]. [Viitattu 22.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931016321573>

Aoki, H. et al. (2010) Development of ultra thin plate-type heat pipe with less than 1 mm thickness, 2010 26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM), 2010-02, p.217-222. [Viitattu 20.7.2021]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5444289>

Alirezaie, A. et al. (2018) Do nanofluids affect the future of heat transfer? 'A benchmark study on the efficiency of nanofluids'. *Energy (Oxford)*. [Online] 157979–989. [Viitattu 31.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218308806>

Sung, M.K. & Mudawar, I. (2008) Single-phase and two-phase hybrid cooling schemes for high-heat-flux thermal management of defense electronics, in 2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2008-05, p.121-131. [Viitattu 12.8.2021]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4544262>

Bahiraie, M. & Heshmatian, S. (2018) Electronics cooling with nanofluids: A critical review. *Energy conversion and management*, 2018-09-15, Vol.172, p.438-456 [Artikkeli]. [Viitattu 30.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418307829>

Li, J. et al. (2019) Mechanism of a microscale flat plate heat pipe with extremely high nominal thermal conductivity for cooling high-end smartphone chips. Energy conversion and management, 2019-12-01, Vol.201, p.11220 [Artikkeli]. [Viitattu 20.7.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890419312087>

Zohuri, B. (2016) Heat Pipe Design and Technology Modern Applications for Practical Thermal Management. 2nd ed. 2016. Cham: Springer International Publishing.

Tang, H. et al. (2018) Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling. Applied energy, 2018-08-01, Vol.223, p.383-400 [artikkeli]. [Viitattu 18.7.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918306202>

Murshed, S.M.S. (2016). Electronics Cooling, IntechOpen, DOI: 10.5772/63321. [Viitattu 25.7.2021]. Saatavissaa: <https://www.intechopen.com/books/5150>

Murshed, S.M.S. & Nieto de Castro, C. (2017) A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. Renewable & sustainable energy reviews , 2017-10, Vol.78 (C), p.821-833 [Artikkeli]. [Viitattu 25.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117305944>

Popescu, A. & Panaite, E.C. (2009) An Overview of Advanced Electronics, Bulletin of the Transilvania University of Braşov • Vol. 2 (51) - 2009 • Series I [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.8.2021]. Saatavissa: <http://aspeckt.unitbv.ro/jspui/bitstream/123456789/1322/1/Popescu.pdf>

Mohapatra, S.C. (2006) An Overview of Liquid Coolants for Electronics Cooling, Electronics Cooling [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.8.2021]. Saatavissa: <https://www.electronics-cooling.com/2006/05/an-overview-of-liquid-coolants-for-electronics-cooling/>

Samant, A. (2020) Precision-Clad Composite Materials for Heat Spreaders in Handheld Electronics, Electronics Cooling [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.8.2021]. Saatavissa: <https://www.electronics-cooling.com/2020/11/precision-clad-composite-materials-for-heat-spreaders-in-handheld-electronics/>

Yousefi, T. et al. (2013) Experimental investigation on the performance of CPU coolers: Effect of heat pipe inclination angle and the use of nanofluids. Microelectronics and reliability, 2013-12, Vol.53 (12), p.1954-1961 [Artikkeli]. [Viitattu 23.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026271413001649>

Colangelo, G. et al. (2017) Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution. Applied thermal engineering, 2017-12-25, Vol.127, p.421-435 [Artikkeli]. [Viitattu 24.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431117319555>

Chein, R. & Huang, G. (2005) Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. Applied thermal engineering, 2005, Vol.25 (17), p.3104-3114 [Artikkeli]. [Viitattu 20.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431105001006>

Ogrenci-Memik, S. (2016) 'Heat in Integrated Circuits and Systems', in Heat Management in Integrated Circuits - On-Chip and System-Level Monitoring and Cooling. Institution of Engineering and Technology. pp. 1–2.

Li, Y. et al. (2015) Investigation of ultra-thin flattened heat pipes with sintered wick structure. Applied thermal engineering, 2015-07-05, Vol.86, p.106-118 [Artikkeli]. [Viitattu 17.7.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431115003580>

Robinson, A. (2009) A Thermal-Hydraulic Comparison of Liquid Microchannel and Impinging Liquid Jet Array Heat Sinks for High-Power Electronics Cooling. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2009-06, Vol.32 (2), p.347-357 [Artikkeli]. [Viitattu 12.8.2018]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4801567>

Kiflemariam, R. & Lin, C.-X. (2015) Numerical simulation of integrated liquid cooling and thermoelectric generation for self-cooling of electronic devices. International journal of thermal sciences, 2015-08-01, Vol.94, p.193-203 [Artikkeli]. [Viitattu 12.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072915000708>

Carrol, A. & Heiser, G. (2010) An Analysis of Power Consumption in a Smartphone, USENIX Annual Technical Conference, June 23-25 2010, Boston MA USA. [Viitattu 8.8.2021]. Saatavissa: <https://www.usenix.org/conference/usenix-atc-10/analysis-power-consumption-smartphone>

Westover, B., (2014) 7 Important Trends in Laptop Design, PCMag, [Viitattu 29.8.2021]. Saatavissa: <https://www.pcmag.com/news/7-important-trends-in-laptop-design>

Clemm, C. et.al. (2020) Market Trends in Smartphone Design and Reliability Testing, Electronics Goes Green 2020, September 2020, Berlin, Germany [Viitattu 29.8.2021]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/344337423_Market_Trends_in_Smartphone_Design_and_Reliability_Testing

Liu, D. et al. (2015) Thermoelectric mini cooler coupled with micro thermosiphon for CPU cooling system. *Energy (Oxford)*, 2015-04-01, Vol.83, p.29-36 [Artikkeli]. [Viitattu 12.2.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421500122X>

Sun, B. & Liu, H. (2017) Flow and heat transfer characteristics of nanofluids in a liquid-cooled CPU heat radiator. *Applied thermal engineering*, 2017-03-25, Vol.115, p.435-443 [Artikkeli]. [Viitattu 21.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135943111634368X>

Martínez, A. et al. (2011) Experimental and analytical study on thermoelectric self cooling of devices. *Energy (Oxford)*, Vol.36 (8), p.5250-5260. [Artikkeli]. [Viitattu 11.8.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544211004142>

Incropera, F.P., et. al. (2017) *Fundamentals of heat and mass transfer*, 8th edition, John Wiley & Sons, 2017. ISBN 978-1-119-38291-1

Intel, (n. 2021a), How to Apply Thermal Paste and How It Works, [Verkkosivu] [Viitattu 28.8.2021]. Saatavissa: <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/how-to-apply-thermal-paste.html>

Intel, (n. 2021b), Intel® Core™ i7-10700K Processor CPU Specification, [Verkkosivu] [Viitattu 10.7.2021]. Saatavissa: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/199335/intel-core-i710700k-processor-16m-cache-up-to-5-10-ghz/specifications.html>

Intel, (n. 2021c), CPU Cooler: Liquid Cooling Vs. Air Cooling, [Verkkosivu] [Viitattu 28.8.2021]. Saatavissa: <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/cpu-cooler-liquid-cooling-vs-air-cooling.html>

Intel, (n. 2021d), PC Cooling: The Importance of Keeping Your PC Cool, [Verkkosivu] [Viitattu 28.8.2021]. Saatavissa: <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/pc-cooling-the-importance-of-keeping-your-pc-cool.html>

Noctua, (n. 2021a). NH-U12S TR4-SP3 [digitaalinen kuva]. [katsottu 27.8.2021]. saatavilla: https://noctua.at/pub/media/wysiwyg/presse/NH-U12S%20TR4-SP3/noctua_nh_u12s_tr4_sp3_6.jpg

Noctua, (n. 2021b). NH-D15 [digitaalinen kuva]. [katsottu 27.8.2021]. saatavilla: https://noctua.at/pub/media/wysiwyg/presse/NH-D15/noctua_nh_d15_1.jpg

Noctua, (n. 2021c). NF-A9 PWM [digitaalinen kuva]. [katsottu 27.8.2021]. saatavilla: https://noctua.at/pub/media/wysiwyg/presse/NF-A9%20PWM/nf_a9_3.jpg