

Severi Saariokari

# NANOFLUIDIT ELEKTRONIIKAN JÄÄHDYTYKSESSÄ

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Seppo Syrjälä  
Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Severi Saariokari: Nanofluidit elektroniikan jäähdytyksessä  
Nanofluids in cooling of electronics  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Toukokuu 2021

---

Elektroniikasta halutaan jatkuvasti pienempää ja tehokkaampaa. Tämän kehityksen vuoksi laitteissa esiintyvät lämpövirran tiheydet kasvavat ja jäähdytys tulee usein rajoittavaksi tekijäksi. Uusia jäähdytystekniikoita tarvitaan vastaamaan kasvavia vaatimuksia. Nanofluidit ovat eräs mahdollisista tekniikoista tehokkaamman jäähdytyksen saavuttamiseksi. Nanofluidit ovat uuden sukupolven lämmönsiirtoluideja, jotka koostuvat kantajanesteestä (engl. base fluid) ja kantajanesteeseen suspendoiduista kiinteistä nanopartikkeleista. Nanofluidien hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet perustuvat suspendoitujen kiinteiden partikkelien korkeaan lämmönjohtavuuteen verrattuna perinteisten lämmönsiirtonesteiden lämmönjohtavuuksiin.

Tässä työssä tarkastellaan nanofluidien soveltuvuutta elektroniikan jäähdytykseen. Työ on toteutettu kirjallisuustutkimuksena. Työn tavoite on perehtyä nanofluidien termofysikaalisiin ominaisuuksiin ja selvittää, mitä mahdollisuuksia ja ongelmia liittyy nanofluidien käyttöön lämmön poistamiseksi elektronisista laitteista. Teoriaosuudessa tarkastellaan termofysikaalisten ominaisuuksien lisäksi virtausta ja lämmönsiirtoa virtauskanavissa. Termofysikaalisista ominaisuuksista lämmönjohtavuus on eniten tutkittu ominaisuus, sillä se määrittää, kuinka hyvin fluidi kykenee poistamaan lämpöä jäähdytettävästä kohteesta. Kokeellisissa tutkimuksissa oksidipartikkeleilla on havaittu tyypillisesti 0–30 %:n kasvu lämmönjohtavuudessa.

Mikrokanavaiset lämpönielut (engl. micro-channel heat sink) ovat nanofluidien lupaavimpia sovelluskohteita elektroniikan jäähdytyksessä. Mikrokanavaisten lämpönielujen kokeellisissa tutkimuksissa on mitattu jopa yli 70 %:n parannuksia lämmönsiirtokertoimessa, kun lämmönsiirtonesteeseen on lisätty nanopartikkeleita. Lämmönsiirtokertoimen parannukset eivät selity pelkästään kasvaneella lämmönjohtavuudella, vaan myös muita lämmönsiirtomekanismeja pitää huomioida parannusten selittämiseksi. Lupaavia tuloksia on saatu myös muilla jäähdytystekniikoilla, kuten lämpöputkilla ja nykyisillä kaupallisilla jäähdyttimillä. Kokeellisia tuloksia ei osata kuitenkaan selittää kattavasti nykyisellä teorialla, ja nanofluidien ominaisuudet voivat muuttua arvaamattomasti. Uusia lämmönsiirtomekanismeja on ehdotettu selittämään teoriasta poikkeavia tuloksia ja niiden perusteella on esitetty useita malleja kuvaamaan nanofluidien ominaisuuksia.

On mahdollista, että nanofluideja hyödynnetään elektroniikan jäähdytyksessä tulevaisuudessa. Nanofluidien käyttöön liittyy kuitenkin vielä haasteita, jotka on ratkaistava ennen niiden hyödyntämistä käytännön sovelluksissa. Suurimpia haasteita ovat puutteellinen ymmärrys lämmönsiirtomekanismeista, pitkäaikainen stabiilius, taloudelliset haasteet, painehäviöt, tukkiutuminen sekä mahdolliset ympäristö- ja terveyshaitat. Nanofluidien tutkimus on vielä melko alkuvaiheessa ja se on painottunut lähinnä termiseen suorituskykyyn. Laaja-alaista lisätutkimusta vaaditaan paremman ymmärryksen saavuttamiseksi. Tarkempi tutkimus erityisesti pitkäaikaisen käytön haitoista termofysikaalisten ominaisuuksien lisäksi on tärkeää käytännön sovellusten kannalta.

Avainsanat: nanofluidi, jäähdytys, lämpönielu, elektroniikka, lämmönsiirto, lämmönjohtavuus

# SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO .....	1
1.NANOFLUIDIEN OMINAISUUDET .....	2
1.1 Termofysikaaliset ominaisuudet .....	2
1.2 Nanofluidien lämmönjohtavuus .....	3
1.3 Mallit lämmönjohtavuudelle .....	4
1.4 Nanofluidien virtaus ja lämmönsiirto mikrokanavassa .....	7
2.NANOFLUIDIEN SOVELLUKSET .....	10
2.1 Mikrokanavaiset lämpönielut .....	10
2.2 Lämpöputki .....	11
2.3 Kaupalliset jäähdyttimet .....	12
3.VERTAILU PERINTEISESTI KÄYTETTYIHIN LÄMMÖNSIIRTONESTEISIIN.....	13
3.1 Painehäviöt .....	13
3.2 Kustannukset .....	13
3.3 Nanofluidien käytännön ongelmat ja riskit .....	15
4.JOHTOPÄÄTÖKSET .....	17
LÄHTEET .....	19

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\text{Al}_2\text{O}_3$	alumiinioksidi	
EG	etyleeniglykoli	
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	rautaoksidi	
$\text{TiO}_2$	titaanioksidi	
W	vesi	
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	yttriumalumiinigranaatti	
$\text{ZrO}_2$	zirkoniumoksidi	
$C_p$	ominaislämpö vakiopaineessa	J/kgK
$D_h$	virtauskanavan hydraulinen halkaisija	m
$d$	halkaisija	m
$e$	Neperin luku	
$f$	Fanningin kitkakerroin	
$h$	lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> K)
$k$	lämmönjohtavuus	W/(mK)
$k_b$	Boltzmannin vakio	W/(mK)
$M$	moolimassa	kg/mol
$N$	ainemäärä	mol
$p$	paine	Pa
$T$	lämpötila	K
$u$	nopeus	m/s
Nu	Nusseltin luku	
Pe	Peclet'n luku	
Pr	Prandtlin luku	
Re	Reynoldsin luku	
$\alpha$	terminen diffusiviteetti	m <sup>2</sup> /s
$\mu$	dynaaminen viskositeetti	Pas
$\nu$	kinemaattinen viskositeetti	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\varphi_v$	kiinteiden partikkelien tilavuusosuus	
$\psi$	pallomaisuutta kuvaava kerroin	
$\omega$	korrelaatiokerroin	
alaindeksit		
$p$	kiinteä partikkeli	
$0$	kantajaneste	
$nf$	nanofluidi	
$ref$	referenssilämpötila (293 K)	
$w$	lämmönsiirtopinta	
$f$	fluidi	

# JOHDANTO

Elektroniikasta halutaan jatkuvasti kooltaan pienempää ja samalla laitteilta vaaditaan enemmän tehoa. Tämä kehitys johtaa suuriin lämpövirrantiheyksiin, joka nostaa laitteiden lämpötilaa. Korkeat operointilämpötilat heikentävät laitteiden luotettavuutta ja suorituskykyä merkittävästi ja voivat johtaa laitteiden toimintahäiriöihin. [1] Perinteisesti käytetyt jäähdytysmenetelmät ja -aineet eivät riitä täyttämään kasvavien lämpöhäviöiden aiheuttamia vaatimuksia. Nanofluideja hyödyntävät systeemit ovat yksi mahdollisista tekniikoista elektroniikan tehokkaaseen jäähdytykseen tulevaisuudessa.

Tavallisesti nestejäähdytyksen lämmönsiirtonesteinä käytetään vettä, alkoholeja tai öljyä. Jo yli sata vuotta sitten Maxwell esitti idean sekoittaa hienoja metallipartikkeleita perinteisesti käytettyihin lämmönsiirtonesteisiin, jotta niiden lämmönjohtavuus parantuisi [2]. Idea ei kuitenkaan saanut paljoa huomiota, sillä silloin käytetyt partikkelit olivat suuruusluokaltaan milli- ja mikrometrin kokoluokkaa, ja ne aiheuttivat käytännön ongelmia, kuten tukkeutumista ja suuria painehäviöitä. Myöhemmin nanoteknologian kehittyttyä mahdollisuus valmistaa nanokokoisia partikkeleita vähensi aiempia käytännön ongelmia. Choi kutsui tutkimuksessaan [3] perinteisten jäähdytysnesteiden ja nanokokoisten metallipartikkelien suspensioita ”nanofluideiksi” ensimmäisen kerran vuonna 1995, jonka jälkeen nanofluidit ovat saaneet paljon lisää huomiota.

Tämän työn tarkoituksena on tarkastella nanofluidien ominaisuuksia, tutkia niiden soveltuvuutta elektroniikan jäähdytykseen, ja vertailla niitä perinteisesti käytettyihin lämmönsiirtonesteisiin. Nanofluidien eräs mahdollinen käyttökohde on mikrokanavaiset lämpönielut (engl. micro-channel heat sink), joita pidetään lupaavana tekniikkana tulevan sukupolven elektroniikan jäähdytyksessä. Nanofluidien käyttökelpoisuudesta mikrokanavaisissa lämpönieluissa on tehty viime aikoina paljon tutkimustyötä. [4] Tämän vuoksi nanofluidien sovelluskohteiden käsittely painottuu mikrokanavaisiin lämpönieluihin.

Johdannon jälkeen työn 2. luvussa tarkastellaan nanofluidien termofysikaalisten ominaisuuksien sekä lämmönsiirron teoriaa. Nanofluidien sovelluskohteisiin elektroniikan jäähdytyksessä keskitytään luvussa 3. Luvussa 4 vertaillaan nanofluideja perinteisesti käytettyihin lämmönsiirtonesteisiin. Lopuksi luvussa 5 tehdään johtopäätökset työssä tarkastelluista aiheista.

# 1. NANOFUIDIEN OMINAISUUDET

Nanofluidit koostuvat kantajanesteestä (engl. base fluid) ja kantajanesteeseen suspendoiduista kiinteistä nanopartikkeleista. Kantajanesteet ovat yleensä esimerkiksi vettä (W), etyleeniglykolia (EG), ionisia nesteitä tai yleisiä kylmäaineita. Partikkelit ovat yleensä metalleja, metallioksiedeja tai hiilen eri muotoja [5, s.1]. Nesteiden ja kiinteiden partikkelien suspensioiden parantuneet lämmönsiirto-ominaisuudet perustuvat partikkelien hyvään lämmönjohtavuuteen verrattuna kantajanesteen lämmönjohtavuuteen. Esimerkiksi huoneen lämpötilassa kuparin lämmönjohtavuus on noin 700-kertainen verrattuna veden lämmönjohtavuuteen [2].

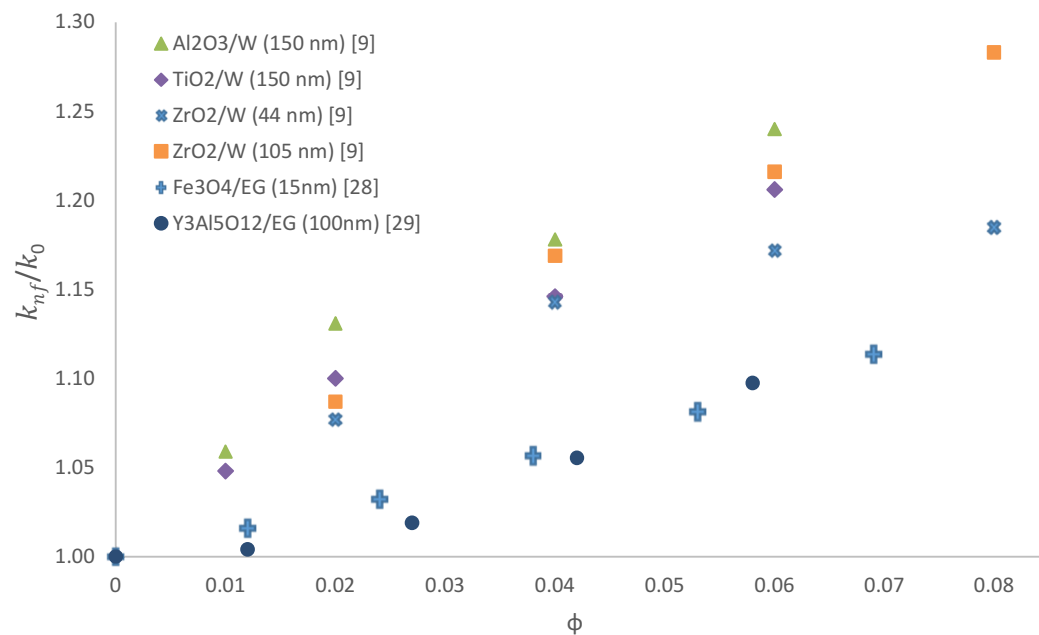
## 1.1 Termofysikaaliset ominaisuudet

Termofysikaaliset ominaisuudet, kuten tiheys, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, viskositeetti ja pintajännitys ovat tärkeitä termisten systeemien virtausten ja lämmönsiirron suorituskyvyn kannalta. Ennen kuin nanofluideja voidaan käyttää energiatehokkaasti lämmönsiirtosysteemeissä, pitää pystyä arvioimaan niiden termofysikaalisten ominaisuuksien muutoksia verrattuna kantajanesteeseen. [6] Nanofluidien termofysikaalisten ominaisuuksien arvioiminen on kuitenkin hankalaa. Ominaisuuksien muutokset riippuvat useasta parametrystä, kuten lämpötilasta, partikkelien tilavuusosuudesta, kantajanesteen ominaisuuksista, pH:sta, partikkelien materiaalista, muodosta ja koosta [7].

Nanofluidien joitakin ominaisuuksia, kuten tiheyttä, voidaan arvioida perinteisellä neste—kiinteä-seokselle pätevällä homogeenisella mallilla. Ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus ja viskositeetti, ovat kuitenkin monimutkaisempia ja ne muuttuvat arvaamattomasti. [6] Tutkijat ovat yrittäneet luoda sekä teoreettista että empiiristä suhdetta ominaisuuksiin vaikuttavien irrallisten parametrien välille. Monia teoreettisia malleja on tehty arvioimaan nanofluidien lämmönjohtavuutta sekä viskositeettia, mutta kokeellisia tuloksia vastaavaa kattavaa mallia ei ole onnistuttu kehittämään. Empiirisiä malleja on esitetty melko vähän verrattuna teoreettisiin malleihin rajoitetun saatavilla olevan datan vuoksi. [7]

## 1.2 Nanofluidien lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus on nanofluidien eräs mielenkiintoisimpia termofysikaalisia ominaisuuksia. Se määrittää, kuinka tehokkaasti fluidi voi poistaa lämpöä jäähdytettävästä laitteesta. Termofysikaalisista ominaisuuksista lämmönjohtavuus onkin saanut eniten huomiota tutkimuksissa viime vuosikymmenten aikana [6]. Monissa kokeellisissa tutkimuksissa on havaittu, että nanopartikkelit nostavat fluidin lämmönjohtavuutta merkittävästi [1]. Kuvassa 1 on esitetty kokeellisia arvoja eri nanofluidien dimensiottomalle lämmönjohtavuudelle eri tilavuusosuuksilla.



**Kuva 1.** Kokeelliset tulokset dimensiottoman lämmönjohtavuuden muuttumisesta tilavuusosuuden  $\phi$  funktiona erilaisille nanofluideille

Nanopartikkelien lisääminen kantajanesteeseen kasvattaa lämmönsiirtonesteen lämmönjohtavuutta merkittävästi (kuva 1). Nanofluideille mitatut lämmönjohtavuuden arvot ovat lisäksi usein paljon suurempia kuin mitä klassiset homogeenisen seoksen mallit ennustavat. Toisaalta osassa tutkimuksissa on mitattu myös pienempiä arvoja. Myös partikkelien kokoon ja lämpötilaan liittyvissä tuloksissa on ristiriitaisuutta. [5, s. 32]

Uusia lämmönsiirtomekanismeja on ehdotettu selittämään ristiriitaisia tuloksia, ja useita uusia malleja on kehitetty niiden perusteella. Ehdotettuja mekanismeja ovat muun muassa Brownin liikkeen aiheuttama lämmönsiirto, rajakerroksen muodostuminen kiinteä—neste-rajapinnalla ja partikkelien keskinäinen kasautuminen. Kattavia ja tarkkoja tuloksia

antavaa mallia nanofluidien lämmönjohtavuuden laskemiseksi ei ole kuitenkaan olemassa. [5, s.32]

### 1.3 Mallit lämmönjohtavuudelle

Klassiset heterogeenisten seosten lämmönsiirtoa käsittelevät teoriat kuten Maxwellin ja Hamilton—Crosserin mallit ennustavat fluidin lämmönjohtavuuden kasvamista partikkelien tilavuusosuuden kasvaessa [2, 8]. Hamilton—Crosserin esittämä klassinen malli kiinteäpartikkelisten seosten lämmönjohtavuudelle:

$$\frac{k_{nf}}{k_0} = \frac{k_p + \left(\frac{3}{\psi} - 1\right)k_0 + \left(\frac{3}{\psi} - 1\right)(k_p - k_0)\varphi_v}{k_p + \left(\frac{3}{\psi} - 1\right)k_0 - (k_p - k_0)\varphi_v}, \quad (1)$$

jossa  $k_{nf}$ ,  $k_p$  ja  $k_0$  ovat lämmönjohtavuudet nanofluidille, partikkelille ja kantajanesteelle tässä järjestyksessä. Suure  $\varphi_v$  on kiinteiden partikkelien tilavuusosuus, ja  $\psi$  kuvaa partikkelin pallomaisuutta. Täysin pallomaiselle partikkelille  $\psi = 1$ . [8] Pallomaiselle partikkelille yhtälö (1) sieventyy Maxwellin malliksi:

$$\frac{k_{nf}}{k_0} = \frac{k_p + 2k_0 + 2(k_p - k_0)\varphi_v}{k_p + 2k_0 - (k_p - k_0)\varphi_v}. \quad (2)$$

Maxwell kehitti mallin kuvaamaan mini- ja mikrokokoisten partikkelien suspensioiden lämmönjohtavuutta [2]. Kokeellisten tutkimustulosten mukaan malli ei kuitenkaan päde aina nanofluideilla, vaan saadut kokeelliset tulokset ovat usein mallin antamia tuloksia suurempia. Tyypillisesti ero kasvaa suuremmaksi partikkelikoon pientyessä [9]. Paremmiin kokeellisiin tuloksiin vastaavien arvojen saamiseksi pitää käyttää monimutkaisempia malleja.

Shukla et al. esittivät artikkelissaan [10] lämmönjohtavuudelle analyttisen mallin, joka ottaa huomioon Brownin liikkeen aiheuttaman lämmön siirtymisen

$$\frac{k_{nf}}{k_0} = (1 - \varphi_v) + \pi \left(\frac{6}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \varphi_v^{\frac{4}{3}} \left[ \frac{1 + 0,5 \left(\frac{6\varphi_v}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{2} \left(\frac{k_0}{k_p}\right) + \frac{\psi}{\text{Nu}} \right]^{-1}, \quad (3)$$

jossa Nu on Nusseltin luku. Ensimmäinen termi  $(1 - \varphi_v)$  kuvaa kantajanesteen tilavuusosuuden vaikutusta. Toisen termin hakasuluissa oleva osa kuvaa kiinteiden partikkelien lämmön johtumisen vaikutusta  $(k_0/k_p)$ , sekä partikkelien ja kantajanesteen välisen konvektion  $(\psi/\text{Nu})$  vaikutusta. Nusseltin luvulle ja Peclet'n luvulle Pe saadaan korrelaatio virtaukselle pallon ympärillä:



$$\text{Nu} = 2 + \frac{\text{Pe}}{2} + \frac{1}{4}\text{Pe}^2 \ln\left(\frac{\text{Pe}}{2}\right) + 0,2073\text{Pe}^2 + \frac{1}{16}\text{Pe}^3 \ln\left(\frac{\text{Pe}}{2}\right). \quad (4)$$

Yhtälö (4) pätee, kun  $\text{Pe} < 1$  ja Reynoldsin luku  $\text{Re} \ll 1$ . Nämä ehdot täyttyvät nanofluidin ollessa makroskooppisesti staattisessa tilassa. Dimensioton Peclet'n luku saadaan kaavasta  $\text{Pe} = \text{RePr}$ , jossa Reynoldsin luku

$$\text{Re} = \frac{u_p d_p}{\nu_0} \quad (5)$$

ja Pr on Prantldtin luku

$$\text{Pr} = \frac{\nu_0}{\alpha_0} \quad (6)$$

Suureet  $\nu_0$  ja  $\alpha_0$  ovat kantajanesteen kinemaattinen viskositeetti ja terminen diffusiviteetti. Suure  $d_p$  on kiinteän partikkelin halkaisija ja  $u_p$  nopeus, joka saadaan laskettua pallon muotoiselle partikkelille kaavalla

$$u_p = \sqrt{\frac{18k_b T_{nf}}{\pi d_p^3 \rho_p}}, \quad (7)$$

jossa  $k_b$  on Boltzmannin vakio ( $k_b = 1,3806488 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ).  $T_{nf}$  on nanofluidin lämpötila,  $\rho_p$  on kiinteän partikkelin tiheys. [10]

Garosi esitti artikkelissaan [11] saatavilla olevaan kokeelliseen dataan perustuvan empirisen mallin lämmönsiirtokerroimen laskemiseksi

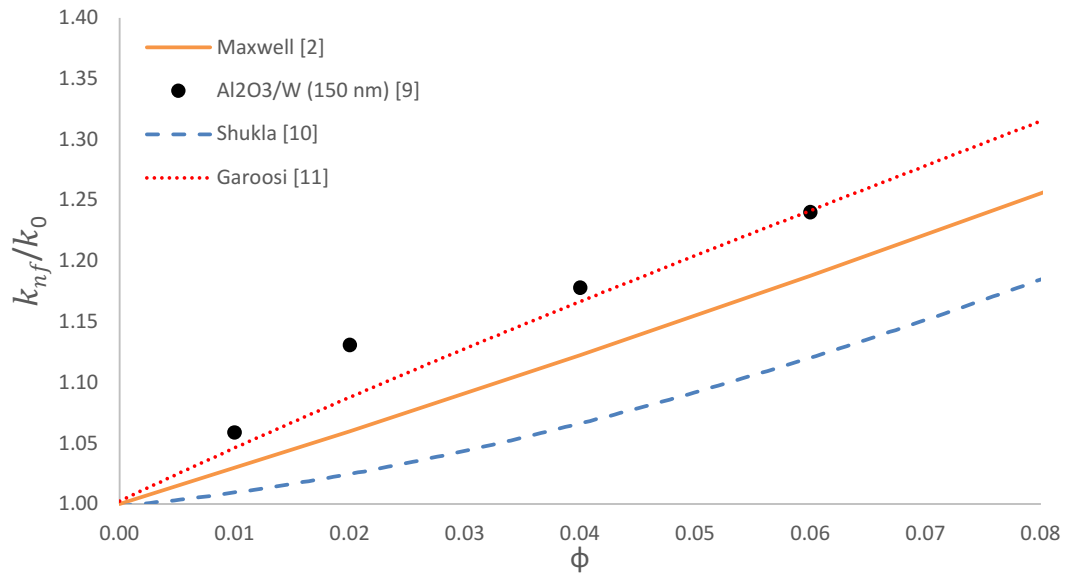
$$\frac{k_{nf}}{k_0} = \frac{k_p + 2k_0 + 2(k_p - k_0)\phi_v}{k_p + 2k_0 - (k_p - k_0)\omega\phi_v} + 3,762 \left(\frac{T_{nf}}{T_0}\right)^{8,661} \left(\frac{d_p}{d_0}\right)^{-0,4351} \left(\frac{k_p}{k_0}\right)^{0,08235} \phi_v^{0,64} e^{(-5,742\phi_v)}, \quad (8)$$

jossa  $T_0$  on referenssilämpötila (293 K),  $\omega$  on korrelaatiokerroin, joka saadaan laskettua kaavalla  $\omega = (1 + 0,8946\phi_v)$  ja  $e$  on Neperin luku. Kaavassa  $d_0$  on kantajanesteen molekyylin ekvivalentti halkaisija, joka saadaan kaavasta

$$d_f = 0,1 \left( \frac{6M}{N\pi\rho_{ref,0}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

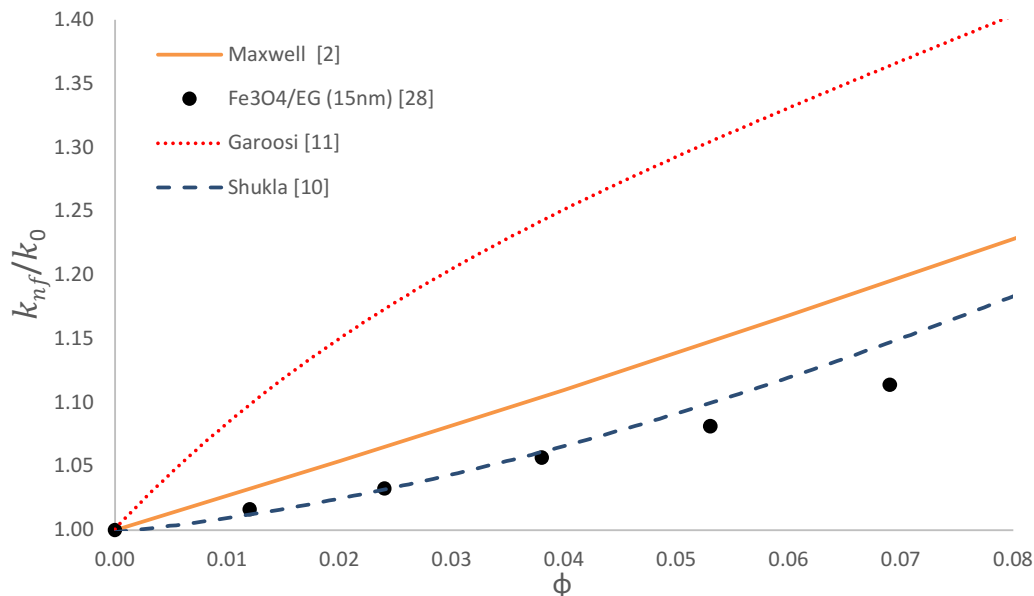
jossa  $M$  on kantajanesteen moolimassa,  $N$  on Avogadron luku ( $N = 6,022 \cdot 10^{23}$ ) ja  $\rho_{ref,0}$  on kantajanesteen tiheys referenssilämpötilassa ( $T_{ref} = 293 \text{ K}$ ). [11] Malli muistuttaa hyvin paljon Maxwellin mallia, mutta se ottaa huomioon enemmän lämmönjohtavuuteen vaikuttavia parametreja.

Kuvissa 2 ja 3 on esitetty eri mallien antamat arviot ja kokeelliset tulokset dimensiottomalle lämmönjohtavuudelle.



**Kuva 2.** Kokeelliset ja eri mallien ennustamat arvot dimensiottomalle lämmönjohtavuudelle 150 nanometristen alumiinioksidipartikkelien ja veden suspensiolle

Alumiinioksidipartikkeleilla saadut arvot ovat suurempia kuin Maxwellin mallin ennustamat arvot. Garoosin empiirinen malli puolestaan vastaa kokeellisia tuloksia melko hyvin. Alumiinioksidipartikkeleilla saadut Maxwellin mallia suuremmat lämmönjohtavuuden kokeelliset arvot ovat hyvin tyypillisiä tuloksia nanofluideilla.



**Kuva 3.** Kokeelliset ja eri mallien ennustamat arvot dimensiottomalle lämmönjohtavuudelle 15 nanometrinen rautaoksidipartikkelien ja etyleeniglykolin suspensiolle

Rautaoksidipartikkeleilla saadut arvot ovat poikkeuksellisesti pienempiä kuin Maxwellin mallin ennustamat arvot. Garoosin malli ennustaa, että lämmönjohtavuus olisi suurempi kuin alumiinioksidipartikkeleilla. Shuklan malli puolestaan onnistuu kuvaamaan rautaoksidipartikkeleilla saatuja arvoja melko hyvin.

#### 1.4 Nanofluidien virtaus ja lämmönsiirto mikrokanavassa

Nanofluidien tutkitut käytännön sovellukset ovat tyypillisesti virtaussysteemejä, kuten mikrokanavaisia lämpönieluja. Mikrokanavaisen lämpönielun pienten dimensioiden ja nanofluidien termofysikaalisten ominaisuuksien vuoksi virtauksen Reynoldsin luku pysyy usein pienenä ( $Re < 2000$ ). Pienillä Reynoldsin luvuilla virtaukset pysyvät laminaarilla alueella. Tämän vuoksi virtauksen ja lämmönsiirron teoreettinen tarkastelu rajataan laminaariin virtaukseen.

Mikrokanavavirtauksessa fluidi pumpataan virtauskanavan läpi, jolloin lämmönsiirto tapahtuu pakotetulla konvektiolla. Konvektiivisen lämmönsiirron lämpövirrantiheys saadaan yhtälöllä

$$q = h(T_w - T_f), \quad (10)$$

jossa  $T_w$  on lämmönsiirtopinnan lämpötila,  $T_f$  on virtaavan fluidin lämpötila ja  $h$  on lämmönsiirtokerroin. [12, s. 227] Täysin kehittyneellä laminaarilla virtauksella lämmönsiirtokerroin  $h$  ei ole riippuvainen Reynoldsin luvusta. Nusseltin luku virtaukselle kanavassa saadaan laskettua kaavalla

$$\text{Nu} = \frac{hD_h}{k}, \quad (11)$$

jossa  $D_h$  on virtauskanavan hydraulinen halkaisija. [13, s.4] Suuri lämmönsiirtokerroin tai suuri Nusseltin luku viittaa suureen lämpövirtaan termisessä systeemissä [12, s. 227].

Useiden tutkimusten mukaan nanopartikkelit tyypillisesti parantavat lämmönsiirron tehokkuutta virtaussysteemeissä [1,14,15]. Tutkimuksissa on havaittu, että nanofluidien mitattu lämmönsiirtokerroin on suurempi kuin arvot, jotka ennustettiin asiaankuuluvilla yhtälöillä lasketuille Nusseltin luvuille. Vaikka nanofluidien parantunut lämmönjohtavuus otetaan huomioon, eroja havaitaan silti. [12, s. 243] Li ja Xuan esittivät tutkimuksessaan [16] useita parametrejä sisältävän mallin nanofluidin Nusseltin luvulle  $\text{Nu}_{nf}$  laminaarille virtaukselle

$$\text{Nu}_{nf} = 0,4328(1 + 11.285\phi^{0,754}\text{Pe}_p^{0,218})\text{Re}_{nf}^{0,333}\text{Pr}_{nf}^{0,4}, \quad (12)$$

jossa  $\text{Re}_{nf}$  ja  $\text{Pr}_{nf}$  ovat Reynoldsin ja Prandtin luvut nanofluidille. Suure  $\text{Pe}_p$  on Peclet'n luku partikkelille.

Virtauskanavassa tapahtuva painehäviö  $\Delta p$  virtauskanavan pituutta kohden saadaan kaavalla

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{f}{D_h} \frac{\rho u^2}{2}, \quad (13)$$

jossa  $L$  on virtauskanavan pituus,  $u$  on virtauksen keskinopeus ja  $f$  on Fanningin kitkakerroin ja  $\rho$  on virtaavan fluidin tiheys. Nanofluideille kokeellisesti mitatut painehäviöt vastaavat hyvin kaavan (12) antamia arvoja. [15] Nanofluidin keskimääräinen tiheys voidaan laskea Michaelidesin [12, s.92] mukaan kaavalla

$$\rho_{nf} = \rho_p\phi + \rho_0(1 - \phi). \quad (14)$$

Fanningin kitkakertoimen arvo riippuu virtausolosuhteista, virtauskanavan seinien geometriasta ja reunaehdoista. Täysin kehittyneelle laminaarille virtaukselle  $f \cdot \text{Re}$  on vakio, jonka arvo riippuu virtauskanavan geometriasta [13]. Shah ja London esittivät [17] yhtälön kitkakertoimen ja Reynoldsin luvun tulolle suorakaiteen muotoiselle kanavalle, jonka lyhyt sivu on  $a$ , ja pitkä sivu on  $b$

$$f\text{Re} = 24(1 - 1,3553\alpha_c + 1,9467\alpha_c^2 - 1,7012\alpha_c^3 + 0,9564\alpha_c^4 - 0,2537\alpha_c^5), \quad (15)$$

jossa  $\alpha_c$  on kanavan sivusuhte  $\alpha_c = a/b$ .

Haque et al. mukaan [15] nanofluidin virtaukselle kanavassa Reynoldsin luku saadaan seuraavalla kaavalla

$$\text{Re} = \frac{\rho_{nf} u D_h}{\mu_{nf}} \quad (17)$$

ja Peclet'n luku kaavalla

$$\text{Pe} = \frac{\rho_{nf} C_{p,nf} u D_h}{k_{nf}}, \quad (16)$$

jossa  $u$  on virtauksen keskinopeus,  $C_{p,nf}$  on nanofluidin ominaislämpö vakiopaineessa ja  $\mu_{nf}$  on nanofluidin dynaaminen viskositeetti.

Viskositeetti on yksi tärkeimmistä termofysikaalisista ominaisuuksista käytännön sovelluksissa, sillä se vaikuttaa suoraan pakotetun konvektion painehäviöihin. Viskositeetilla on myös merkittävä vaikutus konvektiiviseen lämmönsiirtoon. [15] Kirjallisuudesta löytyy useita malleja dynaamisen viskositeetin laskemiseksi. Eräs malli viskositeetin arvioimiseksi on Garoosin [11] empiirinen malli:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_0} = 1 + 49,6 \left( \frac{d_p}{d_f} \right)^{-0,414} \phi^{0,908} e^{(10,8\phi)}. \quad (18)$$

Nanofluidien viskositeettiin liittyen on tehty paljon kokeellista tutkimusta. Kokeelliset mitatut dynaamisen viskositeetin arvot ovat usein poikkeuksellisen suuria. [15]

Useimpien kokeellisten tutkimusten mukaan vaikuttaa siltä, että Nusseltin luvussa on enemmän lisäkasvua nanopartikkelien tilavuusosuuden kasvaessa. Tämä trendi on kuitenkin vaikea todentaa kvantitatiivisesti tutkimustulosten suuren vaihtelun vuoksi. Kokeellisissa tutkimuksissa mitatut Nusseltin luvun arvot ovat kuitenkin yhdenmukaisesti suurempia kuin kaavalla (11) saatavat arvot. Tämä viittaa siihen, että erillään nanofluidien kasvaneesta lämmönjohtavuudesta, lisäkasvua on myös lämmönsiirtokertoimessa. [12, s. 244—245]

Todennäköisin syy kokeellisissa tutkimuksissa havaitulle lämmönsiirtokertoimen kasvulle on ohimenevää hiukkasta seuraavan fluidin ja Brownin liikkeen aiheuttama mikro-advectio nanofluidissa. [12, s. 245] Poikkeuksellisen suurten Nusseltin lukujen trendi on lämmönsiirron tehostamisen kannalta lupaava, mutta sen taustalla olevien syiden ymmärtäminen olisi tärkeää nanofluidien lämmönsiirto-ominaisuuksien ennakoimisen kannalta.

## 2. NANOFUIDIEN SOVELLUKSET

Eräs lupaava tekniikka vastaamaan elektroniikan kasvavia jäähdytysvaatimuksia on mikrokanavaiset lämpönielut [1]. Nanofluidit voisivat parantaa mikrokanavaisten lämpönielujen jäähdytyskykyä suuren lämmönjohtavuutensa ansiosta. Muita mahdollisia nanofluidien sovelluskohteita elektroniikan jäähdytyksessä ovat muun muassa lämpöputket ja kaupalliset jäähdyttimet, joita käsitellään seuraavissa luvuissa.

### 2.1 Mikrokanavaiset lämpönielut

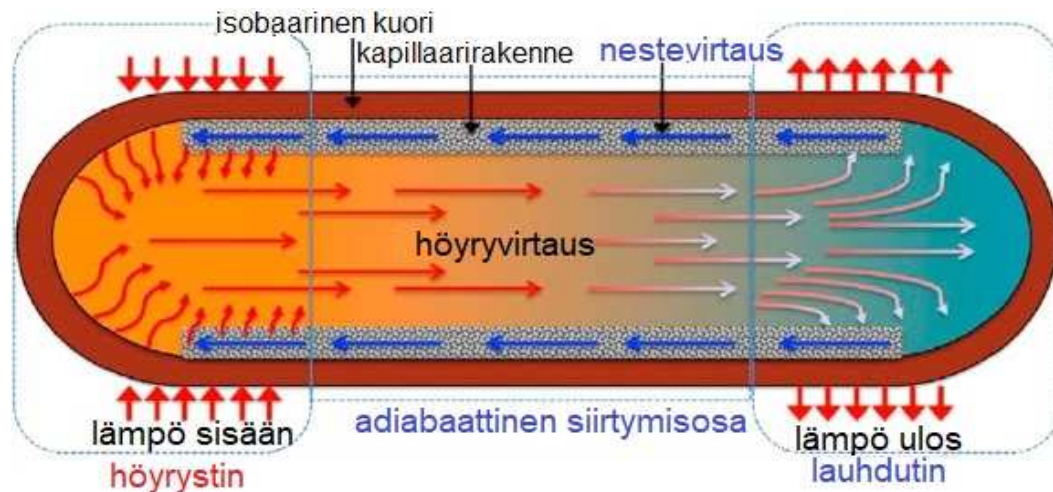
Laminaarille virtaukselle pienessä kanavassa lämmönsiirtokerroin on kääntäen verrannollinen virtauskanavan hydrauliseen halkaisijaan. Lämmönsiirtokertoimelle saadaan siis suurempia arvoja pienentämällä virtauskanavan dimensioita. Mikrokanavaisen lämpönielun korkea lämmönsiirtokerroin sekä suuri lämmönsiirtopinta-ala suhteessa lämmönsiirtimen tilavuuteen mahdollistavat erittäin tehokkaan jäähdytysjärjestelmän. Tuckerin ja Peace esittivät tämän perusteella korkean suorituskyvyn mikrokanavaisen lämpönielun vuonna 1981 [18]. Heidän tutkimuksensa [18] mukaan mikrokanavainen lämpönielu kykeni jäähdyttämään hyvin korkeita lämpövirrantiheyksiä. Jopa  $790 \text{ W/cm}^2$  lämpövirrantiheys saatiin hävitettyä käyttämällä vettä jäähdytysnesteenä.

Suurin rajoite mikrokanavaisissa jäähdytysjärjestelmissä tulee perinteisesti käytettyjen jäähdytysnesteidän suhteellisen pienestä lämmönjohtavuudesta. Täten nanofluidien erinomainen lämmönjohtavuus voisi parantaa mikrokanavaisten järjestelmien tehokkuutta merkittävästi. [1] Nanofluidien termisestä suorituskyvystä mikrokanavissa on tehty useita kokeellisia sekä numeerisia tutkimuksia. Tutkimusten mukaan nanofluideilla voidaan parantaa mikrokanavaisten lämpönielujen suorituskykyä. Colangelo et al. kokoamien kokeellisten tutkimusten [19] mukaan mitatut parannukset lämmönsiirtokertoimessa vaihtelivat 9–72 %:n välillä. Tuloksissa on paljon vaihtelua, sillä virtauskanavan geometria vaikuttaa voimakkaasti lämmönsiirron tehokkuuteen käytetyn lämmönsiirtofluidin lisäksi.

Nanofluidit mikrokanavaisissa lämpönieluissa on mahdollinen tekniikka elektroniikan jäähdytykseen tulevaisuudessa. Tutkimustyö aiheesta vaikuttaa kuitenkin olevan vielä melko alkuvaiheessa. Lupaavista tuloksista huolimatta esimerkiksi pitkäaikaisen käytön ongelmista, kuten tukkiutumista ja korroosiosta, on saatavilla huonosti tietoa avoimesta kirjallisuudesta.

## 2.2 Lämpöputki

Lämpöputki on lämmönsiirrin, joka hyödyntää lämmönsiirtofluidin faasimuutosta tehokkaan lämmönsiirron saavuttamiseksi. Hyvän tehokkuuden, robustisuuden ja passiivisen toimintaperiaatteen ansiosta lämpöputki on lupaava tekniikka elektronikan jäähdyttämiseksi. Lämpöputkia on jo käytössä kaupallisissa sovelluksissa, esimerkiksi kannettavien tietokoneiden prosessorien jäähdyttiminä [1]. Kuvassa 4 on esitetty lämpöputken toimintaperiaate.



**Kuva 4.** Lämpöputken toimintaperiaate, muokattu lähteestä [14].

Tutkimus nanofluidien hyödyntämisestä lämpöputkissa on vielä alkuvaiheessa ja se on ollut pääasiassa kokeellista. Lämpöputken koko, tyyppi, operointitila, sekä nanofluidin ominaisuudet vaihtelevat paljon tutkimusten välillä, joten tutkimustulosten vertailu on hankalaa. Suurimmassa osassa kokeista havaittiin, että nanopartikkeleilla voidaan parantaa lämpöputkien lämmönsiirtoa, mutta myös negatiivisia muutoksia lämmönsiirtokertoimessa ilmeni. Teoria ei pysty kuvaamaan tarkasti saatuja tutkimustuloksia ja nanofluidien kiehumisen lämmönsiirtomekanismeissa on vielä epäselvyyksiä. [20] Epäselvyyksien vuoksi nanofluidien käytön vaikutusta lämpöputken toimintaan on hankala arvioida, ja lisää tutkimusta vaaditaan paremman ymmärryksen saavuttamiseksi.

Lämpöputket ovat mahdollinen sovelluskohde nanofluideille tulevaisuudessa, mutta pitkäaikaisesta käytöstä ei ole tehty riittävästi tutkimusta. Tulevaisuuden tutkimusten pääasiallisena tarkoituksena on löytää optimaaliset nanofluidit (partikkelikoko, konsentraatio, materiaalit) lämpöputkille, sekä selvittää eri operointiparametrien, kuten operointilämpötilan, lämpövirran tiheyden ja ympäristön lämpötilan vaikutus lämmönsiirron parantamiseen [20]. Kiehumisen lämmönsiirtomekanismien ymmärtäminen on tärkeää nanofluidien faasimuutosta hyödyntävien sovellusten kannalta.

### 2.3 Kaupalliset jäähdyttimet

Muutamissa tutkimuksissa nanofluideja on käytetty suoraan kaupallisesti saatavilla olevien prosessorijäähdyttimien lämmönsiirtonesteenä. Tutkimustulokset ovat lupaavia, sillä nanofluideilla mitattiin parempaa jäähdytystehoa kuin perinteisillä jäähdytysnesteillä. Nanofluidien käyttöön liittyviä suuria ongelmia ei havaittu lyhytaikaisissa kokeissa. [1, 19]

Robertsin ja Walkerin kokeellisessa tutkimuksessa [21] ThermalTake Bigwater 760is –jäähdyttimen suorituskykyä tarkasteltiin, kun tislattuun veteen lisättiin halkaisijaltaan 10 nm, 20–30 nm ja 150 nm alumiinipartikkeleita. Tutkimuksissa mitattiin noin 20 % paranus lämmönjohtuvuudessa 20–30 nm partikkeleilla verrattuna ionisoituun veteen. Vaaditun pumppaustehon kasvu oli vähäistä ja tulokset vastasivat hyvin kontrolloiduissa koejärjestelyissä saatuja.

Perinteisiä jäähdytysnesteitä ei voi kuitenkaan korvata suoraan nanofluideilla paremman lämmönsiirron saavuttamiseksi. Elektroniikan jäähdytyssysteemien termistä suunnittelua pitää muokata nanofluideille sopivaksi. Jäähdytyssysteemit pitää suunnitella uudelleen pitäen mielessä nanofluidien omalaatuiset ominaisuudet. [19] Nanofluideille soveltuvien jäähdytyssysteemien suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota erityisesti pitkäaikaiseen käyttöön, sillä kaupallisilta jäähdytyslaitteilta oletetaan luotettavaa toimintaa pitkällä aikavälillä.



### 3. VERTAILU PERINTEISESTI KÄYTETTYIHIN LÄMMÖNSIIRTONESTEISIIN

Aiemmin käsiteltyjen tutkimustulosten mukaan nanofluidit ovat usein termofysikaalisilta ominaisuuksiltaan parempia lämmön poistamiseen kuin perinteisesti käytetyt lämmönsiirtonesteet. Nanofluidien käyttämiseen elektroniikan jäähdytyksessä liittyy kuitenkin tekijöitä, joissa nanofluidit häviävät vielä perinteisesti käytetyille lämmönsiirtonesteille. Näitä tekijöitä käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

#### 3.1 Painehäviöt

Kiinteiden partikkelien lisääminen nesteeseen kasvattaa nesteen viskositeettia tyypillisesti. Kasvanut viskositeetti johtaa suurempiin painehäviöihin, jolloin virtaussysteemi vaatii lisää pumppaustehoa nesteen kierrättämiseksi. [14] Painehäviöihin on tärkeää kiinnittää huomiota erityisesti mikrokanavaisissa lämpönieluissa. Niissä olevien virtauskanavien pienen hydraulisen halkaisijan vuoksi painehäviöt voivat kasvaa hyvin suuriksi.

Jäähdytykseen vaadittava pumppausteho määrittää lämpönielun toimintaan tarvittavan energiankulutuksen. Lämpönielujen toiminnan muokkausta lämmönsiirron parantamiseksi, kuten lämmönsiirtonesteen vaihtamista nanofluidiksi, tulisi aina tarkastella myös energiankulutuksen kannalta. [22] Kasvanut nettoenergiakulutus aiheuttaa lisää hukkalämpöä ja kustannuksia verrattuna perinteisiin jäähdytysnesteisiin. Erityisesti kaupallisissa sovelluksissa tämä ei ole toivottavaa.

Nanofluidien painehäviöistä pienikanavaisissa virtauksissa on tehty sekä kokeellista että numeerista tutkimusta. Tutkimustulokset nanofluidien painehäviöistä verrattuna kantajanesteisiin ovat melko epäyhdenmukaisia. Kokeellisissa tutkimuksissa vaaditun pumppaustehon kasvusta on havaittu sekä merkityksettömän pientä kasvua että huomattavaa kasvua (noin 15%) verrattuna kantajanesteeseen. [22] Painehäviöiden suuruus riippuu monesta tekijästä, kuten nanofluidien ominaisuuksista, lämpötilasta, virtauskanavan materiaalista ja konfiguraatiosta. Laajempaa kokeellista ja numeerista tutkimusta vaaditaan, jotta nanofluidien painehäviöitä voitaisiin ennakoida tarkasti.

#### 3.2 Kustannukset

Nanopartikkelien valmistuskustannukset ovat korkeita, sillä materiaalikustannusten lisäksi valmistus vaatii tarkkaan kontrolloituja olosuhteita ja erikoistunutta laitteistoa [12,

s. 314.]. Partikkelien lisääminen kantajanesteeseen siis nostaa lämmönsiirtofluidin hintaa huomattavasti. Elektroniikan jäähdytyksessä vaadittavat nestemäärät ovat kuitenkin tavallisesti pieniä, joten nanofluidien käyttäminen voi olla taloudellisesti perusteltua. Nanofluidien käytön kustannusten analysoiminen on kuitenkin hankalaa vähäisen aiheesta saatavilla olevan tutkimuksen vuoksi.

Nanofluidin valinnalla on suuri merkitys, sillä niiden hinnoissa on suuria eroja riippuen käytetyistä materiaaleista ja valmistustavoista. Esimerkiksi alumiinioksidia sisältävän nanofluidin partikkelit ( $\varphi_v = 0,02$ ) maksavat noin 45 \$ litraa kohden, kun taas hiilinanoputkia (engl. carbon nanotube) sisältävän nanofluidin partikkelit ( $\varphi_v = 0,02$ ) maksavat noin 250—3500 \$ litraa kohden. Valmiin nanofluidin hintaan pitää lisätä myös valmistus- ja stabilointikustannukset partikkelien hinnan lisäksi. [12, s. 314]

Hinta—suorituskyky-analyysin perusteella oksideja sisältävät nanofluidit ovat kustannustehokkaampia verrattuna metalleista ja hiilinanoputkista valmistettuihin nanofluideihin. Oksidieja sisältävien nanofluidien termofysikaaliset ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus, ovat kuitenkin usein huonompia verrattuna esimerkiksi hiilinanoputkia sisältäviin nanofluideihin. [23,24] Oksidieja käyttämällä lämmönsiirron tehostaminen jää helposti vähäiseksi. Nanofluidin hyödyn jäädessä vähäiseksi on mahdollista, että sama hyöty voitaisiin saavuttaa esimerkiksi jäähdyttimen konfiguraation muokkauksella. Oksidipartikkelit vaikuttavat kuitenkin olevan tällä hetkellä suosituimpia partikkeleita kokeellisissa tutkimuksissa.

Nanofluidien valmistuksessa pienempiä partikkeleita käyttämällä saadaan tyypillisesti suurempi lämmönjohtavuus, mutta se ei ole välttämättä taloudellisesti kannattavaa. Mitä pienempi partikkelikoko, sitä suuremmat partikkelien valmistuskustannukset ovat nykyisillä valmistusmenetelmillä. [23] Suurikokoisiin ja edullisempiin partikkeleihin liittyy suurempi tukkiutumisen riski, ja mahdollisesti suuremmat painehäviöt. Tehokkaan lämmönsiirron ja luotettavuuden kannalta optimaalisen partikkelikoon löytämiseksi pitää siis huomioida useita tekijöitä.

Myös kiinteiden partikkelien tilavuusosuuden kasvattaminen parantaa nanofluidien lämmönjohtavuutta, mutta tällöin myös materiaalikustannukset kasvavat. Painehäviöissä ja tukkiutumisessa saattaa ilmetä ongelmia tilavuusosuuden kasvaessa. Mukherjee et al. tekemässä tutkimuksessa [25] vertailtiin  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —vesi-nanofluidien hinta—suorituskyky-indeksiä eri tilavuusosuuksilla (0,01—0,1 V-%). Tutkimuksessa havaittiin, että paras arvo hinta—suorituskyky-indeksille saatiin pienimmällä tilavuusosuudella ( $\varphi_v = 0,01$ ) ja indeksin arvo laskee tilavuusosuuden kasvaessa. Tutkimuksen mukaan partikkelien tilavuusosuuden kasvattaminen ei siis ole taloudellisesti kannattavaa  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -partikkeleilla.

### 3.3 Nanofluidien käytännön ongelmat ja riskit

Eräs nanofluidien laaja-alaista käyttöä suuri rajoittava tekijä on niiden epästabiilius. Lämmönsiirtonesteiden tulee toimia luotettavasti ja pitkiä aikoja yhtäjaksoisesti. Kantajanesteessä olevat nanopartikkelit muodostavat rykelmiä ja kasautumia usein jo muutamassa tunnissa valmistuksen jälkeen. Partikkelien kasautumisen vuoksi nanofluidin lämmönsiirto-ominaisuudet muuttuvat ajan kuluessa, mikä tekee nanofluidista helposti hyvin epäluotettavan lämmönsiirtonesteen. [12, s. 324]

Nanofluidien tulee olla stabiileja pitkällä aikavälillä, jotta niitä voidaan käyttää tehokkaasti kaupallisissa sovelluksissa. Pitkäaikaisen stabiiliuden saavuttaminen on suurimpia ratkaistavia ongelmia ennen kuin perinteiset jäähdytysnesteet voidaan korvata nanofluideilla. Nanopartikkelien taipumus kasautumien muodostamiseen tulee poistaa, jotta nanofluideja voidaan pitää stabiilina [26]. Nanofluidien pitkäaikaisesta stabiiliudesta on saatavilla heikosti kirjallisuutta.

Partikkelien muodostamat suuret kasautumat voivat johtaa partikkelien saostumiseen kantajanesteessä [26]. Saostuman muodostuminen on keskeinen ongelma erityisesti sovelluksissa, joissa tapahtuu höyrystymistä, kuten lämpöputkissa. Kantajanesteen höyrystyessä kiinteät nanopartikkelit saostuvat höyrystimeen hyvin suurella todennäköisyydellä tukkien virtauskanavan. [12, s. 325] Saostuman muodostuminen on erittäin haitallista myös mikrokanavaisissa lämpönieluissa. Kanavan pienten dimensioiden vuoksi se tukkiutuu hyvin helposti, joka saattaa johtaa virtauskanavan kuivumiseen ja jäähdytettävän laitteen ylikuumenemiseen.

Nanofluidien vaikutukset ympäristölle ja terveydelle ovat heikosti tunnettuja. Pitkäaikaista tutkimusta näistä aiheista ei ole vielä tehty, sillä nykyinen nanoteknologia on ollut olemassa vain muutamia vuosikymmeniä. Maurer-Jones et al. artikkelin [27] mukaan kolme suurinta haastetta nanofluidien ympäristö- ja terveysvaikutusten ymmärtämiseksi ovat:

- 1) Funktionaalisen tason selvitys nanopartikkelien myrkyllisyydestä kompleksisissa ekosysteemeissä.
- 2) Tunnistaa keinotekoisesti valmistetut nanomateriaalit, jotka ovat kemialliselta koostumukseltaan samankaltaisia kuin luonnosta löytyvä pienhiukkasaines.
- 3) Nanopartikkelien karakterisointi kompleksisessa, luonnollisessa ympäristössä ottaen huomioon luonnolliset olosuhteet, joiden tiedetään muokkaavan nanopartikkelien ominaispiirteitä.

Parempi tietämys näistä aiheista edellyttää laaja-alaista ja pitkäaikaista tutkimusta. Mahdolliset tuntemattomat ympäristö- ja terveyshaitat rajoittavat nanofluidien kehitystä ja kaupallistumista. Yritykset eivät halua ottaa riskiä nanofluidivuodosta, joka voisi aiheuttaa vakavaa ympäristö- tai terveysvahinkoa. [12, s. 326]

Kokonaisvaltainen tutkimus nanofluideista on vielä melko alkuvaiheessa ja niihin liittyvästä teoriasta ei ole täydellistä ymmärrystä. Tutkimuksissa käytetyt koejärjestelyt ovat usein epäyhdenmukaisia ja irrallisia, mikä tekee tulosten vertailusta haastavaa. Ominaisuuksien systemaattinen ja laaja testaus voisi johtaa parempaan ymmärrykseen nanofluideista. Tämä olisi hyvin tärkeää erityisesti kaupallisille sovelluskohteille.

Tällä hetkellä saatavilla olevan kirjallisuuden perusteella vaikuttaa siltä, että halvimmilla nanofluidilla saavutettavat hyödyt ovat vähäisiä ja vastaavat hyödyt voisi olla saavutettavissa myös konfiguraation muokkauksella. Tämä ei motivoi laitevalmistajia kehittämään nanofluideille soveltuvaa laitteistoa ja teettämään vaadittavaa tutkimusta. Nanoteknologian kehittyessä nanofluidien valmistuskustannukset saattavat laskea ja laatu parantua. Laadukas massatuotanto ja parempi ymmärrys nanofluidien lämmönsiirtomekanismeista ja mahdollisista haitoista voi lisätä nanofluidien suosiota merkittävästi laitevalmistajien keskuudessa tulevaisuudessa.

## 4. JOHTOPÄÄTÖKSET

Nanofluidien nopeasti kasvaneen suosion myötä useassa tutkimuksessa on saatu lupaavia arvoja nanofluidien lämmönsiirto-ominaisuuksille, kuten lämmönjohtavuudelle ja lämmönsiirtokertoimelle. Oksidipartikkeleilla mitatut parannukset lämmönsiirtokertoimessa vaihtelivat tyypillisesti 0—30 %:n välillä. Tuloksiin liittyy kuitenkin ristiriitaisuuksia, eikä niitä ei osata selittää tarkasti nykyisellä teorialla. Saadut tulokset ovat tyypillisesti suurempia kuin klassisten teorioiden ennustamat arvot. Uusia lämmönsiirtomekanismeja on ehdotettu selittämään poikkeuksellisia tuloksia. Nanofluidien todellisissa lämmönsiirtomekanismeissa on epäselvyyksiä, jonka vuoksi nanofluidien ominaisuuksien muutosten tarkka ennakointi on hyvin hankalaa. Tämän ongelman ratkaiseminen on tärkeää, jotta nanofluideja voitaisiin käyttää luotettavasti käytännön sovelluksissa.

Mikrokanavaiset lämpönielut ovat mahdollinen sovelluskohde nanofluideille tulevaisuudessa. Perinteisesti käytettyjen lämmönsiirtonesteiden huono lämmönjohtavuus on suuri rajoite lämmönsiirtimen tehokkuudelle. Nanofluidien käyttö mikrokanavaisissa lämpönieluissa voisi mahdollistaa tehokkaamman jäähdytyksen. Kokeellisissa tutkimuksissa on mitattu jopa yli 70 % tehokkaampaa lämmönsiirtoa verrattuna perinteisiin lämmönsiirtonesteisiin, ja lyhytaikaisessa käytössä suuria ongelmia ei ole ilmennyt. Myös lämpöputkilla ja kaupallisilla jäähdyttimillä on mitattu parantunutta lämmönsiirtokykyä. Lämpöputkilla saostuman muodostuminen voi kuitenkin muodostua helposti ongelmaksi laitteessa tapahtuvan höyrystymisen vuoksi.

Suurimmat haasteet nanofluidien menestymiselle elektroniikan jäähdytyksessä ovat pitkäaikaisen stabiiliuden saavuttaminen, luotettavuus, painehäviöt, taloudelliset haasteet sekä mahdollisten ympäristö- ja terveyshaittojen selvittäminen. Nanofluidit muodostavat kasautumia ja rykelmiä usein jo muutamassa tunnissa valmistuksen jälkeen. Painehäviöissä on paljon vaihtelua ja niiden suuruus riippuu useasta tekijästä. Kokeellisissa tutkimuksissa on havaittu tyypillisesti alle 15 %:n kasvu painehäviöissä. Nanopartikkelien hinnoissa on paljon vaihtelua, joten käytetyt raaka-aineet vaikuttavat merkittävästi nanofluidin hintaan. Kustannuksia arvioitaessa tulee huomioida myös partikkelikoko, partikkelien tilavuusosuus sekä valmistus- ja stabilointikustannukset. Oksidipartikkelit ovat tällä hetkellä edullisimpia ja suosituimpia, mutta niillä saavutettava hyöty jää usein vähäiseksi.

Nanofluidien laaja-alainen hyödyntäminen elektroniikan jäähdytyksessä edellyttää vielä paljon kattavaa ja systemaattista tutkimusta. Jatkotutkimuksessa on tärkeää keskittyä

nanofluidien pitkäaikaisen käytön haittapuoliin termisen suorituskyvyn lisäksi. Pitkäaikaisen käytön mahdollisten ongelmien tiedostaminen, parempi teoriaymmärrys ominaisuuksien ennakoimiseksi, pitkäaikainen stabiilius ja alhaisemmat valmistuskustannukset ovat edellytyksiä nanofluidien menestymiselle.

# LÄHTEET

- [1] Sohel Murshed SM, Nieto de Castro, C. A. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;78:821-833.
- [2] Maxwell JC. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover Publications, New York, 1981. [Republication of the 3rd Clarendon Press ed. of 1891.]
- [3] Choi SUS, Eastman J. *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles.* ; 1995.
- [4] Chamkha AJ, Molana M, Rahnama A, Ghadami F. On the nanofluids applications in microchannels: A comprehensive review. *Powder Technol* 2018;332:287-322.
- [5] Murshed SMS, De Castro, C. A. Nieto. *Nanofluids: Synthesis, Properties, and Applications.* New York: Nova Science Publishers, Inc; 2014.
- [6] Wu JM, Zhao J. A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement—Research gap to engineering application. *Prog Nuclear Energy* 2013;66:13-24.
- [7] Akilu S, Sharma KV, Baheta AT, Mamat R. A review of thermophysical properties of water based composite nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;66:654-678.
- [8] Hamilton RL, Crosser OK. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering chemistry fundamentals* 1962;1(3):187-191.
- [9] Pryazhnikov MI, Minakov AV, Rudyak VY, Guzei DV. Thermal conductivity measurements of nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer* 2017;104:1275-1282.
- [10] Shukla KN, Koller TM, Rausch MH, Fröba AP. Effective thermal conductivity of nanofluids – A new model taking into consideration Brownian motion. *Int J Heat Mass Transfer* 2016;99:532-540.
- [11] Garoosi F. Presenting two new empirical models for calculating the effective dynamic viscosity and thermal conductivity of nanofluids. *Powder Technol* 2020;366:788-820.
- [12] Michaelides EE(. *Nanofluidics Thermodynamic and Transport Properties.* 1st ed. Cham: Springer International Publishing; 2014.
- [13] Kandlikar SG(. *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels.* 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2014.
- [14] Bahiraei M, Heshmatian S. Electronics cooling with nanofluids: A critical review. *Energy conversion and management* 2018;172:438-456.
- [15] Haque ME, Hossain MS, Ali HM. Laminar forced convection heat transfer of nanofluids inside non-circular ducts: A review. *Powder Technol* 2021;378:808-830.

- [16] LI Qiang(李强) XUAN Y. Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid. *Science China. Technological sciences; SCIENCE CHINA Technological Sciences* 2002(4):408-416.
- [17] Shah RK, London Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data. Academic Press; 1978.
- [18] D. B. Tuckerman, R. F. W. Pease. High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters* 1981;2(5):126-129.
- [19] Colangelo G, Favale E, Milanese M, de Risi A, Laforgia D. Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution. *Appl Therm Eng* 2017;127:421-435.
- [20] Liu Z, Li Y. A new frontier of nanofluid research – Application of nanofluids in heat pipes. *Int J Heat Mass Transfer* 2012;55(23):6786-6797.
- [21] Roberts NA, Walker DG. Convective Performance of Nanofluids in Commercial Electronics Cooling Systems. *Appl Therm Eng* 2010;30(16):2499-2504.
- [22] Bahiraei M, Heshmatian S. Electronics cooling with nanofluids: A critical review. *Energy Conversion and Management* 2018;172:438-456.
- [23] Alirezaie A, Hajmohammad MH, Alipour A, salari M. Do nanofluids affect the future of heat transfer? “A benchmark study on the efficiency of nanofluids”. *Energy* 2018;157:979-989.
- [24] Alirezaie A, Hajmohammad MH, Hassani Ahangar MR, Hemmat Esfe M. Price-performance evaluation of thermal conductivity enhancement of nanofluids with different particle sizes. *Appl Therm Eng* 2018;128:373-380.
- [25] Mukherjee S, Mishra PC, Chaudhuri P. Thermo-economic performance analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids — An experimental investigation. *Journal of Molecular Liquids* 2020;299:112200.
- [26] Chakraborty S, Panigrahi PK. Stability of nanofluid: A review. *Appl Therm Eng* 2020;174:115259.
- [27] Maurer-Jones M, Gunsolus IL, Murphy CJ, Haynes CL. Toxicity of Engineered Nanoparticles in the Environment. *Anal Chem (Wash )* 2013;85(6):3036-3049.
- [28] Pastoriza-Gallego M, Lugo L, Legido JL, Piñeiro M, M. Enhancement of thermal conductivity and volumetric behavior of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids. *J Appl Phys* 2011;110(1):14309.
- [29] Żyła G. Thermophysical properties of ethylene glycol based yttrium aluminum garnet (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-EG) nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer* 2016;92:751-756.