TIETOKONEPROSESSORIEN JÄÄHDYTYSKOMPONENTTIEN TOIMINTA JA VERTAILU

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2026

Leevi Hiltunen

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Markku Nikku

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Leevi Hiltunen

Tietokoneprosessorien jäähdytyskomponenttien toiminta ja vertailu

Energiatekniikan kandidaatintyö

2026

35 sivua, 9 kuvaa ja 10 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Markku Nikku

Avainsanat: prosessori, lämmönsiirto, jäähdytys, lämpöputket, ilmajäähdytys, nestejäähdytys, tietokoneet

Nykyaikaiset tietokoneprosessorit kuluttavat huomattavan määrän sähköä ja sitä myöten tuottavat myös suuren määrän lämpöä. Prosessori vahingoituu jos se ylilämpenee, joten se halutaan pitää mahdollisimman viileänä. Tähän päästään, kun prosessoriin asennetaan jäähdytyslaite siirtämään lämpöä prosessorin pinnalta ympäröivään tilaan.

Tässä työssä tutkitaan ilmajäähdytystä ja nestejäähdytystä sekä niiden eroja. Työssä tarkastellaan prosessorin toimintaa ja lämmön syntymistä sen sisällä, jäähdytysjärjestelmien komponentteja ja tutkitaan niiden eroja kokonaislämpövastuksen kautta. Vertailu suoritetaan tutustumalla aikaisempien töiden tuloksiin.

Vertailu osoittaa nestejäähdytyksen olevan parempi vaihtoehto kuin ilmajäähdytyksen, kun halutaan jäähdyttää prosessoria mahdollisimman paljon.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Leevi Hiltunen

Operation and comparison of computer processor cooling components

Bachelor's thesis

2026

35 pages, 9 figures and 10 tables

Examiners: Associate Professor Markku Nikku

Keywords: processor, heat transfer, cooling, heatpipes, air cooling, liquid cooling, computers

Modern computer processors consume a significant amount of electricity and consequently generate a large amount of heat. The processor must be kept as cool as possible to prevent damage. This can be accomplished by attaching a cooling unit to transfer heat to the surrounding space from the surface of the processor.

This work examines air cooling and liquid cooling and compares their differences. The work reviews how a processor operates and how heat generates inside the processor and the components of the cooling systems and compares them through overall thermal resistance. The comparison is done by investigating the results of previous researches.

The comparison shows that liquid cooling is a better option than air cooling when the aim is to cool the processor as much as possible.

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	m^2
D	halkaisija	m
E	säteilyteho	W
f	kitkakerroin	
H	korkeus	m
h	konvektion lämmönsiirtokerroin	W/m^2K
k	lämmönjohtavuus	W/m K
L	pituus	m
m	apumuuttuja	1/m
Q	lämpöteho	W
R	lämpövastus	K/W
S	etäisyys	m
T	lämpötila	K
t	paksuus	m
W	leveys	m
w	virtausnopeus	m/s
x	etäisyys	m

Kreikkalaiset

α	absorptiokerroin
ε	emissiviteetti

η	hyötysuhde	
μ	dynaaminen viskositeetti	kg/m^2s
ρ	tiheys	kg/m^3

Dimensiottomat luvut

Nu	Nusseltin luku
Pr	Prandtlin luku
Re	Reynoldsin luku

Alaindeksit

b	musta kappale
hai	haihdutin
h	hydraulinen
i	ilma
joht	johtuminen
k	kontakti
kok	kokonais
konv	konvektio
lp	lämpöputki
lt	lämpötahna
mk	mikrokanava
n	neste
pro	prosessori
r	ripa

rad	säteily
s	pinta
v	vesi
ymp	ympäristö
∞	fluidi

Yläindeksit

’’	vuo
+	dimensioton apumuuttuja

Vakiot

σ	Stefan-Boltzmannin vakio	$5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m^{2}K^4

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboliluettelo

Ilmoitukset

1 Johdanto 9
2 Lämmönsiirto 10
2.1 Johtuminen 10
2.2 Konvektio 10
2.3 Säteily 11
2.4 Lämpövastus 13
3 Lämmönsiirron merkitys prosessoreille 14
3.1 Prosessorin rakenne 14
3.2 Lämmön syntyminen prosessorissa 14
3.3 Integroitu lämmönjakaja 15
4 Jäähdytyskomponentit 16
4.1 Ilmajäähdytys 16
4.1.1 Lämpöputki 17
4.1.2 Rivat 17
4.1.3 Tuuletin 18
4.2 Nestejäähdytys 18
4.2.1 Vesiblokki 19
4.2.2 Jäähdytin 19
4.3 Kontaktivastus 19
5 Laskentamenetelmät 21
5.1 Jäähdyttimien laskennan oletukset 21
5.2 Ilmajäähdyttimen kokonaislämpövastuksen laskenta 21
5.3 Nestejäähdyttimen kokonaislämpövastuksen laskenta 24
6 Tulokset 26
6.1 Ilmajäähdytyksen kokonaislämpövastus 26

6.2 Nestejäähdytyksen kokonaislämpövastus 28
7 Johtopäätökset 30
8 Yhteenveto 32
Lähteet 33

ILMOITUKSET

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Leevi Hiltunen on käyttänyt seuraavia tekoälytyökaluja opinnäytetyön tekemisessä:

1. OpenAI ChatGPT
    a. Työkalun käytön tarkoitus: Lähdehaku ja kielenhuolto.
    b. Selvitys työkalun käytöstä: Työkalua on käytetty lähteiden hakemiseen ja kielenhuoltoon. Työkalun tuottamaa tekstiä ei ole käytetty työssä.
2. Microsoft 365 Copilot
    a. Työkalun käytön tarkoitus: Lähdehaku ja kielenhuolto.
    b. Selvitys työkalun käytöstä: Työkalua on käytetty lähteiden hakemiseen ja kielenhuoltoon. Työkalun tuottamaa tekstiä ei ole käytetty työssä.

Vastuu

Kirjoittaja, Leevi Hiltunen, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

1 Johdanto

Tietokoneet ovat tärkeä osa yhteiskunnan toimintaa, sillä ne helpottavat tiedonkäsittelyä, mahdollistavat automaation ja ohjelmoinnin sekä auttavat monimutkaisten ongelmien ratkaisussa. Prosessori on tietokoneen toiminnan mahdollistava yksikkö, jonka voidaan ajatella olevan tietokoneen aivot, sillä se käsittelee tietoa ja ohjaa tietokoneen muiden osien toimintaa. Prosessorin sisällä tapahtuvat sähköiset prosessit kuluttavat energiaa ja muuttavat sitä lämmöksi. Prosessorin lämpötilaa mitataan jatkuvasti siihen asennetuilla antureilla. Prosessori suojaa itseään ylilämpenemisen aiheuttamalta vaurioitumiselta rajoittamalla toimintaansa, joten tehokas lämmönsiirto takaa prosessorin tehokkaamman toiminnan.

Aikaisempi tutkimus on mitannut ilmajäähdytysjärjestelmän toiminta-arvoja ja verrannut niitä muiden tutkimusten toiminta-arvoihin. Aikaisempi tutkimus on näiden toiminta-arvojen ja lämmönsiirron pohjalta luonut mallin, jonka avulla voidaan simuloida jäähdytysjärjestelmän toimintaa. (Maalej, S. et al. 2020)

Tämän työn tavoitteena on selvittää eroja jäähdytysjärjestelmätyyppien välillä ja antaa selkeä kuva niiden eroista. Työssä käydään läpi ilmajäähdytysjärjestelmiä ja vertaillaan niitä nestejäähdyttimiin sekä pyritään selvittämään, miten jäähdytysjärjestelmien toiminta eroaa toisistaan ja missä suurimmat erot syntyvät. Työ kohdistuu pöytätietokoneiden jäähdytysjärjestelmiin. Pöytätietokoneet ovat kiinteään paikkaan sijoitettavia henkilökohtaiseen käyttöön suunniteltuja tietokoneita, jotka eroavat kannettavista koneista niiden suuremman koon puolesta ja datakeskuksissa sijaitsevista palvelimista käyttäjämäärältä. Jäähdytysjärjestelmiä tutkitaan kirjallisuuskatsauksen kautta. Työssä tutustutaan ensin lämmönsiirron perusteisiin, käydään läpi prosessorin rakennetta ja lämmön vaikutusta sen toimintaan. Sen jälkeen tutustutaan jäähdytysjärjestelmiin ja niiden tyypillisiin toiminta-arvoihin tulokset kappaleessa. Lopuksi muodostetaan johtopäätökset tulosten perusteella ja selvitetään tuloksiin vaikuttavat tekijät.

2 Lämmönsiirto

Lämmönsiirto on lämpöenergian siirtymistä väliaineessa tai pintojen välillä, joka aiheutuu lämpötilaerosta. Lämmönsiirto voidaan jakaa muotoihin, joissa lämmönsiirtoa tapahtuu ympäristössä. Näitä muotoja ovat johtuminen, konvektio ja säteily.

2.1 Johtuminen

Johtuminen on lämpöenergian siirtymistä aineessa tai aineiden välillä korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Näin tapahtuu, sillä korkeampi lämpötila tarkoittaa korkeamman energiatilan hiukkasia, jotka vuorovaikuttavat matalamman energiatilan hiukkasten kanssa niiden törmätessä, jolloin osa energiasta siirtyy lämpötilaeron tietyllä etäisyydellä eli lämpötilagradientin vallitessa. Paikallaan olevissa kaasuissa ja nesteissä eli fluideissa lämpöenergia siirtyy hiukkasten välisten törmäysten ja hiukkasten satunnaisen liikkeen eli lämmön diffuusion seurauksena. Kiinteissä aineissa lämpöenergia siirtyy hilavärähtelyn ja elektronien satunnaisen liikkeen seurauksena. (Bergman et al. 2017)

Lämmönjohtumiselle lämpövuon yhtälö tunnetaan nimellä Fourierin laki. Se kuvaa lämpövuota Q''_{joht} (W/m^2) eli kuinka paljon lämpöenergiaa siirtyy johtumalla pinta-alaa kohden.

$$Q''_{\mathrm{joht}} = -k\frac{dT}{dx} \tag{1}$$

jossa k on aineen lämmönjohtavuus (W/m K) ja dT/dx on lämpötilagradientti (K/m). Yhtälössä oleva miinusmerkki kuvaa sitä, kuinka lämpö siirtyy matalampaa lämpötilaa kohti. (Bergman et al. 2017)

2.2 Konvektio

Konvektio on pinnan ja fluidin välistä lämpöenergian siirtymistä diffuusion lisäksi hiukkasten yhteisen makroskooppisen liikkeen eli advektion mukana. Konvektio voidaan luokitella vapaaksi tai pakotetuksi konvektioksi virtauksen luonteen perusteella. Pakotettu

konvektio tarkoittaa, että virtauksen aiheuttaa jokin ulkoinen lähde kuten esimerkiksi tuuletin tai pumppu. Vapaa konvektio puolestaan tarkoittaa sitä, että virtaus syntyy fluidin sisäisten lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista, jotka luovat nosteen fluidissa. Vapaa ja pakotettu konvektio eivät kuitenkaan sulje toisiaan pois ja voivat tilanteen mukaan esiintyä yhdessä. (Bergman et al. 2017)

Virtauksen luonteesta huolimatta konvektion lämpövuon Q''_{konv} (W/m^2) yhtälö voidaan kirjoittaa Newtonin jäähtymislain mukaisesti.

$$Q''_{\mathrm{konv}} = h(T_{\mathrm{s}} - T_{\infty}) \tag{2}$$

jossa h on konvektion lämmönsiirtokerroin (W/m^{2}K), T_{s} on pinnan lämpötila (K) ja T_{∞} on fluidin lämpötila (K). Konvektion lämmönsiirtolaskuissa lämmönsiirtokertoimen määrittäminen on keskeinen ongelma. Tyypillisiä arvoja lämmönsiirtokertoimelle on listattu taulukossa 1. (Bergman et al. 2017)

Taulukko 1. Tyypillisiä lämmönsiirtokertoimen arvoja (Bergman et al. 2017)

	h (W/m^{2}K)
Vapaa konvektio, kaasu	2–25
Vapaa konvektio, neste	50–1000
Pakotettu konvektio, kaasu	25–250
Pakotettu konvektio, neste	100–20000

Lämmönsiirtokerroin tulee määrittää jokaisessa tilanteessa erikseen. Tähän käytetään usein korrelaatioita, jotka perustuvat kokeellisesti suoritettuihin mittauksiin ja ne antavat arvion lämmönsiirtokertoimesta. Lämmönsiirtokertoimen laskennassa olennaisin arvo on virtausnopeus, jonka avulla voidaan selvittää, onko virtaus laminaarista vai turbulenttia. Laminaarinen virtaus tarkoittaa, että fluidi liikkuu tasaisesti ja että siinä ei ole pyörteitä, kun taas turbulenttisessa virtauksessa on pyörteitä, joissa hiukkaset liikkuvat satunnaisesti. (Bergman et al. 2017)

2.3 Säteily

Säteily on aineen lähettämää eli emittoivaa energiaa, kun sen lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Säteilyn energia siirtyy sähkömagneettisena säteilynä ja se ei

tarvitse johtumisen ja konvektion tavoin ainetta tapahtuakseen. Säteily onkin tehokkainta tyhjiössä. (Bergman et al. 2017.)

Musta kappale tarkoittaa kappaletta, joka emittoi ideaalisti eli se lähettää säteilyä ideaalisesti. Ideaalinen säteily tarkoittaa sitä, että kappaleen säteilyteho riippuu vain sen lämpötilasta. Tällaiselle kappaleelle säteilyteho E_b (W/m^2) saadaan Stefan-Boltzmannin laista.

$$E_\mathrm{b} = \sigma T_\mathrm{s}^4 \tag{3}$$

jossa σ on Stefan-Boltzmannin vakio (W/m^{2}K^4). Kun kyseessä on oikea pinta, saadaan sille säteilyteho lasketuksi seuraavalla kaavalla.

$$E = \varepsilon \sigma T_\mathrm{s}^4 \tag{4}$$

jossa ε on emissiviteetti. Emissiviteetin arvo on väliltä $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ja se kuvaa sitä, kuinka hyvin kappale emittoi energiaa verrattuna mustaan kappaleeseen. (Bergman et al. 2017)

Säteilyä voi myös saapua pinnalle ulkoisesta lähteestä, kuten esimerkiksi auringosta tai muista näkyvistä pinnoista. Kappaleen vastaanottavaa säteilyä kutsutaan irradianssiksi. Osa irradianssista voi absorboitua kappaleeseen eli kappale vastaanottaa energiaa. Absorboituvalle osalle käytetään absorptiokerrointa α, joka emissiviteetin tavoin on arvo väliltä $0 \leq \alpha \leq 1$. Absorptiokertoimen arvo riippuu säteilyn lähteestä ja pinnan laadusta. Jos kappale on läpinäkymätön, osa irradiaatiosta heijastuu ja jos kappale on läpikuultava, osa irradiaatiosta voi läpäistä sen. (Bergman et al. 2017)

Lämpösäteilyn lämpövuo Q''_rad (W/m^2) saadaan seuraavasti.

$$Q''_\mathrm{rad} = \varepsilon \sigma \left(T_\mathrm{s}^4 - T_\mathrm{ymp}^4 \right) \tag{5}$$

jossa T_ymp on ympäristön lämpötila (K). Yhtälössä 5 oletetaan harmaaksi kappaleeksi eli sen emissiviteetti ei riipu aallonpituudesta. Harmaan kappaleen emissiviteetti ja absorptiokerroin ovat yhtä suuret. Tämä on yleinen yksinkertaistus lämmönsiirron laskuissa. (Bergman et al. 2017)

2.4 Lämpövastus

Kaikissa kolmessa lämmönsiirron muodoissa vaikuttaa myös lämpövastus R (K/W), joka kertoo materiaalin tai rajapinnan kyvystä vastustaa lämmönsiirtymistä ja tarkoittaa lämpötilaeron suhdetta tilanteessa vallitsevaan lämpötehoon. Lämpövastusta voidaan käyttää, kun halutaan vertailla eri lämmönsiirron muotoja hyödyntäviä järjestelmiä, sillä se toimii niiden yhdistävänä tekijänä. (Bergman et al. 2017)

Lämpövastus riippuu johtumisessa lämmönjohtavuudesta, materiaalin paksuudesta ja lämmön siirtymis suunnan normaalin mukaisesta pinta-alasta, kun taas konvektiossa se riippuu konvektion lämmön siirtokertoimesta ja pinta-alasta (Bergman et al. 2017).

3 Lämmönsiirron merkitys prosessoreille

Tässä kappaleessa tutkitaan prosessoria ja selvitetään, miten lämpö syntyy ja jakautuu prosessorin sisällä.

3.1 Prosessorin rakenne

Prosessorin voidaan ajatella olevan tietokoneen aivot, sillä se on vastuussa tietokoneen tärkeimmistä toiminnoista. Prosessorin tärkeimpiä osia ovat valvontayksikkö ja käsittely-yksikkö, jonka sisällä on aritmeettislooginen yksikkö, joka vastaa käskyjen suorituksesta. Näiden lisäksi prosessori sisältää myös useita rekistereitä, joita käytetään tiedon tallentamiseen prosessorin sisällä. (Blanchet, G. & Dupouy, B. 2013)

Valvontayksikkö on vastuussa käskyjen hakemisesta muistista, käskyjen purkamisesta ja se osoittaa käsittely-yksikölle, millaisia aritmeettisia ja loogisia prosesseja tulee suorittaa. Tämän jälkeen käsittely-yksikkö tallentaa käsitellyn tiedon ja suorituksen tuloksen rekisteriin. Nämä vaiheet kuvaavat kokonaista prosessia, jota varten prosessorin osat joutuvat kommunikoimaan toistensa kesken. Kommunikointia varten prosessorissa on sisäisiä väyliä, jotka yhdistävät prosessorin osat toisiinsa. (Blanchet, G. & Dupouy, B. 2013)

3.2 Lämmön syntyminen prosessorissa

Prosessorissa syntyvä lämpö on peräisin jokaisen prosessorin osan sisältämistä transistoreista. Yhdestä transistorista syntyvä lämpöenergia ei aiheuta suurta haastetta, mutta nykyaikaisten prosessorien sisällä voi olla miljardeja transistoreja, joten käskyjen määrän kasvaessa niistä syntyvä lämpövuo luo merkittävän haasteen lämmönsiirron kannalta. (Li, M. D. & Wei, S. 2013)

Suuri lämpövuon keskittymä voi haitata prosessorin toimintaa, sillä prosessorin ylittäessä sille asetetun suurimman lämpötilan rajan se rajoittaa saamaansa tehoa estääkseen vahingoittumista. Näin ollen lämpötilan hallitsemisesta tulee tärkeä osa prosessorin toiminnan hallitsemista. (Elliott, J. W. et al. 2022)

3.3 Integroitu lämmönjakaja

Nykyaikaisissa prosessoreissa on ajateltu lämmönsiirron merkitystä integroimalla niihin lämmönjakaja. Varsinkin moniytimisissä prosessoreissa eli prosessoreissa, jotka sisältävät useamman itsenäiseen toimintaan kykenevän prosessointiosan, lämpötilagradientit ytimien välillä voivat nousta korkeiksi. Lämmönjakaja toimii prosessorin suojana ja sen tavoitteena on pienentää prosessorin toiminnasta syntyviä lämpötilagradientteja eli jakaa lämpöä tasaisemmin prosessorin pinnalle ja kasvattaa lämmönsiirron pinta-alaa. (Elliott, J. W. et al. 2022)

4 Jäähdytyskomponentit

Prosessoreille on kehitetty useita erilaisia jäähdytyskomponentteja, joiden erot löytyvät niiden muodosta, koosta, materiaaleista ja lämpöä siirtävästä fluidista. Tässä kappaleessa käsitellään pöytätietokoneille tyypillisiä jäähdytysjärjestelmiä ja niiden komponentteja.

4.1 Ilmajäähdytys

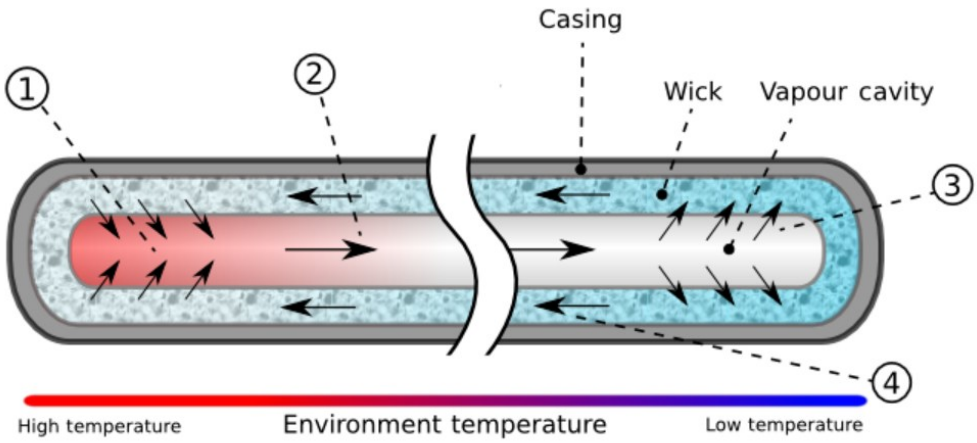
Ilmajäähdytysjärjestelmä muodostuu useasta eri komponentista, jotka toimivat yhdessä tehokkaan lämmönsiirron takaamiseksi. Ilmajäähdytin on havainnollistettu kuvassa 1.

Kuva 1. Noctua NH-U12P SE2 ilmajäähdytin (Wikimedia. 2012)

Ilmajäähdytyksessä prosessorin tuottama lämpö johtuu kuvan 1 alareunassa näkyville metallisille lämpöputkille, joita pitkin se siirtyy niihin kiinnitetyille rivoille, joista se siirtyy tuulettimen aiheuttaman pakotetun konvektion avulla ympäristöön.

4.1.1 Lämpöputki

Lämpöputki on nestettä sisältävä ilmajäähdyttimen komponentti, jota pitkin lämpö siirtyy prosessorin pinnalta rivoille. Lämpöputki koostuu höyrystimestä, adiabaattisesta osasta ja lauhduttimesta. Lämpöputken rakennetta on havainnollistettu kuvassa 2. (Gupta, N. K. et al. 2018)



Kuva 2. Lämpöputki (Wikimedia. 2006)

Höyrystimessä lämpöputken sisällä oleva neste haihtuu höyryksi ja kulkee adiabaattista osaa pitkin kohti lauhdutinta, jonka ulkopuolella sijaitsevat jäähdyttimen rivat. Lauhduttimessa höyry lauhtuu nesteeksi ja kulkeutuu takaisin haihduttimeen kapillaari-ilmiön seurauksena lämpöputken seinämissä sijaitsevaa kapillaarirakennetta pitkin. (Gupta, N. K. et al. 2018)

4.1.2 Rivat

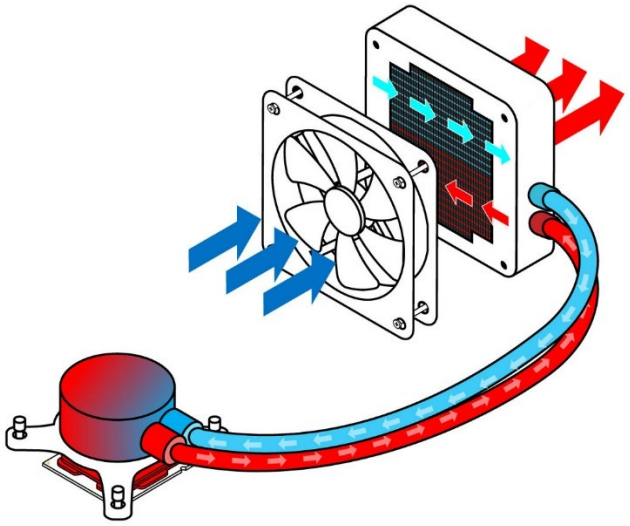
Rivat ovat laajennettuja pintoja, joiden tarkoituksena on parantaa lämmönsiirtoa nostamalla lämmönsiirron pinta-alaa. Ilmajäähdytyksessä rivat on kiinnitetty lämpöputkiin, joissa niiden tarkoitus on parantaa lämmönsiirtoa lämpöputkista ympäristöön. Rivoissa vallitsee myös lämpövastus, joten oikean kokoisen rivan määrittäminen on tärkeä osa lämmönsiirron kannalta. (Bergman et al. 2017.)

4.1.3 Tuuletin

Tuulettimen tehtävänä on parantaa virtausta ripojen pinnalla lämmönsiirron parantamiseksi. Tuuletin siirtää lämmintä ilmaa pois ripojen pinnalta ja tuo tilalle viileämpää ilmaa ympäristöstä. Ilmajäähdytinjärjestelmää voi käyttää myös ilman tuuletinta, mutta tuulettimen käytöstä aiheutuvan pakotetun konvektion tehokkuus on suurempi kuin vapaan konvektion lämmönsiirto. (UMA Technology. 2025)

4.2 Nestejäähdytys

Nestejäähdytysjärjestelmä muodostuu useasta eri komponentista, jotka toimivat yhdessä tehokkaan lämmönsiirron takaamiseksi. Nestejäähdytyksen toimintaa on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Nestejäähdytyksen toiminta (Intel. n.d.)

Nestejäähdytyksessä lämpö johtuu prosessorin pinnalta vesiblokkiin, jossa mikrokanavissa virtaava neste kuljettaa lämmön jäähdyttimelle. Jäähdytin viilentää nestettä tuulettimien avulla, minkä jälkeen jäähtynyt neste pumpataan takaisin kohti vesiblokkia. Yleisin nestejäähdyttimessä käytettävä neste on vesi, mutta sen tilalla voidaan käyttää myös muita nesteitä, kuten nanofluideja, jotka ovat fluideja, joissa nesteessä on mukana pieniä partikkeleja, joiden lämmönsiirtokyky on parempi kuin veden. (Wang, X.-Q. & Mujumdar, A. S. 2007).

4.2.1 Vesiblokki

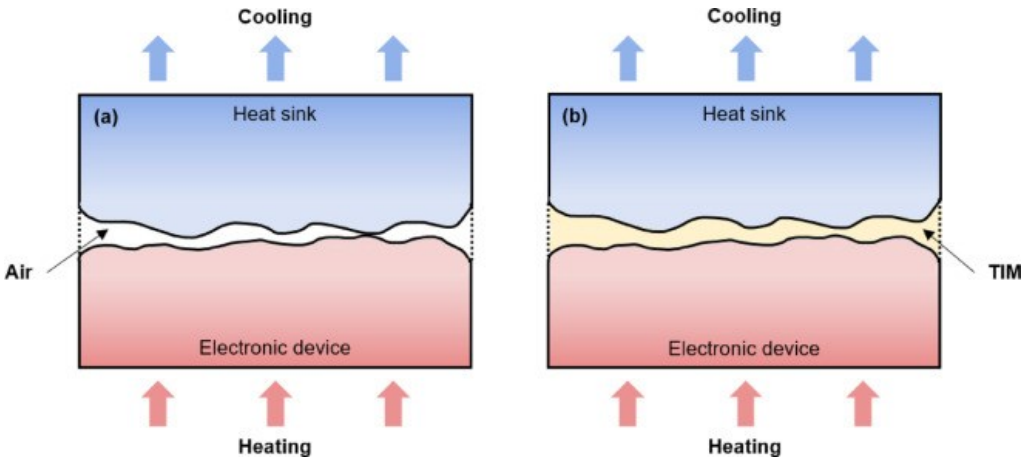
Vesiblokki on prosessorin pinnan päälle kiinnitettävä osa nestejäähdytysjärjestelmää. Vesiblokissa neste virtaa mikrokanavissa, jotka ovat kanavia, joiden hydraulinen halkaisija on tarpeeksi pieni. Mikrokanaville ei ole olemassa virallista kokoluokkaa, joten tämän työn kannalta voidaan niiden ajatella olevan kanavia, joiden hydraulinen halkaisija on alle 1 mm. (Rosa, P. et al. 2009)

4.2.2 Jäähdytin

Jäähdytin toimii samalla periaatteella kuin ilmajäähdytyksessä rivat ja tuuletin. Jäähdyttimen tuuletin siirtää ilmaa jäähdyttimen ripojen eli jäähdytyssiilin läpi, joihin nesteen mukana kulkeva lämpö on johtunut. Jäähdyttimen paksuutta lisäämällä voidaan kasvattaa jäähdyttimen kykyä siirtää lämpö, sillä näin saadaan ripojen pinta-ala suuremmaksi. (Mahan, J. n.d.)

4.3 Kontaktivastus

Yksi jokaista jäähdytysjärjestelmää yhdistävä tekijä on kontaktivastus jäähdyttimen ja prosessorin pinnan välillä. Kun tarkastellaan tätä väliä tarpeeksi suurella tarkkuudella, voidaan huomata pintojen väliin jäävän ilmaa, sillä pinnat eivät ole täysin tasaisia. Ilman lämmönjohtavuus on huomattavasti pienempi kuin kiinteiden materiaalien, jolloin lämpövastus kasvaa. Tätä varten on kehitetty erilaisia lämpötahnoja, joiden tehtävänä on täyttää prosessorin ja jäähdyttimen väliin jäävän alueen parantaen lämmönjohtumista jäähdyttimeen ja pienentäen kokonaislämpövastusta. Lämpötahnan täyttämä tila on esitetty kuvassa 4. (Yu et al. 2012)



Kuva 4. Lämpötahnan täyttämä alue (Zhang et al. 2021)

Kuvassa lämpötahna on esitetty nimellä TIM (Thermal Interface Material). Lämpötahna koostuu nestemäisestä sideaineesta, jolla ei yksinään ole riittävän hyvä lämmönjohtavuus nykyaikaisten järjestelmien vaatimaa lämmönsiirtoa varten, sekä sideaineeseen sekoitetuista metalli- tai keraamista partikkeleista, kuten alumiinioksidista tai alumiininitridistä. (Yu et al. 2012)

5 Laskentamenetelmät

Jäähdytinjärjestelmien eroavaisuuksien takia niiden vertailu on vaikeaa. Yksi tapa vertailla järjestelmiä on tutkia niiden kokonaislämpövastusta, josta nähdään niiden kyky siirtää lämpöä. Pienempi kokonaislämpövastus tarkoittaa parempaa lämmönsiirtokykyä. Tässä kappaleessa esitetään kokonaislämpövastuksen laskennassa käytettävät menetelmät.

5.1 Jäähdyttimien laskennan oletukset

Laskentaprosessin ja mahdollisen simuloinnin helpottamiseksi joudutaan tekemään oletuksia, joiden avulla laskenta ei muutu liian monimutkaiseksi samalla säilyttäen tulosten tarkkuuden. Jäähdytysjärjestelmien laskentamenetelmien esityksessä ei huomioida säteilyä, sillä jäähdytys perustuu konvektion vaikutukseen. Oletetaan myös, että materiaalien ja fluidien aineominaisuudet pysyvät vakioina. Oletetaan, että lähes kaikki prosessoriin tulevasta tehosta muuttuu lämmöksi, joten yleisesti lämpötehon arvona käytetään prosessorin tehoa. Lämpötilojen oletetaan pysyvän koko ajan samoina, eli oletetaan stationaaritila.

5.2 Ilmajäähdyttimen kokonaislämpövastuksen laskenta

Ilmajäähdytykselle voidaan laskea kokonaislämpövastus $R_{\mathrm{kok,i}}$ (K/W), kun tunnetaan lämpötilaero jäähdytysjärjestelmän yli ja lämpöteho, jossa mittaus on suoritettu. Jäähdytyskomponentin kokonaislämpövastukselle saadaan kaavaksi

$$R_{\mathrm{kok,i}} = \frac{T_{\mathrm{pro}} - T_{\mathrm{i}}}{Q} \tag{6}$$

jossa T_{pro} on prosessorin pinnan lämpötila (K) ja T_{i} on ilman lämpötila (K) ja Q on lämpöteho (W). (Maalej, S. et al. 2020)

Ilmajäähdytinjärjestelmässä kokonaislämpövastus muodostuu seuraavista osalämpövastuksista.

$$R_{\mathrm{kok,i}} = R_{\mathrm{k}} + R_{\mathrm{lp}} + R_{\mathrm{r}} \tag{7}$$

Kontaktilämpövastus R_{k} (K/W) vaikuttaa prosessorin pinnan ja jäähdyttimen pohjan välissä. Tätä lämpövastusta voidaan pienentää käyttämällä komponenttien välissä lämpötahnaa. Kontaktilämpövastus voidaan määrittää kaavasta

$$R_{\mathrm{k}} = \frac{t_{\mathrm{lt}}}{k_{\mathrm{lt}} A_{\mathrm{lt}}} \tag{8}$$

jossa t_{lt} on lämpötahnan paksuus (m), k_{lt} on lämpötahnan lämmönjohtavuus (W/m K) ja A_{lt} on prosessorin ja jäähdyttimen välinen kosketuspinta-ala (m^2). Lämpöputkien lämpövastus R_{lp} on vaikea määrittää ilman tunnettuja lämpötiloja, joten sille voidaan kirjoittaa kaavaksi

$$R_{\mathrm{lp}} = \frac{T_{\mathrm{hai}} - T_{\mathrm{l}}}{Q_{\mathrm{lp}}} \tag{9}$$

jossa T_{hai} on haihduttimen lämpötila (K), T_{l} on lauhduttimen lämpötila (K) ja Q_{lp} on lämpöputken läpi kulkeva teho. Ripojen lämmönjohtavuus R_{r} kuvaa lämmönjohtumista rivan pintaan ja konvektion vaikutusta rivan pinnalla. Tämä voidaan laskea seuraavalla kaavasta

$$R_{\mathrm{r}} = \frac{1}{\eta_{\mathrm{r}} A_{\mathrm{r}} h} \tag{10}$$

jossa η_{r} on ripahyötysuhde, A_{r} on ripojen pinta-ala (m^2). (Choi et al. 2011)

Ripahyötysuhde voidaan määrittää seuraavasta kaavasta

$$\eta_{\mathrm{r}} = \frac{\tanh(m\,L)}{m\,L} \tag{11}$$

jossa m on apumuuttuja (1/m) ja L on rivan pituus ilman virtaussuunnassa (m). Tätä ripahyötysuhteen kaavaa käytettäessä oletetaan rivan kärjen olevan adiabaattinen. Tämä toimii hyvin ilmajäähdyttimen laskennassa, sillä rivat ovat ohuita ja pitkiä. Ohuiden ja pitkien ripojen oletus pätee myös apumuuttujaa laskettaessa. Apumuuttuja saadaan kaavasta

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_{\mathrm{r}} A_{\mathrm{r}}}} \tag{12}$$

jossa k_r on rivan lämmönjohtavuus (W/m K). (Wang et al. 2007)

Apukertoimen m laskemista varten tarvitaan konvektion lämmönsiirtokerroin h (W/m^{2}K), jolle voidaan laskea arvo Nusseltin luvun määritelmää muokkaamalla kaavasta

$$h = \frac{k_i Nu}{D_h} \tag{13}$$

jossa k_i on ilman lämmönjohtavuus (W/m K), Nu on dimensioton Nusseltin luku ja $D_{h,i}$ on hydraulinen halkaisija (m), joka kuvaa ripojen välistä virtauskanavaa. Hydraulinen halkaisija määritellään kaavasta

$$D_{h,i} = 2(S_r - t_r) \tag{14}$$

jossa S_r on ripojen välinen etäisyys (m) ja t_r on ripojen paksuus (m). Nusseltin luku voidaan puolestaan määrittää käyttämällä aiempien mittausten avulla määritettyjä korrelaatioita, mutta ennen sitä joudutaan määrittämään, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista. Tämä onnistuu dimensiottoman Reynoldsin luvun Re avulla, joka määritellään kaavasta

$$Re = \frac{\rho_i w_i D_{h,i}}{\mu_i} \tag{15}$$

jossa ρ_i on ilman tiheys (kg/m^3), w_i on ilman virtausnopeus (m/s) ja μ_i on dynaaminen viskositeetti (kg/m^{2}s). Virtaus on laminaarista, kun Reynoldsin luku on $Re < 2300$ ja turbulenttista, kun $Re > 4000$. Laminaariselle virtaukselle voidaan käyttää Stephanin korrelaatiota (Maalej, S. et al. 2020).

$$Nu = 7{,}55 + \frac{0{,}024(L^+)^{-1{,}14}}{1 + 0{,}0358(L^+)^{-0{,}064Pr^{0{,}17}}} \tag{16}$$

jossa Pr on dimensioton Prandtlin luku ja L^+ on dimensioton apumuuttuja, joka lasketaan seuraavasta kaavasta

$$L^+ = \frac{W_r}{D_{h,i} RePr} \tag{17}$$

jossa W_r on rivan leveys virtaussuunnassa. Turbulentille virtaukselle voidaan käyttää Gnielinskin korrelaatiota (Maalej, S. et al. 2020).

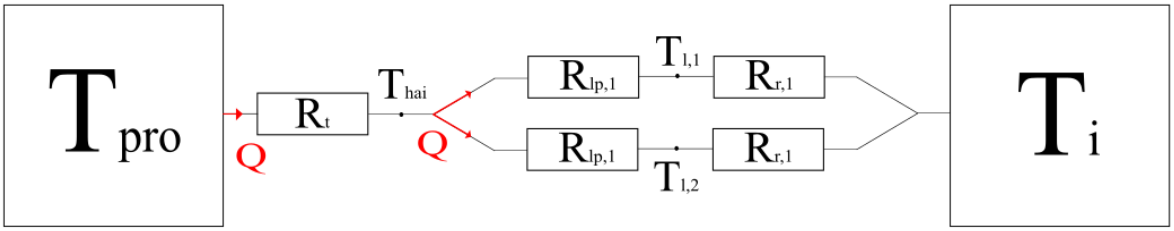
$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12{,}7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \tag{18}$$

jossa f on kitkakerroin, joka lasketaan kaavasta

$$f = (1{,}82\log_{10}(Re) - 1{,}64)^{-2} \tag{19}$$

Gnielinskin korrelaation Reynoldsin luvun pätevyysalue on $3000 < Re < 5000000$.

Osalämpövastusten avulla voidaan muodostaa terminen piiri ilmajäähdyttimelle. Terminen piiri on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Ilmajäähdyttimen terminen piiri

Kuvassa oleva terminen piiri kuvaa jäähdytintä, jossa on kaksi lämpöputkea. Lämpötehon oletetaan jakautuvan tasaisesti lämpöputkille simuloinnin ja laskennan helpottamiseksi. (Maalej, S. et al. 2020)

5.3 Nestejäähdyttimen kokonaislämpövastuksen laskenta

Nestejäähdytykselle laskenta tapahtuu pääosin samoin kuin ilmajäähdytyksellekin, mutta erona on kokonaislämpövastuksen komponenttien eroavaisuus. Kokonaislämpövastus $R_{\mathrm{kok,n}}$ saadaan samalla kaavalla, kuten ilmajäähdytyksellekkin.

$$R_{\mathrm{kok,n}} = \frac{T_{\mathrm{pro}} - T_{\mathrm{i}}}{Q} \tag{20}$$

Huomataan kuitenkin, että osalämpövastukset ovat erilaiset.

$$R_{\mathrm{kok,n}} = R_{\mathrm{k}} + R_{\mathrm{mk}} + R_{\mathrm{r}} \tag{21}$$

jossa R_{mk} on vesiblokin mikrokanavan lämpövastus. Mikrokanavat toimivat samalla tavalla, kuin ilmajäähdytyksessä rivat, joten sille voidaan laskea lämpövastuksen arvo samalla

tavalla, kuin rivoille hyödyntäen Gnielinskin tai Stephanin korrelaatiota. Ainoana erona on hydraulisen halkaisijan $D_{h,n}$ määritys kaavasta

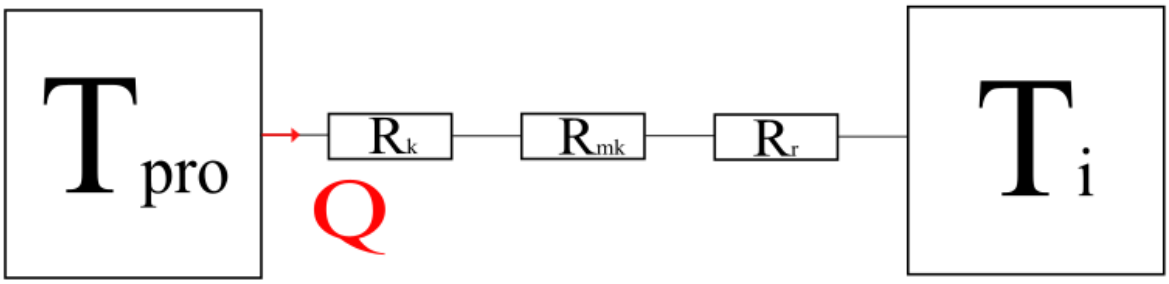
$$D_{h,n} = \frac{2WH}{W + H} \tag{22}$$

jossa W on kanavan leveys (m) ja H on kanavan korkeus (m). Nyt saadaan mikrokanavan konvektion lämpövastuksen R_{mk} kaavaksi

$$R_{mk} = \frac{1}{h_{mk} A_{mk}} \tag{23}$$

jossa h_{mk} on mikrokanavan lämmönsiirtokerroin (W/m K) ja A_{mk} on mikrokanavan pinta-ala. (Choi et al. 2011)

Lämmön johtumiselle prosessorin pinnasta nestejäähdyttimeen ja jäähdytyssiilin osalämpövastusten arvot voidaan laskea samalla tavalla ilmajäähdytyksen kanssa. Nestejäähdytyksen terminen piiri muodostuu hieman yksinkertaisemmin, sillä lämpöteho ei jakaudu useaan lämpöputkeen vaan kulkee samassa kanavassa koko ajan. Terminen piiri on esitetty kuvassa 6. (Choi et al. 2011)



Kuva 6. Nestejäähdyttimen terminen piiri

6 Tulokset

Tässä kappaleessa esitetään kirjallisuudesta saadut arvot kokonaislämpövastukselle lähteittäin luetellen ja muodostetaan kuvaaja, jossa voidaan verrata ilmajäähdytystä nestejäähdytykseen. Tutkittava alue rajataan lämpötehon avulla välille 0–200 W, sillä tämä alue kattaa yleisesti käytössä olevien prosessorien toiminta-alueen.

6.1 Ilmajäähdytyksen kokonaislämpövastus

Ilmajäähdytysjärjestelmille saadut tulokset esitetään lähteittäin luetellen ja kerrotaan lyhyesti, minkälaisella jäähdytysjärjestelmällä kyseinen tulos on saavutettu.

Kokonaislämpövastus ilmajäähdytysjärjestelmälle, jossa on kaksi rivoitettua lämpöputkea, on saatu kokeellisesti mittaamalla (Wang, J.-C. et al. 2007). Saadut arvot ilmoitetaan taulukossa 2.

Taulukko 2. Kaksi U-lämpöputkea (Wang, J.-C. et al. 2007)

Q (W)	60	80	100	120	140	160	180	200
$R_{kok,i}$ (K/W)	0,300	0,290	0,280	0,270	0,270	0,270	0,280	0,290

Neljälle lämpöputkelle saatu kokeellinen tulos on mitattu matalalla lämpötehon alueella (Elnaggar, M. H. A. et al. 2011). Saadut arvot ilmoitetaan taulukossa 3.

Taulukko 3. Neljä lämpöputkea (Elnaggar, M. H. A. et al. 2011)

Q (W)	10	20
$R_{kok,i}$ (K/W)	0,220	0,200

Neljälle lämpöputkelle löytyy myös korkeammalla lämpötehon alueella tehty kokeellinen mittaus (Može, M. et al. 2020). Saadut arvot ilmoitetaan taulukossa 4.

Taulukko 4. Neljä lämpöputkea 2 (Može, M. et al. 2020)

Q (W)	30	50	70	80	100	130	150
$R_{kok,i}$ (K/W)	0,132	0,127	0,120	0,118	0,115	0,110	0,109

Kolmelle lämpöputkelle löytyvä kokeellinen mittaus (Maalej, S. et al. 2020). Saadut arvot ilmoitetaan taulukossa 5.

Taulukko 5. Kolme lämpöputkea (Maalej, S. et al. 2020)

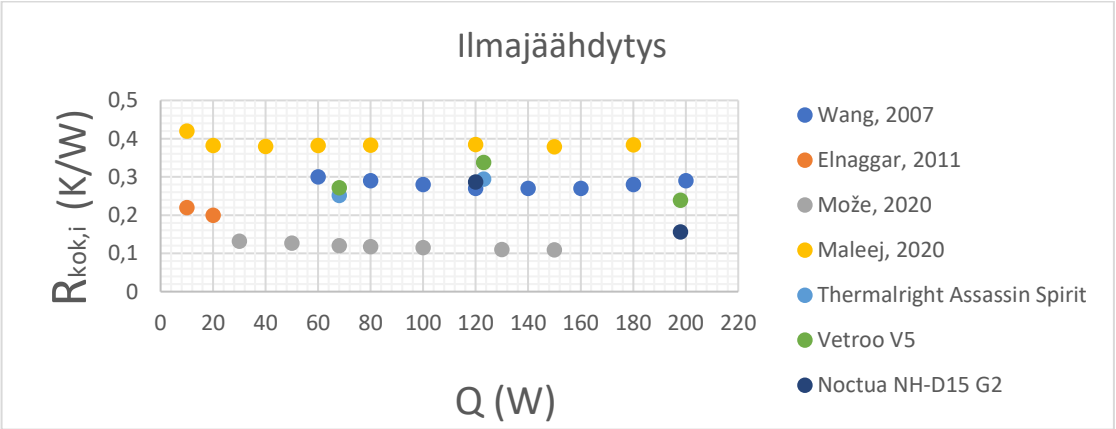
Q (W)	10	20	40	60	80	120	150	180
$R_{kok,i}$ (K/W)	0,420	0,382	0,380	0,382	0,383	0,385	0,379	0,384

Kokeellisten prosessorijäähdyttimien lisäksi tutkitaan myös muutamia kaupallisessa valmistuksessa olevia ilmajäähdytinmalleja, joiden toimintaperiaatteet ovat samat, kuin mittauksissa käytetyillä jäähdyttimillä.

Taulukko 6. Kaupalliset ilmajäähdyttimet (GamersNexus. 2024)

	Q (W)	68	123	198
Noctua NH-D15 G2	$R_{kok,i}$ (K/W)	-	0,287	0,156
Thermalright Assassin Spirit	$R_{kok,i}$ (K/W)	0,251	0,294	-
Vetroo V5	$R_{kok,i}$ (K/W)	0,272	0,337	0,239

Taulukoissa ilmoitetuista arvoista muodostetaan kuvaaja, jossa jokaisesta eri lähteestä saadut arvot ovat omalla pistejoukollaan kuvassa 7.



Kuva 7. Ilmajäähdytyksen kokonaislämpövastukset.

6.2 Nestejäähdytyksen kokonaislämpövastus

Kuten ilmajäähdytykselle, myös nestejäähdytykselle saadaan kokonaislämpövastuksen arvot kirjallisuudesta ja niille muodostetaan kuvaaja. Listataan saadut arvot lähteiden mukaan ja annetaan lyhyt kuvaus jokaisesta järjestelmästä.

Nestejäähdyttimelle, jossa yhdistyvät ilmajäähdyttimien lämpöputket sekä vesiblokki, on suoritettu kokeellinen mittaus (Wang, H et al. 2024). Saadut arvot ilmoitetaan taulukossa 7.

Taulukko 7. Lämpöputkinestejäähdytin (Wang, H et al. 2024)

Q (W)	100	200
$R_{kok,i}$ (K/W)	0,030	0,029

Kokeellinen mittaus ruiskupuristuksella valmistetulle kokeelliselle vesiblokille ja putkille (Whelan, B. P. et al. 2012). Saadut arvot ilmoitetaan taulukossa 8.

Taulukko 8. Ruiskupuristettu vesiblokki (Whelan, B. P. et al. 2012)

Q (W)	50	100	140	200
$R_{kok,i}$ (K/W)	0,100	0,095	0,092	0,089

Vesiblokki, jolle suoritettu kokeellinen mittaus. (Naduvilakath-Mohammed, F. M. et al. 2023). Saadut arvot ilmoitetaan taulukossa 9.

Taulukko 9. Vesiblokki (Naduvilakath-Mohammed, F. M. et al. 2023)

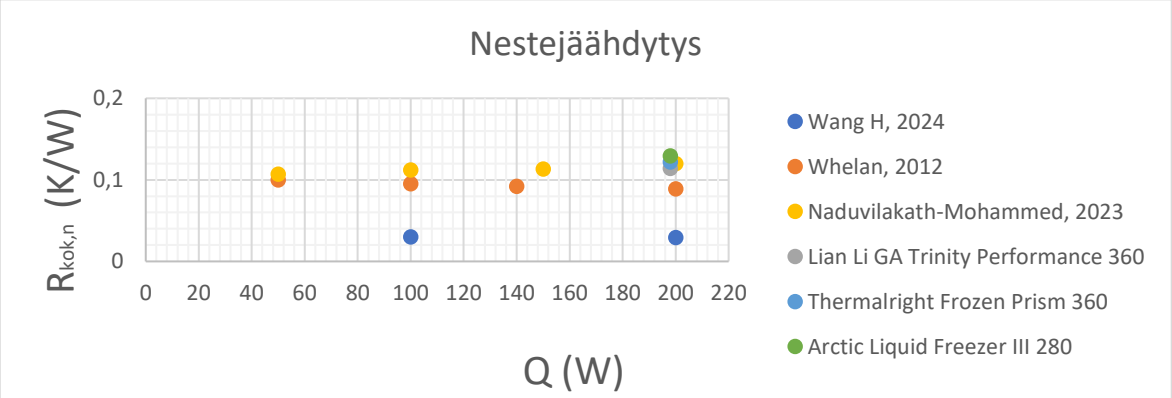
Q (W)	50	100	150	200
$R_{kok,i}$ (K/W)	0,107	0,112	0,113	0,120

Kokeellisten nestejäähdyttimien lisäksi tutkitaan myös muutamia kaupallisessa valmistuksessa olevia nestejäähdytinmalleja. Saadut arvot ilmoitetaan taulukossa 10.

Taulukko 10. Kaupalliset nestejäähdyttimet (GamersNexus. 2024)

	Q (W)	198
Lian Li GA II Trinity Performance 360	$R_{kok,i}$ (K/W)	0,114
Thermalright Frozen Prism 360	$R_{kok,i}$ (K/W)	0,122
Arctic Liquid Freezer III 280	$R_{kok,i}$ (K/W)	0,129

Taulukoissa ilmoitetuista arvoista muodostetaan kuvaaja, jossa jokaisesta lähteestä saadut arvot ovat omalla pistejoukollaan kuvassa 8.

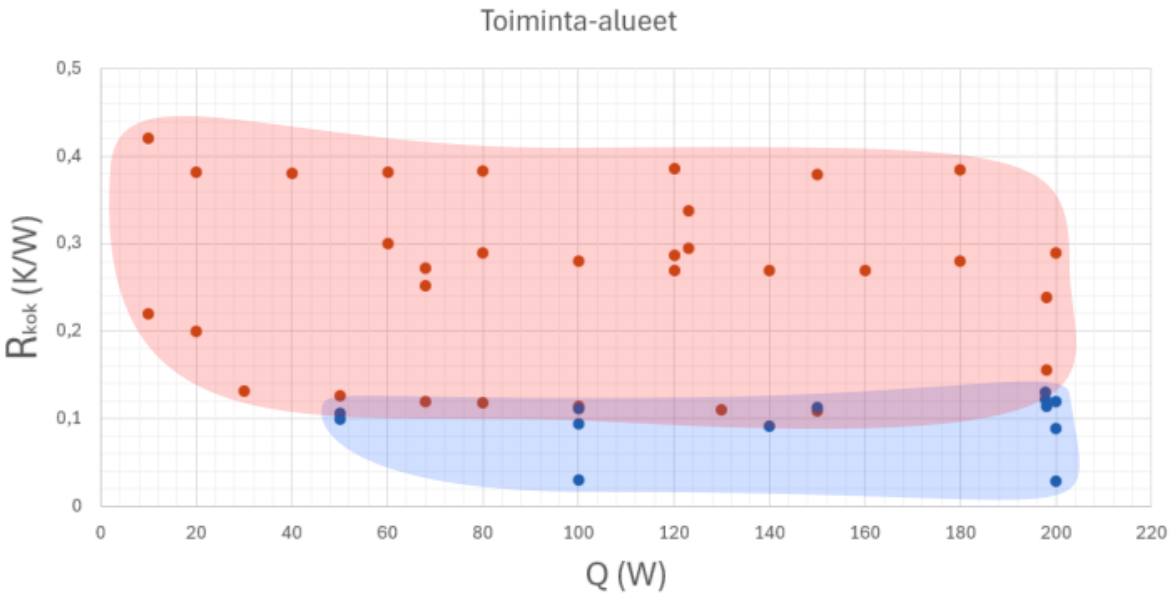


Kuva 8. Nestejäähdytyksen kokonaislämpövastukset.

7 Johtopäätökset

Tutkitut jäähdytysjärjestelmät eroavat toisistaan niiden muodon, lämpöputkien asettelun, mittaustilan lämpötilan, ilman ja nesteen virtausnopeuksissa ja mittauspisteiden määrässä.

Tulosten avulla voidaan kuitenkin muodostaa kuva, jossa ilmajäähdytyksen ja nestejäähdytyksen erot tulevat esiin. Kaikki arvot on esitetty kuvassa 9 ja niiden ympärille on piirretty alueet tyypillisten toiminta-alueiden hahmottamiseksi.



Kuva 9. Toiminta-alueet

Ilmajäähdytyksen toiminta-alue on merkattu punaisella värillä ja nestejäähdytyksen toiminta-alue on merkattu sinisellä värillä. Kuvasta nähdään, kuinka nestejäähdytyksen kokonaislämpövastus on yleisesti tarkasteltuna huomattavasti pienempi kuin ilmajäähdytyksen.

Yksinkertaisin selitys tuloksille on käytettyjen fluidien lämmönjohtavuuksien ero. Ilman lämmönjohtavuus on 0,0263 W/m K ja veden lämmönjohtavuus on 0,613 W/m K. Veden lämmönjohtavuus on noin 23 kertaa suurempi, kun niitä tarkastellaan lämpötilassa 300 K. Tämä ero vain kasvaa, kun huomioidaan, että nestejäähdytyksessä voidaan käyttää vielä suuremman lämmönjohtavuuden omaavia nesteitä, kuten esimerkiksi joitakin nanofluideja.

Huomataan myös, että vaikka nestejäähdytys onkin pääasiassa parempi niin ilmajäähdytys voi silti lähestyä nestejäähdytyksen toiminta-arvoja. Päällekkäisyyksiä voidaan selittää sillä, että kokeellisissa malleissa olosuhteet ovat aina erilaiset, joten tulokset eivät ole aivan täysin tarkkoja, vaikka ne ovatkin vertailukelpoisia, kun tarkastelu suoritetaan isomman kokonaisuuden tarkastelun kautta. Erilaiset olosuhteet selittävät myös toiminta-arvojen eroavaisuudet tarkasteltavan jäähdytinjärjestelmän arvojen sisällä.

8 Yhteenveto

Työssä käytiin läpi prosessorin toimintaa ja lämmön syntymistä prosessorissa, jäähdytintyyppien toimintaa ja komponentteja, teoriaa sekä tuloksia kirjallisuudesta ja niistä tehtyjä johtopäätöksiä. Työn aikana huomattiin, kuinka ilmajäähdytteisten ja nestejäähdytteisten järjestelmien erot vaikuttavat kokonaislämpövastukseen.

Johdantokappaleessa esille nostetussa tutkimuksessa ilmoitetut kokonaislämpövastuksen arvot vastasivat täysin kirjallisuudesta ja verkkosivuilta löytyneitä arvoja. Työn aikana huomattiin nestejäähdytyksen arvojen olevan matalampia kuin ilmajäähdytyksen arvojen. Tästä pääteltiin eroavaisuuksien johtuvan lämmönsiirrossa käytetystä fluidista.

Työssä ei huomioitu jäähdytysjärjestelmien kustannuksia eikä järjestelmien melutasoa. Nämä muuttujat voivat olla jäähdytyskyvyn ohella kuluttajan päätöksiin vaikuttavia tekijöitä, joiden huomioimatta jättäminen voidaan perustella työn keskittyvän lämmönsiirron ominaisuuksiin.

Työssä vertailtiin ilmajäähdytystä ja nestejäähdytystä sekä niille löydettiin eroavaisuuksia ja niitä hahmoteltiin piirtämällä kuvaajat ja yhdistämällä ne kokonaiskuvan antavaksi kuvaajaksi.

Lähteet

Bergman, T. L. et al. 2017. Incropera's principles of heat and mass transfer. Global edition. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.

Blanchet, G. & Dupouy, B. 2013. Computer architecture. Lontoo: ISTE.

Choi, J. T. et al. 2011. A numerical study of the heat transfer and fluid flow of micro-channeled water block for computer CPU cooling. Journal of mechanical science and technology. 25. 2657–2663. Saatavissa DOI: 10.1007/s12206-011-0616-4

Elliott, J. W. et al. 2022. Optimising integrated heat spreaders with distributed heat transfer coefficients: A case study for CPU cooling. Case studies in thermal engineering. 38. Saatavissa DOI: 10.1016/j.csite.2022.102354

Elnaggar, M. H. A. et al. 2011. Experimental analysis and FEM simulation of finned U-shape multi heat pipe for desktop PC cooling. Energy conversion and management. 52. 2937–2944. Saatavissa DOI: 10.1016/j.enconman.2011.03.001

GamersNexus. 2024. GN Mega Charts: CPU Cooler Benchmarks & Comparisons**.** Viitattu: 25.03.2026. Saatavissa https://gamersnexus.net/megacharts/cpu-coolers

Gupta, N. K. et al. 2018. Heat transfer mechanisms in heat pipes using nanofluids – A review. Experimental thermal and fluid science. 90. 84–100. Saatavissa DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.08.013

Intel. n.d. CPU Cooler: Liquid Cooling Vs. Air Cooling. Viitattu: 04.04.2026 Saatavissa https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/cpu-cooler-liquid-cooling-vs-air-cooling.html

Li, M. D. & Wei, S. 2013. Heat Generation Characteristics and Heat Dissipation Experiment of CPU Chip. Applied Mechanics and Materials. 437. 1057–1061. Saatavissa DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.437.1057

Maalej, S. et al. 2020. Thermal performance of finned heat pipe system for Central Processing Unit cooling. Energy conversion and management. 218. Saatavissa DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112977

Mahan, J. n.d. How Does Liquid Cooling Work? The Science, Benefits & Applications. Viitattu 04.04.2026 Saatavissa https://cc-techgroup.com/how-does-liquid-cooling-work

Može, M. et al. 2020. Experimental and numerical heat transfer analysis of heat-pipe-based CPU coolers and performance optimization methodology. Applied thermal engineering. 179. Saatavissa DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115720

Naduvilakath-Mohammed, F. M. et al. 2023. Closed loop liquid cooling of high-powered CPUs: A case study on cooling performance and energy optimization. Case studies in thermal engineering. 50. Saatavissa DOI: 10.1016/j.csite.2023.103472

Rosa, P. et al. 2009. Single-phase heat transfer in microchannels: The importance of scaling effects. Applied thermal engineering. 29. 3447–3468. Saatavissa DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.05.015

UMA Technology. 2025. How Do CPU Air Coolers Work? Viitattu: 04.04.2026 Saatavissa https://umatechnology.org/how-do-cpu-air-coolers-work

Wang, J.-C. et al. 2007. Experimental investigations of thermal resistance of a heat sink with horizontal embedded heat pipes. International communications in heat and mass transfer. 34. 958–970. Saatavissa DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.03.015

Wang, H. et al. 2024. Experimental study on the thermal performance of a liquid-cooled heat sink integrating. 236. Saatavissa DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121851

Wang, X.-Q. & Mujumdar, A. S. 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. International journal of thermal sciences. 46. 1–19. Saatavissa DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010

Whelan, B. P. et al. 2012. A liquid-based system for CPU cooling implementing a jet array impingement waterblock and a tube array remote heat exchanger. Applied thermal engineering. 39. 86–94. Saatavissa DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.013

Wikimedia. 2006. Heat Pipe Mechanism.png. Viitattu: 05.04.2026 Saatavissa https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heat_Pipe_Mechanism.png

Wikimedia. 2012. Noctua NH-U12P SE2 CPU cooler.jpg. Viitattu: 05.04.2026 Saatavissa https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heat_Pipe_Mechanism.png

Yu, H. et al. 2012. Thermal and insulating properties of epoxy/aluminum nitride composites used for thermal interface material. Journal of applied polymer science. 124. 669–677. Saatavissa DOI: 10.1002/app.35016

Zhang, Z. et al. 2021. A review of the state-of-the-art in electronic cooling. e-Prime. 1. Saatavissa DOI: 10.1016/j.prime.2021.100009