

---

# Invloed van toevoegingen aan het werkmedium op warmteoverdracht in een warmtewisselaar

---

Studenten:

Michiel Adriaanse - 4080475  
Jordy de Jel - 4095200  
Sjoerd Lageweg - 4092317  
Jasper Wijnands - 4096231

Projectbegeleiders:

Dr.ir. C.A. Infante Ferreira  
Ir.D. Acevedo



Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering  
Delft University of Technology  
Delft, the Netherlands





# Voorwoord

In de laatste twee kwartalen van ons laatste jaar van de bachelor, vanaf februari tot en met juni 2014, hebben wij ons beziggehouden met het bachelor eindproject (BEP) van de studie Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit Delft. Tijdens dit onderzoeksproject hebben we onderzoek gedaan naar de verbetering van de warmteoverdracht in een warmtewisselaar door een ander werkmedium toe te voegen aan het al bestaande werkmedium; water. Wij kwamen op dit onderwerp via Bluerise, een jong bedrijf dat zich focust op het gebruik van het natuurlijke verschil in temperatuur tussen het bodem- en oppervlaktewater van de zee om verschillende processen aan te drijven. Hierbij kan worden gedacht aan energie opwekken, het koelen van gebouwen, maar ook het speerpunt: het produceren van drinkwater. Dit leek ons een mooi onderwerp voor ons onderzoeksproject, omdat er ten eerste veel te winnen valt op het gebied van zoetwaterwinning in ontwikkelingslanden en het zich ten tweede op een veel besproken en snel veranderend vlak bevindt; duurzame energie.

Vanuit Bluerise was het werkingsprincipe van de condensatietoren al bekend, maar specificaties moesten nog worden berekend. In het halfjaar voor ons heeft een andere BEP-groep zich beziggehouden met het dimensioneren van de toren waarin vocht uit warme lucht wordt gecondenseerd. Wij focussen ons meer op het koelen van het drinkwater in de warmtewisselaar van het systeem dat verder zal worden toegelicht in de rest van het verslag.

In het begin hebben we een aantal tegenslagen gehad, die ons wat parten hebben gespeeld in een soepel verloop van het project. Het idee was in eerste instantie om alleen te kijken naar het toevoegen van niet-oplosbare vloeistoffen, dat uiteindelijk na theoretisch onderzoek niet bleek te werken. Hierna hebben wij ons volledige onderzoek om moeten gooien om vervolgens tot de huidige opzet te komen.

Tijdens het onderzoek hebben wij veel hulp gehad van Dr. ir. C.A. Infante Ferreira, die tevens ook onze begeleider is geweest gedurende dit project. Hij heeft ons tijdens het onderzoek voorgesteld aan Hongxia Zhou, wiens testopstelling wij hebben mogen gebruiken voor het experimentele deel van ons onderzoek. We willen hen graag bedanken voor de hulp en steun die zij ons hebben geboden tijdens het onderzoek. Tevens willen wij Michel van den Brink bedanken voor het bestellen van de nanodeeltjes en zijn hulp tijdens het maken en het verwijderen van de nanovloeistof.

Daarnaast willen wij graag Samantha van der Drift, Berend-Jan Kleute en Diego Acevedo bedanken voor hun hulp en feedback vanuit Bluerise.

Aan het einde kijken wij positief terug op deze onderzoeksperiode. Het was hard werken, maar wij zijn er van overtuigd dat wij tot een mooi resultaat zijn gekomen en dat ons onderzoek in grotere of minder grote mate van toepassing kan zijn voor degenen die het willen gebruiken.

M. Adriaanse	<a href="mailto:michieladriaanse@hotmail.com">michieladriaanse@hotmail.com</a>	06-81498563
J.L. de Jel	<a href="mailto:jordydejel1990@gmail.com">jordydejel1990@gmail.com</a>	06-30403165
S. Lageweg	<a href="mailto:slageweg@msn.com">slageweg@msn.com</a>	06-44520344
J.T.M. Wijnands	<a href="mailto:j.wijnands@quicknet.nl">j.wijnands@quicknet.nl</a>	06-22499368

# Samenvatting

Het bedrijf Bluerise heeft een systeem ontwikkeld waarmee zoet water uit warme, vochtige lucht kan worden gewonnen. In dit onderzoek worden verschillende manieren onderzocht waarop de warmtewisselaar in dit systeem verbeterd kan worden. Eerst wordt bepaald of verschillende werkmedia zorgen voor een verbetering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt, daarna wordt gekeken of deze winst opweegt tegen de verandering in benodigd pompvermogen op het nieuwe werkmedium door de warmtewisselaar te pompen. Als laatste wordt de warmtewisselaar gedimensioneerd.

Het doel van het onderzoek is te achterhalen wat de invloed van het toevoegen van additieven aan water is op de warmteoverdrachtscoëfficiënt en het benodigde pompvermogen. Hierbij wordt een minimale verbetering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van 5% verwacht gezien de thermodynamische eigenschappen van het medium zullen veranderen. Om een duidelijk beeld te krijgen van de theorie achter deze toevoegingen is uitgebreid literatuuronderzoek gedaan. Met deze kennis is een theoretisch model opgesteld om de verbeteringen in warmteoverdrachtscoëfficiënt te kunnen bepalen. Vervolgens is de warmtewisselaar gedimensioneerd aan de hand van deze verbeteringen.

Eerst is gekeken naar de mogelijkheden om onoplosbare en oplosbare vloeistoffen toe te voegen aan water. Deze additieven blijken te zorgen voor een verlaging van de warmteoverdrachtscoëfficiënt, waardoor deze vloeistoffen verder niet worden meegenomen in het onderzoek. Vervolgens is er gekeken naar de invloed van een suspensie van nanodeeltjes in water op de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Uit de theoretische berekeningen blijkt dat met dit werkmedium de warmteoverdrachtscoëfficiënt ten opzichte van water verbeterd al zal het benodigde pompvermogen wel omhoog gaan. Door het gebruik van nanodeeltjes is de connectie met dit specifieke systeem van Bluerise verloren gegaan aangezien nanofiltratie een zeer tijdrovend en energie-inefficiënt proces is. Het blijft wel mogelijk deze resultaten te gebruiken voor andere toekomstige projecten. Hierdoor is besloten om de suspensie met nanodeeltjes in water experimenteel te onderzoeken.

Voor het experiment is gebruik gemaakt van een spiraalwarmtewisselaar. De verbetering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt berekend door te kijken naar het verschil in uitgaande temperatuur ten opzichte van een constante ingaande temperatuur, de veranderende massastroom en de thermische eigenschappen van de verschillende werkmedia. Het veranderde pompvermogen wordt berekend met de drukval over de spiraal en de veranderde dichtheid van de suspensie.

Uit de resultaten van het onderzoek blijkt dat er bij verschillende waarden van het Reynolds getal, welke duiden op dezelfde type stroming bij andere fysische eigenschappen van het medium, verbeteringen kunnen worden gemeten in warmteoverdrachtscoëfficiënt de range van 7.6%-11.8% bij 0.5 %vol suspensie en 18.0%-27.4% bij een 1.0 %vol suspensie. Een bijkomend effect is echter wel dat de drukval in het systeem aanzienlijk toe kan nemen ten opzicht van het gebruik van andere werkmedia. Bluerise kan deze resultaten gebruiken voor mogelijk andere doeleinden dan voor het drinkwaterproductiesysteem. Dit aangezien het toevoegen van nanodeeltjes ervoor zorgt dat het drinkwater wordt vervuild.



# Inhoudsopgave

Voorwoord .....	3
Samenvatting.....	4
Introductie.....	9
1. Plan van Aanpak en Planning .....	11
2. Mengsels met vloeistoffen .....	13
2.1 Berekeningen en verandering thermodynamische eigenschappen.....	13
2.2 Onoplosbare vloeistoffen .....	15
2.3 Oplosbare vloeistoffen .....	16
3. Nanodeeltjes .....	17
3.1 Formulering fysische eigenschappen. ....	17
3.2 Berekening warmteoverdrachtscoëfficiënt.....	18
3.3 Verwachte effect van nanodeeltjes .....	18
4. Dimensionering warmtewisselaar .....	19
4.1 Randvoorwaarden warmtewisselaar .....	19
4.2 Berekening buislengte .....	21
4.3 Berekening drukval.....	22
4.4 Vermogensbepaling.....	22
4.5 Conclusie .....	23
5. Experimenten .....	24
5.1 Opstelling.....	24
5.2 Sensoren.....	25
5.3 Meetprogramma .....	25
5.4 Oplossingen .....	26
5.5 Veiligheid .....	26
6. Resultaten.....	27
6.1 Resultaten metingen .....	27
6.2 Berekeningen.....	27
6.3 Visualisering.....	29
7. Discussie en conclusie .....	30
7.1 Discussie .....	30
7.2 Conclusie .....	30
8. Aanbevelingen.....	31

---

Bibliografie .....	32
Bijlage A: Symbolenlijst .....	33
Bijlage B: Opdracht .....	34
Bijlage C: Meetdata .....	35
Bijlage D: Logboek .....	38





# Introductie

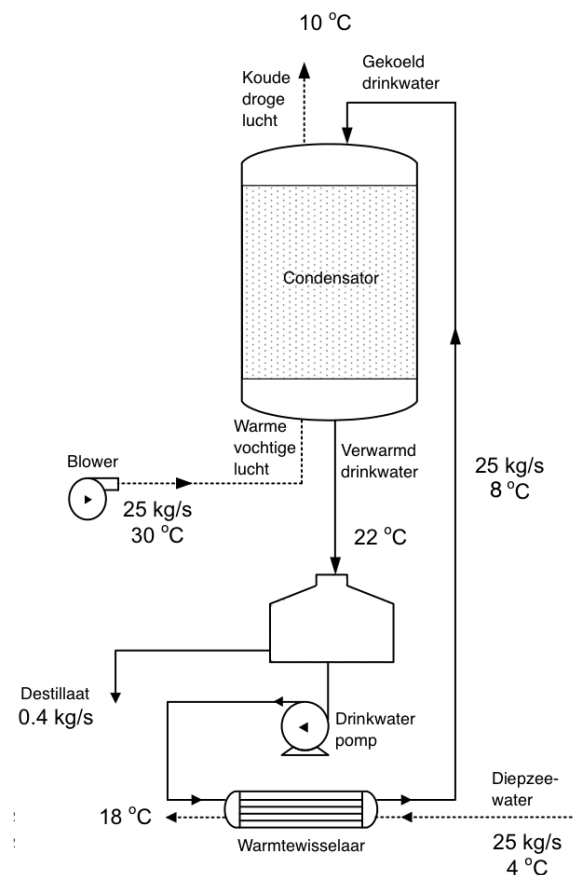
Door het toenemende aantal landen dat aanspraak maakt op zoetwaterbronnen over de hele wereld is de vraag naar energiezuinige methoden om vers drinkwater te produceren groot. Vooral in landen waar financiële en ecologische bronnen voor zoetwater schaars zijn. Een van de bedrijven die zich specialiseert op dit gebied is het via YES!Delft opgerichte bedrijf Bluerise.

## Bluerise

Gespecialiseerd in het benutten van de thermische energie van de zee, ontwerpt het jonge bedrijf Bluerise 'Ocean Thermal Energy Conversion' installaties, kort: OTEC. Deze installaties gebruiken het natuurlijke temperatuurverschil in bodem- en oppervlaktewater van de zee om energie op te wekken die voor verschillende doeleinden gebruikt kan worden. Sinds kort buigt Bluerise zich ook over het vraagstuk van zoetwaterwinning, voor bijvoorbeeld irrigatie of drinkwater. Dit wordt gedaan door het gebruikte koelwater van de OTEC-installatie te hergebruiken in een tweede installatie.

## Drinkwatervorming

Deze zoetwaterwinning gebeurt volgens het zogenaamde 'Direct Contact Condensatie' principe, schematisch weergegeven in figuur 1.1. Met dit principe wordt water gecondenseerd uit vochtige lucht, waarbij droge lucht en zoet water achterblijven. De warme vochtige lucht wordt onder in een toren geblazen en besproeid met koud drinkwater. Hierdoor raakt de lucht door verdamping van het water onderin de toren verzadigd met waterdamp. Bovenin de toren wordt deze verzadigde lucht gekoeld door het water dat naar beneden valt, waardoor het vocht in de lucht condenseert. Onderin de toren wordt het gewonnen water in een reservoir opgeslagen. Uit dit reservoir wordt een deel afgetapt als drinkwater en een deel weer hergebruikt in de cyclus. Dit hergebruikte drinkwater wordt middels het zeewater weer gekoeld, waardoor het weer met een lagere temperatuur bovenin de toren verdeeld kan worden.



Figuur 1.1- Schematisch overzicht Direct Contact Condensatie

### BEP vorige groep

In het eerste halfjaar van het studiejaar 2013-2014 heeft een andere onderzoeksgroep deels deze opstelling aangepakt. Deze vorige groep heeft zich met name gefocust op de dimensionering en thermodynamica achter het condenseren van de vochtige lucht in de toren tegen de koud watercyclus.

### Inhoud van ons onderzoek

In dit onderzoek wordt gekeken naar een ander deel van de zoetwaterproductiecyclus. Nadat het water uit de condensatietoren komt, wordt het hergebruikte deel opgevangen, opnieuw gekoeld en weer bovenin de toren gespreid. Aan dit deel van de cyclus valt nog veel te optimaliseren. Dit is dan ook het doel van dit onderzoek. Het optimaliseren van dit deel van de cyclus gaat volgens twee processen:

- Onderzoek naar de invloed van verschillende werkmedia op de warmtewisselaar, waarbij gekeken wordt naar de prestaties van verschillende vloeistofmengsels ten opzichte van water:
  - o Het eerste werkmedium waar naar wordt gekeken is een emulsie van een onoplosbare vloeistof in water, zoals een olie.
  - o Het tweede werkmedium waar naar wordt gekeken is een oplossing van een oplosbare vloeistof in water, zoals alcoholen.
  - o Het laatste werkmedium dat wordt onderzocht is een suspensie van nanodeeltjes in water.
- Het dimensioneren van een buis in buis warmtewisselaar met deze nieuw gevonden waarden voor warmteoverdracht met een ander werkmedium.

Eerst zal getracht worden op een theoretische manier te bepalen wat de verschillen in warmteoverdracht en pompvermogen zouden zijn bij de verschillende samenstellingen van het werkmedium. Daarna zal experimenteel onderzocht worden of deze voorspelling en theoretische bepaling klopt en accuraat is. Er wordt een minimale verbetering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van 5% verwacht gezien de thermodynamische eigenschappen van het medium zullen veranderen

# 1. Plan van Aanpak en Planning

Het bachelor onderzoeksproject heeft als doel alle opgedane kennis tijdens de studie Werktuigbouwkunde in één enkel project samen te vatten. In dit hoofdstuk worden het plan van aanpak en de planning voor dit project besproken. Als opmerking wordt wel geplaatst dat tijdens het project het plan van aanpak en de planning frequent zijn aangepast om beter te kunnen werken met voorlopige resultaten.

## Stap 1: Bestuderen Systeem

Om te beginnen is het belangrijk goed te weten hoe het systeem van het bedrijf Bluerise werkt. Welke aanpassingen heeft de vorige projectgroep aangebracht en wat zijn de effecten hiervan op het totale systeem. Vervolgens wordt gekeken welke waarden/delen van het systeem belangrijk zijn voor het onderzoek.

## Stap 2: Onoplosbare/Oplosbare Vloeistoffen

Na het systeem goed bestudeerd te hebben, wordt verder gegaan met studie naar het gebruik van onoplosbare/oplosbare vloeistoffen in het medium. Dit begint met een literatuurstudie waar alle nodige informatie uit wordt gehaald. Deze informatie met al zijn bijbehorende formules wordt vervolgens in een Matlab model verwerkt. Zo kunnen aan het einde van het onderzoek verschillende mengsels met het Matlab model worden berekend en hier kunnen conclusies uit worden getrokken.

*Na de literatuurstudie, het omschrijven van een aantal berekeningen en het doorvoeren van mengsels werd duidelijk dat onoplosbare/oplosbare vloeistoffen als toevoegingen geen goede keuze zijn om mee voort te gaan. Er waren maar weinig mengsels die voldeden aan de eisen voor het systeem zoals betere warmteoverdracht, lager pompvermogen en geen schadelijkheid voor de gezondheid.*

*Aangezien het project nu een nieuwe weg moest inslaan, diende de hypothese te worden aangepast, zodat deze wel stand zou houden gedurende de rest van het onderzoek. Het plan van aanpak werd ook aangepast aangezien nu ook onderzoek zou worden gedaan naar nanodeeltjes gesuspendeerd in water.*

## Stap 3: Nanodeeltjes

Nu ook nanodeeltjes onderzocht gaan worden, dient voor dit onderwerp hetzelfde stappenplan te worden doorlopen als bij de vloeistoffen. Er wordt begonnen met een literatuurstudie, vervolgens wordt alle verkregen informatie in een Matlab model verwerkt en verschillende mengsels doorberekend. Uit deze resultaten wordt besloten of nanodeeltjes een mogelijkheid bieden om te testen in een experiment.

#### **Stap 4: Dimensionering**

Aangezien het bedrijf Bluerise graag resultaten wil zien in de grootte van de warmtewisselaar en pompvermogen worden de resultaten berekend door het dimensioneren van de warmtewisselaar met behulp van een Matlab model.

#### **Stap 5: Experiment**

In het experiment wordt gebruik gemaakt van een opstelling die beschikbaar wordt gesteld door PhD student Hongxia Zhou. Allereerst moet goed begrepen worden hoe de opstelling werkt. Wat zijn de meetpunten? Hoe werken de sensoren? In welke vorm verschijnen de resultaten?

Daarnaast moeten er veiligheidsplannen opgesteld worden voor het omgaan met de opstelling, maar ook voor de omgang met nanodeeltjes en het gebruik van de opstelling met dit werkmedium.

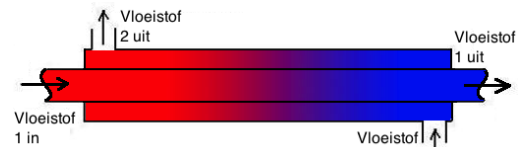
Voor het werkmedium moet worden onderzocht welke nanodeeltjes het gunstigst zijn om te gebruiken gelet op prijs, thermodynamische waarden en eventuele risico's tijdens het gebruik en de verwerking

#### **Stap 6: Resultaten verwerken**

Nadat het experiment is uitgevoerd worden de resultaten doorgerekend en vergeleken met de resultaten die in het theoretische onderzoek zijn voorspeld met het Matlab model. Hiermee wordt vergeleken of er daadwerkelijk een verbetering is van de warmteoverdracht door de suspensie met nanodeeltjes ten opzichte van de warmteoverdracht van het zuivere water.

## 2. Mengsels met vloeistoffen

Een mogelijkheid om de warmteoverdracht van het water dat door de warmtewisselaar stroomt te veranderen is door het te mengen met andere vloeistoffen. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen vloeistoffen die oplosbaar zijn in water en vloeistoffen die dit niet zijn. In dit hoofdstuk zullen als eerste de onoplosbare vloeistoffen besproken worden, waarna de oplosbare vloeistoffen volgen. Bij alle berekeningen wordt uitgegaan van een buis in buis warmtewisselaar met tegenstroom principe zoals schematisch weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1 - Buis in buis warmtewisselaar met tegenstroom principe

### 2.1 Berekeningen en verandering thermodynamische eigenschappen

Om te bepalen of de warmteoverdracht van een medium beter is dan dat van een ander medium, moet er worden gekeken naar de warmteoverdrachtscoëfficiënt  $h$ . Hier moet de warmteoverdrachtscoëfficiënt van het mengsel hoger zijn dan die van het water om een betere overdracht van warmte te verkrijgen. Deze berekeningen worden voor zowel mengsels met onoplosbare vloeistoffen, als die met oplosbare vloeistoffen gelijk geacht, omdat bij onoplosbare vloeistoffen wordt uitgegaan van een goed verdeelde emulsie.

Om de warmteoverdrachtscoëfficiënt  $h$  te bepalen wordt gekeken naar het Nusselt nummer, een dimensieloze eenheid. Het Nusselt nummer wordt berekend met formule (1). (Mills, 1999)

$$Nu_D = \frac{h * D}{\kappa} \quad (1)$$

Omdat het in de buizen warmtewisselaar een koelproces betreft, kan het Nusselt nummer in turbulente stroming ( $Re \geq 10000$ ) berekend worden met formule (2). (Mills, 1999)

$$Nu_D = 0.023 * Re_D^{0.8} * Pr^{0.3} \quad (2)$$

Deze formules kunnen aan elkaar gelijk worden gesteld, waardoor er een uitdrukking ontstaat voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt  $h$ . Hierin zijn het Reynolds getal ( $Re_D$ ) en Prandtl nummer ( $Pr$ ) gelijk aan (Mills, 1999):

$$Re_D = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{\mu * C_p}{\kappa} \quad (4)$$

Door het Reynolds getal en het Prandtl nummer volledig uit te schrijven, blijkt de warmteoverdrachtscoëfficiënt een functie van de stofeigenschappen dichtheid ( $\rho$ ), thermische geleidbaarheid ( $\kappa$ ), specifieke warmte ( $C_p$ ) en viscositeit ( $\mu$ ) van de vloeistof, en de eigenschappen van de warmtewisselaar: hydraulische diameter ( $D$ ) en stroomsnelheid ( $V$ ):

$$h = 0.023 * \rho^{0.8} * \kappa^{0.7} * C_p^{0.3} * \mu^{-0.5} * (D^{-0.2} * V^{0.8}) \quad (5)$$

Er treedt een mogelijke verbetering op in de warmteoverdracht per eenheid pompvermogen als de warmteoverdrachtscoëfficiënt van het mengsel met de onoplosbare vloeistof groter is dan die van water. De procentuele verandering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van het mengsel ten opzichte van het water wordt berekend door deze twee waarden door elkaar te delen. De hydraulische diameter van de buis en de stroomsnelheid van het medium vallen uit de vergelijking. Deze zullen namelijk constant worden verondersteld, omdat deze niet stofafhankelijk zijn.

De procentuele verandering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen water en het mengsel kan als volgt worden weergegeven:

$$\frac{h_m}{h_w} = \left(\frac{\rho_m}{\rho_w}\right)^{0.8} * \left(\frac{\kappa_m}{\kappa_w}\right)^{0.7} * \left(\frac{C_{p_m}}{C_{p_w}}\right)^{0.3} * \left(\frac{\mu_w}{\mu_m}\right)^{0.5} \quad (6)$$

In deze formule staat het subscript m voor het mengsel en het subscript w voor water.

Hierna worden voor de nieuwe mengsels de drukval over het theoretische systeem bepaald, waarna het benodigde pompvermogen kan worden bepaald.

## 2.2 Onoplosbare vloeistoffen

Vloeistoffen die niet oplosbaar zijn in water zijn bijvoorbeeld verschillende oliën. Een dergelijke vloeistof zal, wanneer deze in contact komt met water, niet mengen op moleculair niveau. Om toch een verandering te krijgen in de thermodynamische eigenschappen van het medium moet een emulsie worden gemaakt. Deze emulsie kan verkregen worden als de stroming van het medium turbulent is.

De warmtewisselaar wisselt warmte uit tussen koud zeewater en opgewarmd drinkwater. Er zijn talloze vloeistoffen die niet mengen met water, echter zal met het oog op de strikte normen die aan drinkwater vastzitten vooral worden gekeken naar stoffen die in kleine hoeveelheden niet schadelijk zijn voor de gezondheid. Tijdens het exploratieve onderzoek naar niet oplosbare vloeistoffen is al vroeg ondervonden dat deze mengsels geen verbetering opleveren. Een aantal vloeistoffen waarvan informatie is opgezocht zijn paraffine olie, olijfolie en octanol. Ondanks dat octanol schadelijk is voor de gezondheid, is deze toch meegenomen in het onderzoek wegens de goede verkrijgbaarheid.

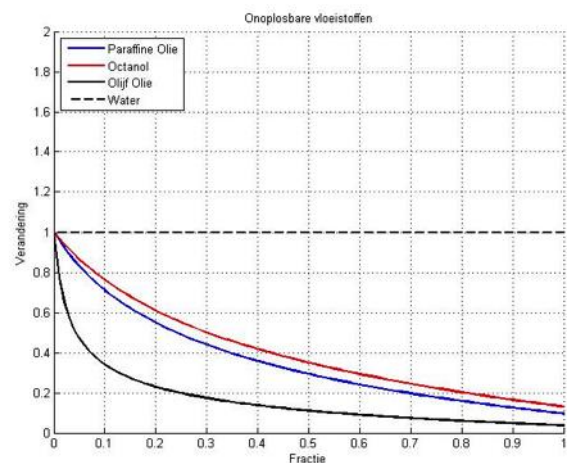
Tabel 2.1: Onoplosbare vloeistoffen en de bijbehorende thermische eigenschappen

Stof	H <sub>2</sub> O (ref)	Paraffine Olie	Olijfolie	Octanol
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	998	800	860	822
$C_p$ [J/kg·K]	4185	2130	1970	2940
$k$ [W/m·K]	0.58	0.15	0.17	0.161
$\mu$ [Pa·s]	0.001	0.010	0.084	0.008
wt%	-	1	1	1
Verbetering [%]	-	-4	-22.4	-3.1

De thermodynamische eigenschappen van deze vloeistoffen, inclusief de  $h_m/h_w$ , de verhouding tussen de warmteoverdrachtscoëfficiënten, staan in tabel 2.1. Deze verhoudingen zijn ook weergegeven in figuur 2.2, waar de verandering in warmte overdracht is uitgezet tegen de volumefractie geëmulgeerde vloeistof.

Zoals te zien is in tabel 2.1, is er bij een gewichtspercentage van 1% bij alle stoffen al een forse vermindering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Hiermee is aangetoond dat een mengsel van water met een onoplosbare vloeistof de warmteoverdracht niet verbetert ten opzichte

van de warmteoverdracht met water. Dit zal ook resulteren in een lagere warmte. Dus is ook de schadelijkheid van verschillende stoffen in dit onderzoek irrelevant.



Figuur 2.2 -  $h_m/h_w$  van de onoplosbare vloeistoffen

## 2.3 Oplosbare vloeistoffen

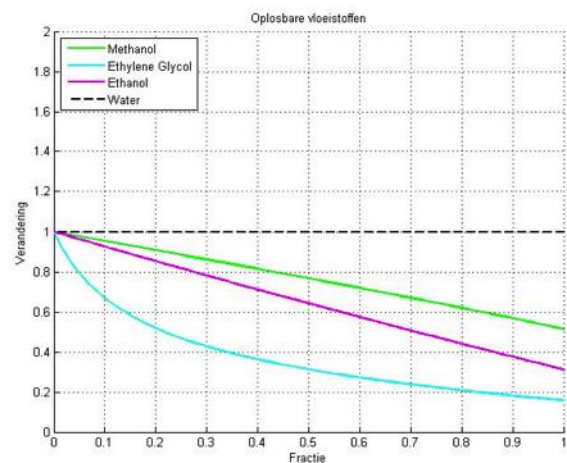
Bij het gebruik van oplosbare vloeistoffen om de warmteoverdracht te veranderen moet ook rekening gehouden worden met het feit dat de scheiding van de vloeistoffen na de warmtewisselaar energie zal kosten en tijdrovend zal zijn. Hierdoor zal de energiewinst die behaald wordt uit een betere warmteoverdracht weer verloren kunnen gaan door het verlies aan energie voor het filteren van de vloeistof.

Bij het zoeken naar stoffen is gekeken naar het feit dat de verschillende thermodynamische eigenschappen op een positieve manier anders zijn dan de eigenschappen van water, zoals bijvoorbeeld een hogere dichtheid of een lagere viscositeit. Ook dit bleek niet te lukken. De stoffen die gevonden zijn en vergeleken worden met water zijn: methanol, ethyleenglycol en ethanol. De waarden van deze vloeistoffen staan in tabel 2.2. En de waarden van de verhouding  $h_m/h_w$  zijn weergegeven in figuur 2.3, waar de verandering in warmteoverdracht is uitgezet tegen de volumefractie van de opgeloste stof.

Tabel 2.2: Oplosbare vloeistoffen en de bijbehorende thermische eigenschappen

Stof	H <sub>2</sub> O (ref)	Methanol	Ethyleen-glycol	Ethanol
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	998.0	791.5	1110.0	789.0
$C_p$ [J/kg·K]	4185	2550	2840	2420
$k$ [W/m·K]	0.580	0.204	0.250	0.171
$\mu$ [Pa·s]	0.0010	0.0006	0.0150	0.0012
wt%	-	1	1	1
Verbetering [%]	-	-0.5	-5.3	-0.8

Uit tabel 2.2 blijkt dat ook bij een mengsel met één gewichtsprocent oplosbare vloeistof de warmteoverdrachtscoëfficiënt vermindert. Hiermee is dus ook duidelijk dat de warmteoverdracht niet zal verbeteren door het gebruik van oplosbare vloeistoffen.



Figuur 2.3 -  $h_m/h_w$  van de oplosbare vloeistoffen



## 3. Nanodeeltjes

Nanodeeltjes zijn kleine deeltjes van een bepaalde stof met afmetingen rond de 50nm. Door middel van het toevoegen van deze deeltjes is het mogelijk de warmteoverdrachtscoëfficiënt van een medium te verbeteren. In dit hoofdstuk is te lezen welke formulering wordt gebruikt voor het berekenen van deze verbetering op het gebied van warmteoverdracht. Er worden ook enkele voorbeelden gegeven van verschillende soorten nanodeeltjes en de bijbehorende verbetering.

### 3.1 Formulering fysische eigenschappen.

Een groot deel van het onderzoek hoe nanodeeltjes de warmteoverdracht van een bepaald medium kunnen verbeteren heeft betrekking op de verandering van fysische eigenschappen van het medium. In deze paragraaf zal aan deze fysische eigenschappen aandacht worden besteed.

Om te kunnen berekenen hoe de fysische eigenschappen veranderen, is het in eerste instantie belangrijk om te weten in welke verhouding de nanodeeltjes aan het medium zijn toegevoegd. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van gewichts- en volumepercentages die berekend kunnen worden met de formules (7) en (8) (Zan Wu, 2013).

$$w = \frac{m_p}{m_{bf} + m_p} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{m_p \rho_{bf}}{m_{bf} \rho_p + m_p \rho_{bf}} \quad (8)$$

Vervolgens kan met deze verkregen concentratieverhoudingen de nieuwe fysische eigenschappen, dichtheid (9), specifieke warmte (10), viscositeit (11) en warmtegeleidingscoëfficiënt (12) worden berekend. (Aly, 2014):

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_p \quad (9)$$

$$C_{p,nf} = \frac{(1 - \varphi)\rho_{bf}C_{p,bf} + \varphi\rho_p C_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (10)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} * e^{\left(\frac{5.989\varphi}{0.278-\varphi}\right)} \quad (11)$$

$$k_{nf} = k_{bf} * (1 + 8.733\varphi) \quad (12)$$

De subscript  $nf$ ,  $bf$  en  $p$  staan respectievelijk voor nanovloeistof, basisvloeistof, nanodeeltje.

### 3.2 Berekening warmteoverdrachtscoëfficiënt

In de volgende paragraaf zal via formulering (Aly, 2014) worden aangetoond hoe de warmteoverdrachtscoëfficiënt verandert ten gevolge van de verandering van fysische eigenschappen.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor turbulente stroming wordt berekend met vergelijking (5) uit hoofdstuk 3. Voor laminaire stroming wordt gebruikgemaakt van een andere formule om de warmteoverdrachtscoëfficiënt uit te rekenen (Mills, 1999):

$$h = \frac{3.66 * k}{d} \quad (13)$$

Als deze waarde vervolgens wordt vergeleken met de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor water  $h_w$ , zonder nanodeeltjes, kan men de procentuele verbetering uitrekenen volgens:

$$\text{verbetering \%} = \left( \frac{h_{nf}}{h_w} - 1 \right) * 100 \quad (14)$$

### 3.3 Verwachte effect van nanodeeltjes

In deze paragraaf wordt voor enkele toevoegingen van nanodeeltjes aan water de verbetering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt berekend. Voor het uitvoeren van deze berekeningen wordt gekozen deze uit te voeren bij gelijk Reynolds getal, zodat de toestand van de stroming gelijk is in beide situaties van zowel water als nanodeeltjes gesuspenderd in water.

In tabel 3.1 is te zien wat de veranderingen van fysische eigenschappen zijn voor de verschillende mengsels. Als referentie zijn de gegevens van water zonder nanodeeltjes ook gegeven zodat de veranderingen in fysische eigenschappen goed zichtbaar zijn. Elke kolom staat in deze tabel voor een ander soort stof die samen met water de suspensie vormt.

Bij het berekenen van de verbetering is gekozen voor een buis met een diameter van 6 mm. Er worden berekeningen gedaan met Reynolds getallen in het gebied van laminaire stroming en in het overgangsgebied tussen laminaire en turbulente stroming.

Tabel 3.1: Veranderingen in fysische eigenschappen

Stof	H <sub>2</sub> O (ref)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Ag		Au		Mg		Fe	
		0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
%vol											
ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	998	1013	1028	1046	1093	1090	1181	1002	1006	1033	1067
C <sub>p</sub> [J/kg.K]	4185	4117	4054	3984	3803	3823	3520	4154	4127	4040	3906
k [W/m.K]	0.603	0.629	0.655	0.629	0.655	0.629	0.655	0.629	0.655	0.629	0.655
μ [Pa*s]	0.0010	0.0011	0.0013	0.0011	0.0013	0.0011	0.0013	0.0011	0.0013	0.0011	0.0013
Verbetering t.o.v. H <sub>2</sub> O [%] laminair	--	4.4	8.7	4.37	8.73	4.37	8.73	4.37	8.73	4.37	8.73
Verbetering t.o.v. H <sub>2</sub> O [%] turbulent	--	9.6	20.3	11.3	23.9	13.7	28.8	9.0	18.8	10.7	22.5

Zoals te zien is in de tabel 3.1 is duidelijk dat de verschillende soorten nanodeeltjes theoretisch voor significante veranderingen zorgen. Er is uiteindelijk gekozen om te gaan testen met Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dit omdat dit type nanodeeltjes goed verkrijgbaar is en niet al te duur is in vergelijking met de andere nanodeeltjes.

## 4. Dimensionering warmtewisselaar

In een buis in buis warmtewisselaar worden twee buizen in elkaar geschoven zoals schematisch weergegeven in figuur 2.1 en vervolgens wordt er tussen de twee stromen warmte uitgewisseld. In dit hoofdstuk wordt berekend wat het effect van de toevoeging van nanodeeltjes is op de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Ook zal worden berekend hoeveel kleiner de buizen worden wanneer gebruik wordt gemaakt van een stroom met nanodeeltjes en wat de drukval wordt in deze buizen.

### 4.1 Randvoorwaarden warmtewisselaar

Allereerst moet worden gekeken naar de randvoorwaarden van de warmtewisselaar. De ingaande en uitgaande temperaturen van het zeewater en het drinkwater zijn voorgeschreven, dit geldt ook voor de massastroom. Tevens zijn de thermodynamische eigenschappen van het drinkwater, het zeewater en het drinkwater met de toevoeging van nanodeeltjes bekend. In tabel 4.1 zijn deze thermodynamische gegevens weergegeven.

Tabel 4.1: Thermodynamische gegevens drinkwater, zeewater en water met toegevoegde nanodeeltjes

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kgK]	$\mu$ [Pa s]	$\kappa$ [W/mK]
Drinkwater	998	4185	0.0010	0.603
Zeewater	1025	4000	0.0010	0.600
0.5 %vol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	1013	4117	0.0011	0.629
1.0 %vol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	1028	4054	0.0013	0.655

\*Toegevoegd volumepercentage in drinkwater

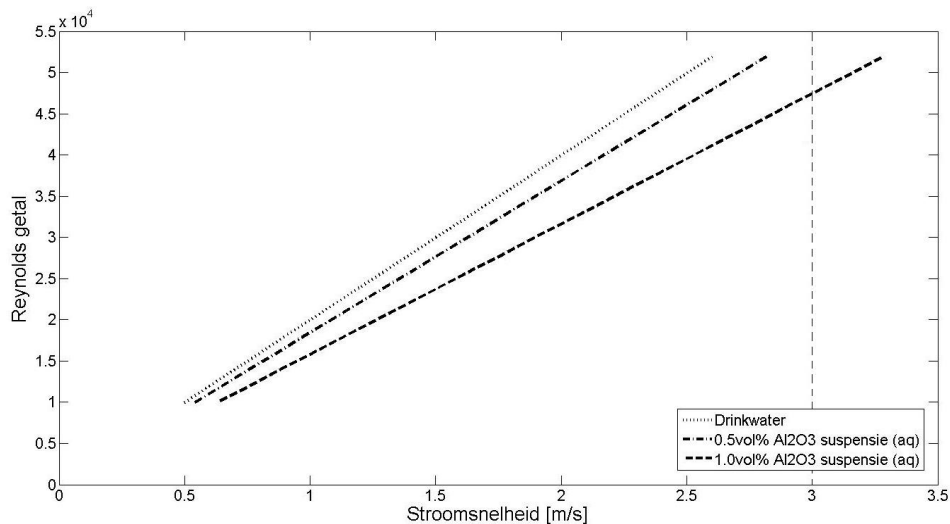
De massastroom door de warmtewisselaar is vastgesteld op 25 kg/s. De snelheid waarmee het drinkwater en het zeewater door de wisselaar stromen is variabel gekozen tussen de 0.5 en 3 m/s. Dit zijn typische snelheden voor een tegenstroomwarmtewisselaar. Nu de grenzen van de stroomsnelheid vastgesteld zijn en ook de massastroom bekend is, kunnen het contactoppervlak en de diameter van de buis bepaald worden.

$$A = \frac{\dot{m}}{\rho V} \quad (14)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \dot{m}}{\pi \rho V}} \quad (15)$$

Bij het gekozen stroomsnelheidsinterval en na invulling van formule (15) worden de buisdiameters berekend, waarna het Reynolds getal bepaald kan worden om te onderzoeken of de stroming laminair of turbulent is. Het Reynolds getal wordt berekend met formule (3).

Voor alle stroomsnelheden blijkt het Reynolds getal turbulent te zijn, want er geldt  $Re > 10000$ . Omdat het Reynolds getal ook afhangt van de dichtheid en de viscositeit zal de toevoeging van de nanodeeltjes effect hebben op dit getal. Hiertoe dienen de waarden uit tabel 4.1 in formule (3) ingevuld te worden. Er blijkt dat ook hier sprake is van turbulente stroming. In matlab is de stroomsnelheid uitgezet tegen het Reynolds getal, dit is terug te vinden in figuur 4.1. In tabel 4.2 is er een voorbeeld gegeven bij een buisdiameter van 0.02 m en een constant Reynolds getal.



Figuur 4.1: Relatie tussen het Reynolds getal en de stroomsnelheid [m/s]

In figuur 4.1 is te zien dat voor een constant Reynolds getal de snelheid van het werkmedium hoger moet zijn naarmate de concentratie nanodeeltjes groter wordt en dat voor een constante snelheid het Reynolds getal lager moet zijn. Voor het verdere onderzoek naar de warmteoverdrachtscoëfficiënt en de drukval wordt een constant Reynolds getal gebruikt.

Tabel 4.2: Stroomsnelheid na toevoeging Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanodeeltjes met constant Reynolds getal en diameter

	Reynolds getal *10 <sup>4</sup>	Diameter [m]	Stroomsnelheid [m/s]
Drinkwater	5.1	0.02	2.6
0.5%vol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	5.1	0.02	2.82
1.0%vol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	5.1	0.02	3.28

\*Toegevoegd volume percentage in drinkwater

Uit figuur 4.1 en tabel 4.2 blijkt dat de stroomsnelheid na de toevoeging van de nanodeeltjes dusdanig positief wordt beïnvloed dat deze bij toevoeging van 1.0 %vol Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zelfs de opgelegde grens van 3 m/s passeert. Dit is een ongewenste snelheid voor de warmtewisselaar. Bij de toevoeging van nanodeeltjes kan het Reynolds getal constant gehouden worden, met een hogere stroomsnelheid, met als uiteindelijke resultaat een verhoging van de drukval. Aan het einde van dit hoofdstuk zal de drukval besproken worden.

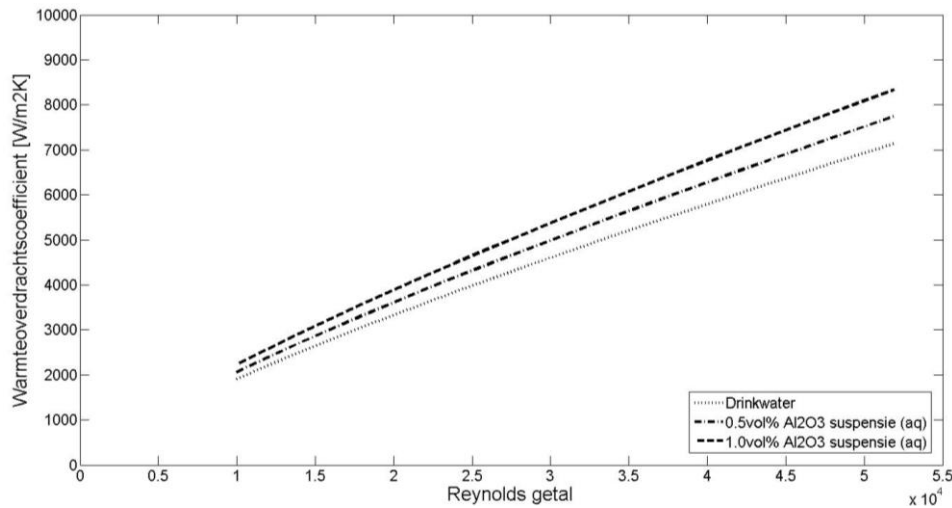
Het doel van de toevoeging van de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanodeeltjes is het verbeteren van de warmteoverdracht. Allereerst dient hiertoe de warmteoverdrachtscoëfficiënt  $h$  te worden bepaald. Als eerste stap moet het Nusselt nummer worden bepaald. Deze wordt bepaald met formule (2) (A.F.Mills, 1999), hier nogmaals herhaald.

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3} \quad (2)$$

Na het bepalen van het Nusselt nummer kan de warmteoverdrachtscoëfficiënt worden bepaald. Dit wordt gedaan met formule (16) (Mills, 1999).

$$h = Nu * \left( \frac{\kappa}{d} \right) \quad (16)$$

In figuur 4.2 zijn de warmteoverdrachtscoëfficiënt en het Reynolds getal tegen elkaar uitgezet. Er is te zien dat de toevoeging van nanodeeltjes een positief effect heeft op de warmteoverdrachtscoëfficiënt, want met nanodeeltjes is deze hoger dan wanneer er geen nanodeeltjes zijn toegevoegd.



Figuur 4.2 - Relatie tussen de warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/m<sup>2</sup>K] en het Reynolds getal

## 4.2 Berekening buislengte

Door de toevoeging van de nanodeeltjes kan ook worden gekozen om de lengte van de buizen korter te maken. Er is gekozen om het totale systeem uit 30 parallele buizen op te bouwen. Zo wordt de 25 kg/s stroom gelijkmatig verdeeld over de buizen. Wanneer dit niet wordt gedaan, kan er niet aan de randvoorwaarde van de stroomsnelheid worden voldaan. In tabel 5.3 zijn de resultaten weergegeven. De toevoeging van 1.0 %vol Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kan een maximale besparing opleveren van 12.0 meter. Tevens zijn de lokale warmteoverdrachtscoëfficiënten aan beide zijden meegenomen in de berekening en is er rekening gehouden met de wanddikte. Voor het bepalen van de buislengte moet eerst de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt worden bepaald met formule (17) en vervolgens kan de buislengte worden bepaald met formule (18). In formule (18) staat  $q$  voor de gelijk verdeelde warmtestroom over de parallele buizen.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{wm}} + \frac{\Delta x}{\kappa_k} + \frac{1}{h_{zw}} \quad (17)$$

$$L = \frac{q}{dT * \pi * d * U} \quad (18)$$

De totale buislengte wordt nu bepaald door de buislengte  $L$  te vermenigvuldigen met het aantal parallele buizen en vervolgens te vermenigvuldigen met 2 om het totale systeem correct te dimensioneren.

Tabel 4.3: Buislengte (besparing) ten opzichte van een constant Reynolds getal ( $4.6 \cdot 10^4$ )

	Stroomsnelheid [m/s]	Buislengte [m]	Totale buislengte [m]	Totale besparing [m]
Drinkwater	2.3	1.84	110.4	-
0.5 %vol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	2.5	1.73	103.8	6.6
1.0 %vol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	2.9	1.49	98.4	12.0

\*Toegevoegd volume percentage in drinkwater

### 4.3 Berekening drukval

Als laatste is er naar de drukval van het systeem gekeken. De toevoeging van de nanodeeltjes zorgt niet alleen voor een besparing in het aantal meter buis van het systeem, maar ook voor een verhoging van de drukval. Dit heeft als gevolg dat er een groter pompvermogen nodig is. De drukval wordt berekend met formule (19) (White, 2011).

$$\Delta P = f * \rho * \left(\frac{L}{d}\right) * \left(\frac{V^2}{2}\right) \quad (19)$$

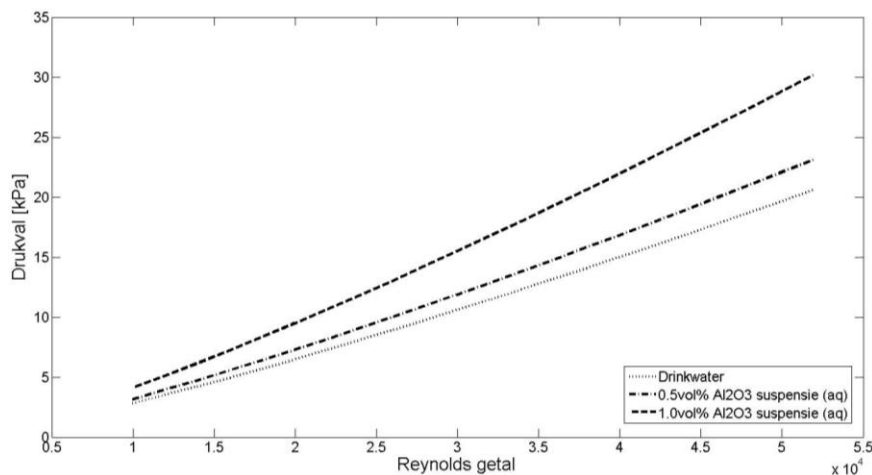
In formule (19) staat de  $f$  voor de frictiefactor. Deze is bepaald aan de hand van een Moody diagram, omdat het om een volledig turbulente stroming gaat. Deze heeft een waarde van 0.073 en is opgezocht aan de hand van een buisruwheid  $\epsilon$  van 0.001 voor koper en de diameter van 0.02 m.

In tabel 4.4 zijn de resultaten weergegeven en in figuur 4.3 is de drukval uitgezet tegen de stroomsnelheid. Uit de resultaten blijkt dat er een grotere drukval ontstaat door de toevoeging van  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanodeeltjes. In het uiterste geval levert dit een extra verlies op van bijna 2.5 bar. Voor lagere Reynolds getallen zal het verschil in drukval kleiner zijn, omdat deze stroomsnelheden relatief dichterbij elkaar liggen.

Tabel 4.4: De drukval (verlies) bij een constante Reynolds getal ( $4.6 \cdot 10^4$ )

	Stroomsnelheid [m/s]	Drukval [kPa]	Totale drukval [kPa]	Extra verlies [kPa]
Drinkwater	2.3	17.7	531	-
0.5 %vol $\text{Al}_2\text{O}_3$ *	2.5	19.9	597	66
1.0 %vol $\text{Al}_2\text{O}_3$ *	2.9	26.0	780	249

\*Toegevoegd volume percentage in drinkwater



Figuur 4.3 - Relatie tussen de drukval [kPa] en het Reynolds getal

### 4.4 Vermogensbepaling

Met de waarden van de totale drukval kan het totaal benodigde pompvermogen van het systeem worden bepaald volgens formule (20) en volgens formule (21) kan met de verbetering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt het totaal opgeleverde vermogen worden bepaald.

$$P_{pomp} = \left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right) \Delta P \quad (20)$$

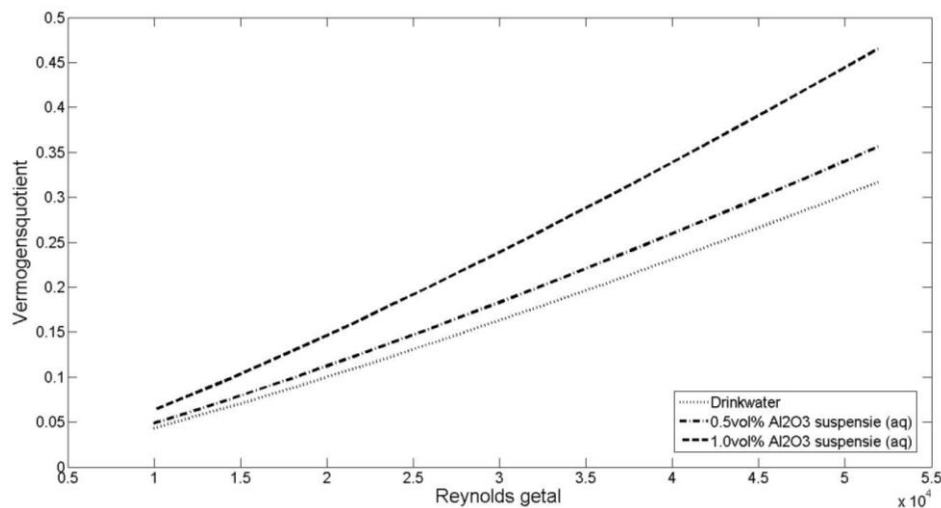
$$\dot{Q} = U * \pi * d * L * \Delta T \quad (21)$$

Door deze waarden door elkaar te delen ontstaat er een vermogensquotiënt. Het vermogensquotiënt is een dimensieloos getal dat aangeeft wat de verhouding is tussen het pompvermogen en de warmtestroom. In tabel 4.5 zijn deze waarden weergegeven voor hetzelfde Reynolds getal als in tabel 4.4 en in figuur 4.4 zijn de vermogensquotiënten bij constante Reynolds getallen tegen elkaar uitgezet.

Tabel 4.5: Vermogensgegevens en vermogensquotiënt

	Reynolds getal	Warmtestroom [kW]	Pompvermogen [kW]	Vermogensquotiënt
Drinkwater	$4.6 \cdot 10^4$	48.8	13.3	0.273
0.5 %vol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	$4.6 \cdot 10^4$	48.0	14.7	0.307
1.0 %vol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	$4.6 \cdot 10^4$	47.3	18.9	0.401

\*Toegevoegd volume percentage in drinkwater



Figuur 4.4: Relatie tussen de vermogensquotiënt en het Reynolds getal

## 4.5 Conclusie

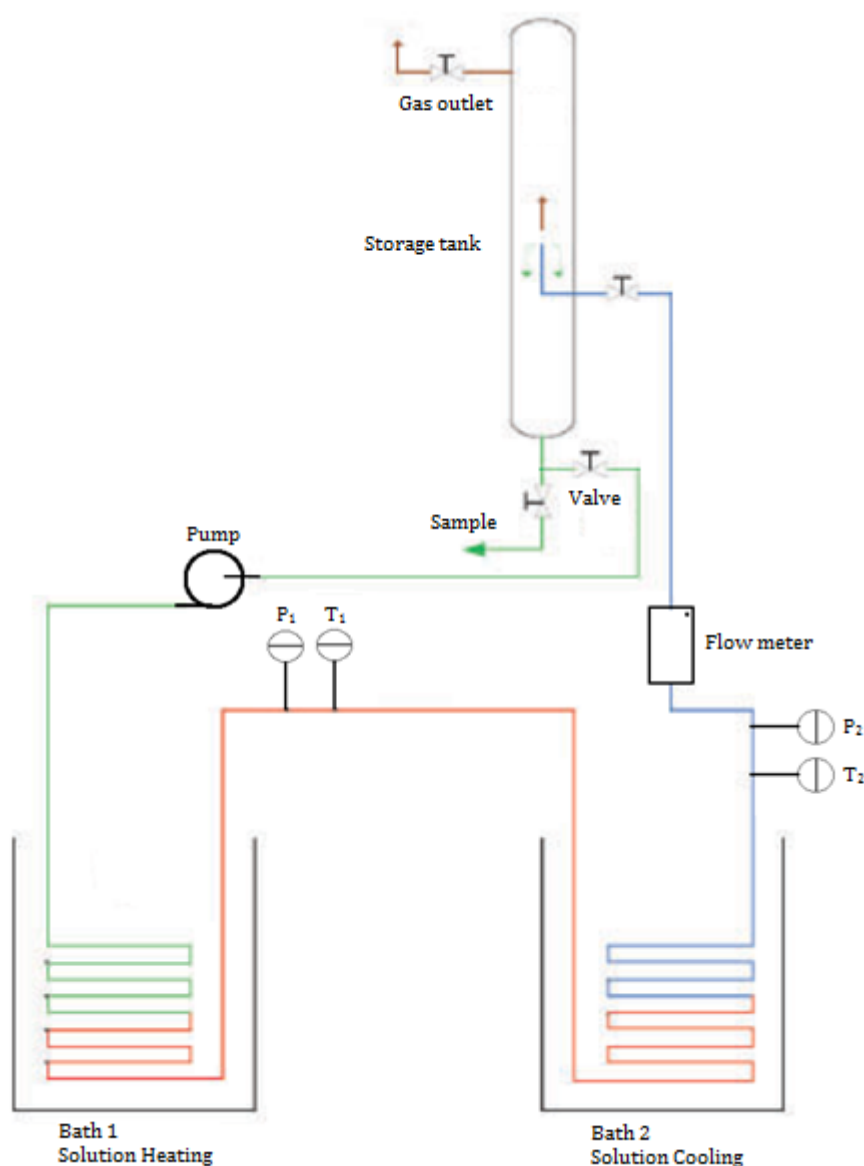
Uit de berekeningen is te concluderen dat het toevoegen van nanodeeltjes aan water een positief effect heeft op de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Dit zorgt ervoor dat de buislengte afneemt en dat de warmtewisselaar dus kleiner wordt. Een negatief effect van het toevoegen van nanodeeltjes aan water is dat de drukval over de buizen toeneemt. Hierdoor is er een groter pompvermogen nodig om het werkmedium rond te pompen. Zoals te zien is in figuur 4.3 wordt het vermogensquotiënt ook groter bij een hoger volumepercentage nanodeeltjes, dat wil zeggen dat bij een hoger volumepercentage er een groter pompvermogen nodig is ten opzichte van de warmtestroom. Dit heeft uiteindelijk als gevolg dat de totale efficiëntie van het systeem bij gebruik van nanodeeltjes minder wordt.

## 5. Experimenten

Tijdens de experimenten wordt er gekeken of een vloeistofstroom bestaande uit water waarin nanodeeltjes zijn gesuspendeerd een betere warmteoverdracht realiseert dan een stroom van alleen water en in hoeverre de drukval over het systeem veranderd.

### 5.1 Opstelling

Tijdens dit experiment maken wij gebruik van de TBAB Hydrate Slurry testopstelling van Hongxia Zhou in het Process en Energy Lab. Deze opstelling maakt gebruik van twee thermostatische baden die een vloeistofstroom kunnen verhitten en koelen. Dit is schematisch weergegeven in figuur 5.1. Deze opstelling maakt gebruik van twee spiraalwarmtewisselaars, geplaatst in thermostatische baden van Lauda.



Figuur 5.1 - Schematische weergave van de testopstelling



Vanuit de opslagtank wordt het medium naar het eerste bad gepompt, waar het op de begintemperatuur van 22°C wordt gebracht door een bad met stationaire temperatuur. Daarna wordt de vloeistof door een tweede bad met een lagere stationaire temperatuur gekoeld. Na deze koeling wordt de temperatuur van de uitgaande stroom gemeten, waarna het mengsel weer terugstroomt in de opslagtank.

## 5.2 Sensoren

Op een achttal plaatsen worden metingen verricht in de testopstelling. De eerste twee metingen worden gedaan door de temperatuursensoren van de baden. De temperatuur van het eerste bad wordt elke meting zo aangepast, dat het werkmedium tussen de twee baden een temperatuur  $T_1$  van 22°C heeft. Deze temperatuur wordt gemeten met de temperatuursensor tussen de twee baden. De temperatuur  $T_2$  van het gekoelde medium na het tweede bad wordt gemeten met de tweede temperatuursensor. Daarnaast wordt tegelijk met de temperatuurmetingen van de vloeistofstroom de druk in het systeem bepaald met twee drukmeters,  $P_1$  en  $P_2$ . Als laatste wordt de stroomsnelheid en dichtheid bijgehouden met een stroomsnelheidsmeter en een dichtheidsmeter aan het eind van het tweede bad.

Tijdens het experiment worden de gemeten waarden door de sensoren naar een centrale console gestuurd en op de computer weergegeven in tabellen en in een diagram. Alle waarden worden gekoppeld aan het tijdstip van de meting. De temperaturen worden gemeten met een nauwkeurigheid van 0.03°C (Temperature Controls), en de volumestroom met een maximaal gemeten fout van  $\pm 0.15\%$  (Portal Endress). De druk wordt gemeten met een nauwkeurigheid van ten minste 0.075% van de gemeten waarde. Deze waarden zullen worden doorberekend in de meetresultaten.

## 5.3 Meetprogramma

Bij het uitvoeren van de experimenten is het belangrijk dat de verschillende uit te voeren experimenten zo veel mogelijk aan elkaar gelijk zijn. Om dit te realiseren moet gekeken worden welke variabelen constant gehouden moeten worden en welke als variabel moeten worden beschouwd.

Na uitvoerige bestudering van het systeem is een aantal waarden als constant genomen en een aantal waarden als variabel. De temperatuur van het eerste thermostatische bad met als functie het opwarmen van het medium naar 22°C wordt als variabel genomen. Hier is voor gekozen omdat bij verschillende snelheden de temperatuur van de uitgaande stroom van dit bad verandert. De temperatuur van het tweede thermostatische bad wordt constant gehouden op een temperatuur van 15.2°C. Het is belangrijk dat deze temperatuur op 15.2°C wordt gehouden, zodat een betrouwbaar resultaat kan worden verkregen bij de experimenten.

Aan het begin van de experimenten wordt als eerste een referentiemeting gemaakt met als medium water zonder nanodeeltjes. Deze meting wordt uitgevoerd zodat de uitkomsten van de metingen met de suspensie bestaande uit water en nanodeeltjes goed vergeleken kunnen worden, zodat een duidelijk beeld van de verbetering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt ontstaat.

Het is zowel bij deze referentiemeting als bij de metingen met nanodeeltjes in het medium van belang dat het systeem de tijd krijgt om tot een goed evenwicht te komen. Als het systeem namelijk in evenwicht is, kan met zekerheid de tijdsafhankelijke situatie gemeten worden. Er is besloten om

ten tijden van deze tijdsafhankelijke situatie te meten over een tijdsinterval van vijf minuten. In dit tijdsinterval worden 300 metingen verricht. De gemeten waarden worden hierover gemiddeld zodat incidentele fouten worden geëlimineerd en er een duidelijk tijdsafhankelijk beeld ontstaat.

Met elk werkmedium wordt geëxperimenteerd op verschillende debieten. Dit wordt gedaan zodat er tijdens het experiment wordt geëxperimenteerd met verschillende waarden van het Reynolds getal. Aangezien de viscositeit en dichtheid groter wordt met een groter volumepercentage nanodeeltjes, zal de stroomsnelheid hierdoor steeds moeten worden aangepast. Als de verschillende metingen met de juiste waarden van het Reynolds getal zijn uitgevoerd, kan er aan het eind van de experimenten een duidelijk verband tussen warmteoverdracht, stroomsnelheid en pompvermogen worden getrokken.

## 5.4 Oplossingen

Tijdens de experimenten zullen metingen worden verricht aan oplossingsstromen met drie verschillende volumepercentages nanodeeltjes. Omdat de dichtheid van deze nanodeeltjes hoger is dan die van het oplossingsmedium (water), zal het gewichtspercentage niet gelijk zijn. De volumepercentages waarmee zal worden gemeten zijn 0, 0.5 en 1 %vol. Deze waarden kunnen ook worden geïnterpreteerd als 0, 5.000 en 10.000 ppm (parts per million). Tijdens het experiment wordt gebruikgemaakt van gedemineraliseerd water in plaats van normaal kraanwater. Hier is voor gekozen om eventuele fluctuaties in chemische samenstelling te voorkomen.

## 5.5 Veiligheid

Het werken met nanodeeltjes brengt een aantal gevaren met zich mee. Over nanodeeltjes is nog niet heel veel bekend, dus ook niet over de veiligheidsmaatregelen die moeten worden getroffen. Daarom worden onoplosbare en droge nanodeeltjes eigenlijk altijd gezien als nanotoxisch. Dit houdt in dat contact met ogen en huid, inademing en ingestie altijd moeten worden voorkomen.

De gebruikte nanodeeltjes in dit experiment, Aluminiumoxide  $Al_2O_3$ , is wél oplosbaar, dus alleen in droge vorm is bescherming voor inademing nodig.

## 6. Resultaten

Bij het beschouwen van de resultaten wordt op een aantal dingen gelet. Ten eerste worden de sensoren elke seconden afgelezen over een tijdsinterval van vijf minuten om zo een duidelijk tijdsafhankelijk beeld te krijgen van de te onderzoeken variabelen. Uit deze data wordt vervolgens berekend hoe de warmteoverdrachtscoëfficiënt en drukval verandert.

### 6.1 Resultaten metingen

Als eerste beschouwen we de 'referentietest', de meting met als werkmedium water. Daarna wordt gemeten met de twee verschillende oplossingen. De resultaten van deze metingen zijn in tabel 6.1, 6.2, 6.3 en 6.4 uitgeschreven.

Tabel 6.1: Resultaten van de referentiemeting

%vol	$C_p$ [J/Kg K]	Reynolds getal	$\dot{m}$ [kg/h]	T $bad_2$ [°C]	$T_1$ $\pm 0.03$ [°C]	$T_2$ $\pm 0.03$ [°C]	h [W/m <sup>2</sup> *K]	Q [W]
0,0	4185	967	16.4 $\pm 0.025$	15.2	22.0	18.3	1150.3 $\pm 1.5\%$	70.54
		2841	48.2 $\pm 0.072$	15.2	22.0	18.5	2925.6 $\pm 3.0\%$	196.11
		4674	79.3 $\pm 0.119$	15.2	22.0	19.0	4659.6 $\pm 1.8\%$	276.56
		6466	109.7 $\pm 0.165$	15.2	22.0	19.2	6157.0 $\pm 2.0\%$	357.07

Tabel 6.1: Resultaten van 0.5 %vol meting

%vol	$C_p$ [J/Kg K]	Reynolds getal	$\dot{m}$ [kg/h]	T $bad_2$ [°C]	$T_1$ $\pm 0.03$ [°C]	$T_2$ $\pm 0.03$ [°C]	h [W/m <sup>2</sup> *K]	Q [W]
0.5	4117	967	18.0 $\pm 0.027$	15.2	22.0	18.3	1349.8 $\pm 1.4\%$	76.16
		2841	53.0 $\pm 0.080$	15.2	22.0	18.6	3203.8 $\pm 1.6\%$	206.08
		4674	87.2 $\pm 0.131$	15.2	22.0	18.9	4695.0 $\pm 1.8\%$	309.14
		6466	120.7 $\pm 0.181$	15.2	21.9	19.1	6367.4 $\pm 1.9\%$	386.49

Tabel 6.2: Resultaten van de 1.0 %vol meting

%vol	$C_p$ [J/Kg K]	Reynolds getal	$\dot{m}$ [kg/h]	T $bad_2$ [°C]	$T_1$ $\pm 0.03$ [°C]	$T_2$ $\pm 0.03$ [°C]	h [W/m <sup>2</sup> *K]	Q [W]
1.0	4055	967	21.3 $\pm 0.032$	15.2	22.1	18.3	1308.7 $\pm 1.5\%$	91.17
		2841	62.7 $\pm 0.095$	15.2	22.0	18.7	3521.7 $\pm 1.7\%$	233.06
		4674	103.1 $\pm 0.155$	15.2	22.0	19.1	5117.1 $\pm 2.0\%$	336.78
		6466	142.6 $\pm 0.214$	15.2	22.0	19.3	7560.3 $\pm 2.1\%$	433.68

### 6.2 Berekeningen

Met de gemeten waarden kunnen nu parameters worden berekend, waaraan kan worden afgelezen of het toevoegen van de nanodeeltjes effect heeft gehad. In dit geval worden de resultaten uitgedrukt in de warmteoverdrachtscoëfficiënt, drukval en vermogensquotiënt bij specifieke Reynolds getallen.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt uit de resultaten met de volgende vergelijkingen berekend:

$$q = \frac{\dot{m}C_p(T_i - T_o)}{\pi d_h l} \quad (22)$$

$$h = \frac{q}{(T_w - T_b)} \quad (23)$$

Om een zo goedmogelijke benadering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt te krijgen is het belangrijk de temperatuur van de binnenwand van de buis  $T_w$  te berekenen. Dit is iteratief gedaan met behulp van de volgende formules (Mohammed, 2011)

$$Nu = 0.021Re^{0.85}Pr^{0.4}\left(\frac{r_i}{R}\right)^{0.1} \quad (24)$$

$$T_w = \frac{Q}{h_i \pi d_h L} + T_b \quad (25)$$

Allereerst wordt het Nusselt nummer uitgerekend met behulp van de formules (3 en 4) uit hoofdstuk 2 voor het Reynolds getal en Prandtl getal. Met het Nusselt nummer wordt vervolgens met formule (1) een eerste waarde van  $h$  berekend. Deze wordt vervolgens door formule (25) gevoerd waaruit een eerste waarde van  $T_w$  ontstaat. Deze wordt weer ingevuld in formule (23) en vervolgens deze waarde van  $h$  weer in formule (25) enzovoort, totdat  $T_w$  en  $h$  een stabiele waarden hebben ten opzichte van elkaar.

Bij deze formules staat  $m$  staat voor de massastroom,  $C_p$  voor de specifieke warmte,  $d_h$  voor de diameter van de buis (6 mm),  $l$  voor de lengte van de buis (5.22 m) in het koude bad,  $T_w$  staat voor de iteratief bepaalde wandtemperatuur en  $T_b$  is hier het gemiddelde tussen  $T_i$  en  $T_o$ . Het uitwerken van deze vergelijkingen en vergelijking (14) geeft de resultaten die zijn weergegeven in tabel 6.4.

Tabel 6.4: Verbetering van experimentele waarden

Reynolds getal	967	2841	4674	6466
Verbetering $h$ bij 0.5 %vol	17.3%	9.5%	0.8%	3.4%
Verbetering $h$ bij 1.0 %vol	13.8%	20.4%	9.8%	22.3%

Aan de hand van de gevonden drukval over het systeem is het de vermogensquotiënt te berekenen. Allereerst wordt met formule (20) uit hoofdstuk 4 het pompvermogen berekend vervolgens wordt deze gedeeld door de hoeveelheid warmteoverdracht van de waterstroom naar het koelmiddel.

De formule **Ongeldige bron opgegeven**. voor deze waarde van warmteoverdracht is, waarvan van het antwoord de absolute waarden wordt genomen. De resultaten zijn weergegeven in tabellen 6.4 t/m 6.6.

$$Q = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (26)$$

Tabel 6.5: Resultaten van de referentiemeting

%vol	$C_p$ [J/Kg K]	Reynolds getal	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\dot{m}$ [kg/h]	Drukval [kPa]	$P_{pomp}$ [W]	$P_{pomp}/Q$ *10 <sup>-4</sup>
0,0	4185	967	998.5	16.4 ±0.025	3.2 ±0.005	0.0146	2.1049
		2841	998.3	48.2 ±0.072	9.7 ±0.015	0.1301	6.7161
		4674	998.3	79.3 ±0.119	18.8 ±0.028	0.4148	15
		6466	998.3	109.7 ±0.165	29.1 ±0.044	0.8883	25

Tabel 6.6: Resultaten van 0.5 %vol meting

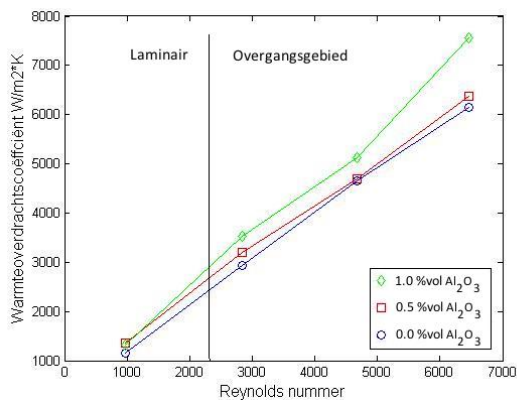
%vol	$C_p$ [J/Kg K]	Reynolds getal	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\dot{m}$ [kg/h]	Drukval [kPa]	$P_{\text{pomp}}$ [W]	$P_{\text{pomp}}/Q$ *10 <sup>-4</sup>
0.5	4117	967	1010.2	18.0 ±0.027	3.4 ±0.005	0.0168	2.1750
		2841	1010.3	53.0 ±0.080	11.2 ±0.018	0.1632	7.7610
		4674	1010.4	87.2 ±0.131	22.0 ±0.033	0.5274	17
		6466	1010.6	120.7 ±0.181	33.7 ±0.051	1.1180	28

Tabel 6.7: Resultaten van de 1.0 %vol meting

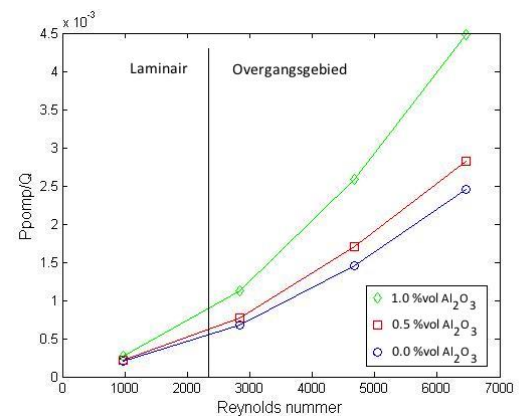
%vol	$C_p$ [J/Kg K]	Reynolds getal	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\dot{m}$ [kg/h]	Drukval [kPa]	$P_{\text{pomp}}$ [W]	$P_{\text{pomp}}/Q$ *10 <sup>-4</sup>
1.0	4055	967	1025.0	21.3 ±0.032	4.2 ±0.005	0.0242	2.7220
		2841	1025.5	62.7 ±0.095	15.5 ±0.023	0.2634	11
		4674	1025.4	103.1 ±0.155	30.6 ±0.046	0.8546	26
		6466	1023.7	142.6 ±0.214	49.8 ±0.075	1.9270	45

### 6.3 Visualisering

De experimentele uitkomsten kunnen worden weergegeven in grafieken. De figuren 6.1 en 6.2 zijn voor de verschillende waarden van de warmteoverdrachtscoëfficiënt en vermogensquotiënt bij de respectievelijke Reynolds getallen.



Figuur 5.1 - Warmteoverdrachtscoëfficiënt bij specifieke Re



Figuur 6.2 - Vermogensquotiënt bij specifieke Re

Zoals te zien is in figuur 6.1 verbeterd de warmteoverdrachtscoëfficiënt door het toevoegen van de nanodeeltjes. Nadeel van het toevoegen van nanodeeltjes is te zien in figuur 6.2 hier is te zien dat de vermogensquotiënt groter wordt door het toevoegen van nanodeeltjes. Dit vergt dus meer energieverbruik van de pomp.

## 7. Discussie en conclusie

### 7.1 Discussie

Tijdens de experimenten hebben de omgevingsfactoren een grotere rol gespeeld dan er van te voren werd gedacht. De eerste referentiemetingen zijn gedaan bij een omgevingstemperatuur van ongeveer 22°C. In de daarop volgende week, tijdens de eerste metingen met nanodeeltjes, is door de zomerse temperaturen de omgevingstemperatuur bij de opstelling opgelopen tot boven de 30°C. Hierdoor kwamen uit de eerste metingen met nanodeeltjes negatieve resultaten. Vervolgens zijn er opnieuw referentiemetingen uitgevoerd bij ongeveer dezelfde omgevingstemperatuur. Vergelijken met de waarden van deze metingen zijn de resultaten van de metingen met nanodeeltjes wel positief. Het blijkt dus dat de omgevingstemperatuur een grotere invloed heeft op het systeem dan in eerste instantie werd aangenomen. Dit komt waarschijnlijk doordat de isolatie van het systeem niet optimaal is.

Voordat de testopstelling werd gevuld met de nanovloeistof, is deze tot drie keer toe schoongespoeld met demiwater. Na het uitvoeren van de tests met de suspensie met 0.5 %vol nanodeeltjes moest de suspensie worden afgetapt, zodat het volumepercentage verhoogd kon worden. Voordat de tests werden uitgevoerd had de suspensie een melkwitte kleur, bij het aftappen bleek echter dat deze een grijze kleur had gekregen. Dit kan duiden op een vervuiling van een andere stof in het systeem of het vormen van agglomeraties in de nanovloeistof. Tevens bleek de dichtheid van de nanovloeistof te dalen tijdens de experimenten. Dit kan het gevolg zijn van het bezinken van de nanodeeltjes in het systeem, de (onbekende) vervuiling of het blijven 'plakken' van de nanodeeltjes aan de wanden van de buizen en afleesglazen. Het verschil in dichtheid is echter zo klein, dat dit geen grote gevolgen heeft gehad op de resultaten van het onderzoek.

Over het bezinken van de nanodeeltjes in een nanovloeistof is verder niet veel informatie beschikbaar. Zo wijken verschillende studies af in het maken van een nanovloeistof, met name in het gebruik van wel of geen ultrasoon bad. Verder werd er bij de theoretische berekeningen (veelal) uitgegaan van een volledig turbulente stroming. De testopstelling bleek deze stroming echter niet te kunnen ontwikkelen. De testopstelling is niet tot zijn uiterste waarden benut vanwege de veiligheid.

### 7.2 Conclusie

In de hypothese werd gesteld dat de warmteoverdracht met minimaal 5% verbeterd zou kunnen worden door de toevoeging van additieven. De resultaten van de metingen gaven bij de verschillende mengsels significant hogere verbetering van de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Voor een mengsel met 0.5 %vol nanodeeltjes was de verbetering voor verschillende type stromingen te vinden in een range van 0.8% t/m 17.3%. Voor een mengsel met 1.0 %vol nanodeeltjes was dit zelfs 9.8% t/m 22.3%. Dit bleek overeen te komen met de theoretische berekeningen uit hoofdstuk 3. Na de berekening van de warmteoverdrachtscoëfficiënt bleken er negatieve effecten bij te komen. Zo bleek de drukval aanzienlijk toe te nemen. De grootste toename was bij het experiment 0.5 bar en bij het theoretische systeem 2.5 bar. Dit heeft als direct gevolg dat er een groter pompvermogen nodig is voor beide systemen. Ondanks dit negatieve effect blijkt dat de gestelde hypothese juist is, want door de toevoeging van  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanodeeltjes aan het werkmedium is de warmteoverdracht toegenomen met meer dan 5%.

## 8. Aanbevelingen

Dit onderzoek is ontstaan uit het idee om de warmteoverdracht te verbeteren van de warmtewisselaar voor het systeem van Bluerise dat drinkwater produceert uit vochtige lucht. Omdat het hier om drinkwater gaat, is het gebruik van nanodeeltjes in dit systeem niet mogelijk. Nadat de suspensie door de warmtewisselaar is gegaan, mogen er namelijk geen nanodeeltjes achterblijven in het drinkwater en bij de scheidingsmethoden die op dit moment beschikbaar zijn is dit niet met 100% zekerheid te zeggen. Ook zijn deze scheidingsmethoden lastig toe te passen in dit specifieke systeem, omdat het om een continu proces gaat.

Wanneer Bluerise besluit om nanodeeltjes te gebruiken, zal het systeem kortere buizen bevatten maar wel over een groter pompvermogen moeten beschikken. Er zou een economische analyse moeten worden gemaakt, waarbij wordt onderzocht of dit opweegt tegen de kosten van een systeem met een ander werkmedium met langere buizen maar een lager pompvermogen. Als er gekozen wordt voor nanodeeltjes moet het wel gaan om een gesloten systeem, zodat de nanodeeltjes niet gescheiden te hoeven worden.

Verder zal er nader onderzoek gedaan moeten worden naar het gedrag van een nanovloeistof in specifieke systemen. Hierbij kan gedacht worden aan onderzoek naar het bezinken van de nanodeeltjes, de agglomeratie van de nanodeeltjes en het achterblijven van nanodeeltjes in een systeem.

# Bibliografie

A.F.Mills. (1999). *Heat Transfer*. Upper Saddle River: Pearson.

Aly, W. I. (2014). Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop of nanofluid in coiled tube-in-tube heat exchangers. *Energy Conversion and Management* 79, 304-316.

Mills, A. (1999). *Heat Transfer*. Upper Saddle River: Pearson.

Mohammed, H. (2011). Experimental Study of Free Convection in Coiled Tube Heat Exchanger with Vertical Orientation. *Tikrit Journal of EGINEERING SCIENCES*, 80-87.

Portal Endress. (n.d.). Retrieved mei 6, 2014, from Portal Endress:  
<http://portal.endress.com/wa002/ProductContainerGUI/nl/nl/80F>

Temperature Controls. (n.d.). Retrieved Mei 6, 2014, from Temperature Controls:  
<http://www.temperature.com.au/Support/RTDSensors/RTDaccuracyClassAClassB13DIN110DIN.aspx>

White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill.

Zan Wu, L. W. (2013). Pressure drop and convective heat transfer of water and nanofluids in a double-pipe helical heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* 60, 266-274.



# Bijlage A: Symbolenlijst

Term	Betekenis	Eenheid	Term	Betekenis	Eenheid
A	Buisoppervlakte	[m <sup>2</sup> ]	T	Temperatuur	[K] of [°C]
C <sub>p</sub>	Warmtecapaciteit bij constante druk	[J/kgK]	U	Totale warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m <sup>2</sup> K]
d	Buisdiameter	[m]	V	Stroomsnelheid	[m/s]
f	Frictiefactor	[ - ]	%vol	Volumepercentage	[%]
h	Warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m <sup>2</sup> K]	wt%	Gewichtspercentage	[%]
κ	Warmtegeleidingcoëfficiënt	[W/mK]	Δx	wanddikte	[m]
L	Buislengte	[m]			
ṁ	Massastroom	[kg/s]	<b>Subscripts</b>		
μ	Dynamische viscositeit	[Pa s]	Bf	Basisvloeistof	
Nu <sub>D</sub>	Nusselt nummer voor buizen	[ - ]	k	Koper	
ΔP	Drukval	[Pa]	m	Mengsel	
P	Druk	[Pa]	nf	Nanovloeistof	
Pr	Prandtl nummer	[ - ]	p	Nanodeeltje	
q	Warmteflux	[W/m <sup>2</sup> ]	w	Water	
Q	Warmtestroom	[W]	wm	Werkmedium	
ρ	Dichtheid	[kg/m <sup>3</sup> ]	zw	zeewater	
Re <sub>D</sub>	Reynolds getal voor buizen	[ - ]			

# Bijlage B: Opdracht

## *36. Fresh water production using direct contact condensation*

### **Description**

#### **Introduction**

Many regions in the world depend heavily on expensive desalinated water for its consumption, in particular tropical areas. Current mainstream desalination technologies (Reverse Osmosis and Multi-Stage Flash Evaporation) can be considered to be quite energy intensive and thus costly. Today's challenge is to design a desalination system that could run with local available renewable energy and provide affordable fresh water, even in the most arid environments.

The energy resource that has serious potential to provide a solution is the ocean. The oceans receive 70% of all sunlight that falls on the Earth, making them the largest solar collector. The sun's energy warms the surface water, while the deep ocean water remains cold, which creates the ocean's naturally available temperature gradient, or thermal energy. This year-round available thermal energy present in the tropics could drive seawater desalination and enable fresh water production in an economic and ecological manner.

The selected configuration for desalination is a direct contact condensation process. It makes use of the relative high humidity air in the tropics and condenses it against a cooled fresh water loop in a packed bed column. The cold seawater is used in an external heat exchanger to cool the fresh water loop. Out comes fresh water and dry air without the need of energy intensive equipment.

#### **Possible research topic**

Analysis of the desalination method in transient conditions (e.g. varying air humidity, temperature) considering the relation of energy requirements vs. fresh water production and validation of the theoretical model with an experimental setup.

#### **Requirements**

Develop a model for optimization of the system's energy consumption versus fresh water production and validate the model results by constructing and running an experimental setup of the system.

#### **Remarks**

This project has been proposed by and will be developed in cooperation with Bluerise BV (YES Delft).

#### **Department**

Process and Energy (P&E)

#### **Supervisors**

Dr.ir. C.A. Infante Ferreira ([c.a.infanteferreira@tudelft.nl](mailto:c.a.infanteferreira@tudelft.nl)) Process and Energy (P&E)

Ir. D. Acevedo ([d.acevedo@bluerise.nl](mailto:d.acevedo@bluerise.nl)) Bluerise BV (YES Delft)

Other

# Bijlage C: Meetdata

In deze bijlage vind u een aantal meetgegevens van de verschillende experimenten. Uit de 300 meetpunten per meting zijn 8 metingen weergegeven die representatief zijn voor volledige 300 metingen.

**Tabel 3 - Meetgegevens referentie meting bij Re=967**

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
21-05-2014 10:24:46	17,995	15,196	5,111	998,5000	0,098	0,064	21,998	18,334
21-05-2014 10:24:47	17,995	15,232	5,111	998,5000	0,098	0,064	21,960	18,334
21-05-2014 10:24:48	17,995	15,232	5,111	998,4677	0,098	0,070	21,960	18,334
21-05-2014 10:24:49	17,995	15,196	5,108	998,4758	0,098	0,065	21,960	18,372
21-05-2014 10:24:50	17,995	15,232	5,113	998,5000	0,098	0,070	21,960	18,334
21-05-2014 10:24:51	17,995	15,232	5,111	998,5000	0,098	0,064	21,998	18,334
21-05-2014 10:24:52	17,995	15,196	5,108	998,5000	0,098	0,064	21,998	18,334
21-05-2014 10:24:53	17,995	15,232	5,108	998,5000	0,098	0,069	21,960	18,372

**Tabel 4 - Meetgegevens referentie meting bij Re=2841**

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
21-05-2014 09:49:37	18,759	15,196	14,884	998,3143	0,262	0,163	21,960	18,523
21-05-2014 09:49:38	18,759	15,196	14,880	998,3251	0,262	0,163	21,960	18,523
21-05-2014 09:49:39	18,722	15,196	14,880	998,3251	0,260	0,163	21,998	18,561
21-05-2014 09:49:40	18,722	15,196	14,887	998,3385	0,260	0,163	21,960	18,523
21-05-2014 09:49:41	18,722	15,232	14,892	998,3439	0,260	0,163	21,960	18,523
21-05-2014 09:49:42	18,722	15,196	14,887	998,3224	0,260	0,163	21,998	18,523
21-05-2014 09:49:43	18,759	15,196	14,889	998,3331	0,260	0,163	21,998	18,523
21-05-2014 09:49:44	18,722	15,196	14,884	998,3331	0,260	0,163	21,998	18,523

**Tabel 5 - Meetgegevens referentie meting bij Re=4674**

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
21-05-2014 09:29:04	19,413	15,196	24,881	998,2820	0,513	0,331	22,077	18,976
21-05-2014 09:29:05	19,413	15,196	24,881	998,2820	0,513	0,331	22,077	18,938
21-05-2014 09:29:06	19,450	15,196	24,844	998,2712	0,514	0,327	22,077	18,976
21-05-2014 09:29:07	19,413	15,232	24,878	998,2739	0,514	0,329	22,077	18,976
21-05-2014 09:29:08	19,413	15,196	24,859	998,2955	0,514	0,329	22,077	18,976
21-05-2014 09:29:09	19,450	15,232	24,856	998,2955	0,514	0,329	22,077	19,013
21-05-2014 09:29:10	19,450	15,232	24,856	998,3035	0,514	0,329	22,077	18,976
21-05-2014 09:29:11	19,450	15,232	24,854	998,2847	0,513	0,329	22,077	18,976

**Tabel 6 - Meetgegevens referentie meting bij Re=6466**

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
21-05-2014 09:10:31	19,740	15,232	34,718	998,3116	0,841	0,548	21,998	19,203
21-05-2014 09:10:32	19,740	15,232	34,725	998,3090	0,840	0,548	21,998	19,203
21-05-2014 09:10:33	19,740	15,232	34,730	998,2874	0,841	0,548	21,998	19,203
21-05-2014 09:10:34	19,704	15,232	34,732	998,2847	0,840	0,548	21,998	19,203
21-05-2014 09:10:35	19,704	15,232	34,730	998,3090	0,840	0,548	21,998	19,203
21-05-2014 09:10:36	19,704	15,232	34,730	998,3090	0,840	0,546	21,998	19,203
21-05-2014 09:10:37	19,704	15,232	34,728	998,2794	0,841	0,548	21,998	19,203
21-05-2014 09:10:38	19,704	15,232	34,732	998,3035	0,840	0,548	21,998	19,203

Tabel 7 - Meetgegevens 0.5 %vol bij Re=967

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m3]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
19-05-2014 15:13:32	17,959	15,160	5,524	1010,2534	0,081	0,045	22,077	18,297
19-05-2014 15:13:33	17,959	15,160	5,522	1010,2400	0,080	0,045	22,077	18,297
19-05-2014 15:13:34	17,995	15,160	5,522	1010,2400	0,080	0,047	22,077	18,297
19-05-2014 15:13:35	17,995	15,160	5,524	1010,2400	0,080	0,047	22,077	18,334
19-05-2014 15:13:36	17,959	15,160	5,524	1010,2507	0,080	0,047	22,077	18,297
19-05-2014 15:13:37	17,995	15,160	5,524	1010,2292	0,080	0,047	22,077	18,297
19-05-2014 15:13:38	17,995	15,160	5,524	1010,2050	0,081	0,045	22,077	18,297
19-05-2014 15:13:39	17,995	15,160	5,524	1010,2050	0,081	0,045	22,037	18,297

Tabel 8 - Meetgegevens 0.5 %vol bij Re=2841

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m3]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
19-05-2014 14:35:54	18,686	15,160	16,195	1010,3233	0,277	0,164	22,037	18,561
19-05-2014 14:35:55	18,686	15,160	16,200	1010,3126	0,277	0,164	22,037	18,561
19-05-2014 14:35:56	18,686	15,160	16,198	1010,3072	0,276	0,164	22,037	18,561
19-05-2014 14:35:57	18,686	15,160	16,190	1010,3072	0,276	0,164	22,037	18,561
19-05-2014 14:35:58	18,686	15,160	16,190	1010,3153	0,274	0,164	21,998	18,598
19-05-2014 14:35:59	18,722	15,160	16,212	1010,3260	0,276	0,164	22,037	18,561
19-05-2014 14:36:00	18,722	15,160	16,217	1010,3153	0,276	0,164	22,037	18,561
19-05-2014 14:36:01	18,722	15,160	16,225	1010,3314	0,276	0,164	22,037	18,561

Tabel 9 - Meetgegevens 0.5 %vol bij Re=4674

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m3]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
19-05-2014 14:06:47	19,086	15,160	26,849	1010,4068	0,578	0,358	21,998	18,863
19-05-2014 14:06:48	19,086	15,160	26,847	1010,4041	0,579	0,358	21,998	18,863
19-05-2014 14:06:49	19,122	15,160	26,847	1010,4041	0,579	0,360	21,998	18,900
19-05-2014 14:06:50	19,122	15,160	26,879	1010,3987	0,578	0,358	22,037	18,900
19-05-2014 14:06:51	19,086	15,160	26,876	1010,4202	0,579	0,358	21,998	18,900
19-05-2014 14:06:52	19,086	15,160	26,845	1010,4014	0,578	0,358	21,960	18,900
19-05-2014 14:06:53	19,122	15,160	26,869	1010,4041	0,579	0,358	21,960	18,900
19-05-2014 14:06:54	19,122	15,160	26,852	1010,4041	0,579	0,358	21,998	18,900

Tabel 10 - Meetgegevens 0.5 %vol bij Re=6466

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m3]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
19-05-2014 13:34:58	19,304	15,160	26,982	1010,5844	0,575	0,352	22,037	19,013
19-05-2014 13:34:59	19,304	15,160	26,972	1010,5817	0,573	0,354	22,037	19,052
19-05-2014 13:35:00	19,304	15,160	26,974	1010,6113	0,575	0,355	22,037	19,052
19-05-2014 13:35:01	19,304	15,160	26,957	1010,6113	0,575	0,355	22,077	19,013
19-05-2014 13:35:02	19,304	15,160	26,957	1010,6167	0,575	0,354	21,998	19,013
19-05-2014 13:35:03	19,304	15,160	26,996	1010,6274	0,571	0,354	22,037	19,013
19-05-2014 13:35:04	19,304	15,160	26,960	1010,6194	0,573	0,354	21,998	19,013
19-05-2014 13:35:05	19,304	15,160	26,984	1010,5844	0,575	0,355	22,037	19,013

Tabel 11 - Meetgegevens 1.0 %vol bij Re=697

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m3]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
20-05-2014 11:36:17	18,141	15,160	6,505	1025,0205	0,126	0,087	22,077	18,334
20-05-2014 11:36:18	18,141	15,160	6,505	1025,0205	0,132	0,087	22,077	18,334
20-05-2014 11:36:19	18,141	15,160	6,500	1025,0178	0,131	0,087	22,077	18,334
20-05-2014 11:36:20	18,141	15,160	6,507	1025,0178	0,131	0,087	22,077	18,334
20-05-2014 11:36:21	18,141	15,160	6,507	1025,0205	0,128	0,087	22,037	18,334
20-05-2014 11:36:22	18,141	15,160	6,505	1025,0259	0,126	0,087	22,077	18,334
20-05-2014 11:36:23	18,141	15,196	6,507	1024,9883	0,132	0,086	22,077	18,334
20-05-2014 11:36:24	18,141	15,160	6,502	1024,9990	0,128	0,087	22,077	18,334

Tabel 12 - Meetgegevens 1.0 %vol bij Re=2841

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m3]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
20-05-2014 12:12:31	18,941	15,196	19,150	1025,0690	0,403	0,252	22,037	18,749
20-05-2014 12:12:32	18,941	15,160	19,133	1025,0475	0,403	0,252	22,037	18,712
20-05-2014 12:12:33	18,977	15,160	19,128	1025,0313	0,405	0,252	22,037	18,712
20-05-2014 12:12:34	18,941	15,160	19,143	1025,0529	0,405	0,252	22,037	18,712
20-05-2014 12:12:35	18,941	15,160	19,143	1025,0529	0,403	0,247	22,037	18,749
20-05-2014 12:12:36	18,941	15,160	19,150	1025,0878	0,405	0,252	22,037	18,712
20-05-2014 12:12:37	18,941	15,160	19,143	1025,0393	0,405	0,247	22,037	18,749
20-05-2014 12:12:38	18,941	15,196	19,155	1025,0366	0,405	0,249	22,037	18,749

Tabel 13 - Meetgegevens 1.0 %vol bij Re=4674

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m3]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
20-05-2014 12:41:36	19,304	15,196	32,000	1025,1040	0,843	0,534	21,960	19,127
20-05-2014 12:41:37	19,304	15,160	31,981	1025,0985	0,838	0,534	21,998	19,164
20-05-2014 12:41:38	19,304	15,160	32,013	1025,0985	0,841	0,534	21,998	19,164
20-05-2014 12:41:39	19,304	15,196	31,996	1025,1067	0,841	0,534	21,998	19,164
20-05-2014 12:41:40	19,304	15,196	31,996	1025,1067	0,843	0,535	21,960	19,127
20-05-2014 12:41:41	19,304	15,196	31,991	1025,0985	0,844	0,535	21,998	19,127
20-05-2014 12:41:42	19,304	15,160	32,003	1025,0958	0,843	0,534	21,998	19,127
20-05-2014 12:41:43	19,304	15,196	31,998	1025,0985	0,843	0,534	21,998	19,127

Tabel 14 - Meetgegevens 1.0 %vol bij Re=6466

	Tbad1 [°C]	Tbad2 [°C]	Pomp frequentie [Hz]	Dichtheid [kg/m3]	P1 [bar]	P2 [bar]	T1 [°C]	T2 [°C]
20-05-2014 13:05:48	19,450	15,196	44,853	1023,7397	1,419	0,913	22,037	19,391
20-05-2014 13:05:49	19,450	15,196	44,851	1023,7397	1,411	0,913	22,077	19,353
20-05-2014 13:05:50	19,450	15,160	44,836	1023,7236	1,415	0,913	22,077	19,353
20-05-2014 13:05:51	19,450	15,160	44,839	1023,7236	1,415	0,915	22,037	19,353
20-05-2014 13:05:52	19,450	15,160	44,839	1023,7236	1,411	0,915	22,037	19,353
20-05-2014 13:05:53	19,450	15,160	44,836	1023,7155	1,411	0,913	22,037	19,353
20-05-2014 13:05:54	19,450	15,196	44,826	1023,7317	1,413	0,915	22,037	19,353
20-05-2014 13:05:55	19,450	15,196	44,844	1023,7317	1,413	0,915	22,037	19,353

# Bijlage D: Logboek

## Week 1 (10-2 t/m 16-2)

Wachten op het onderzoeksonderwerp

## Week 2 (17-2 t/m 23-2)

### **Donderdag 20 februari 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Georiënteerd op het onderzoeksonderwerp. Ook hebben we literatuur verkregen en het rapport van de vorige onderzoeksgroep ingezien.

## Week 3 (24-2 t/m 2-3)

### **Dinsdag 24 februari 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Bluerise

Vorige onderzoeksgroep

Samantha van der Drift

Wat:

Kennismaking met Bluerise en de vorige onderzoeksgroep. Ook hebben we ons verder georiënteerd op het onderzoeksonderwerp

## Week 4 (3-3 t/m 9-3)

-

## Week 5 (10-3 t/m 16-3)

### **Maandag 10 maart 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Algemene voortgang project besproken

### **Woensdag 12 maart 2014**

Met wie:

Diego Acevedo

Wat:

Bespreking over de voortgang van het project. Onoplosbare vloeistoffen blijken niet te werken. Nu moeten we kijken naar andere methodes om de warmteoverdracht te verbeteren.

## Week 6 (17-3 t/m 23-3)

### **Maandag 17 maart 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Ingaan van nieuwe weg voor het project: nanodeeltjes, begin nieuw literatuuronderzoek.

Week 7 (24-3 t/m 30-3)

**Donderdag 27 maart 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Bespreking voortgang van het onderzoek naar de nanodeeltjes en een planning maken voor na de tentamens, alles wat we tot nu toe hebben moet op papier gezet worden

Week 8 (31-3 t/m 6-4)

Witte week

Week 9 (7-4 t/m 13-4)

Tentamenweek

Week 10 (14-4 t/m 20-4)

Tentamenweek

Week 11 (21-4 t/m 27-4)

**Dinsdag 22 april 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Hongxia Zhou

Wat:

Doorspreken van het verslag tot nu toe. Afspraken gemaakt met Hongxia Zhou over het experiment

Week 12 (28-4 t/m 4-5)

**Dinsdag 29 april 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Samantha van der Drift

Wat:

Bespreken van het verslag en de berekeningen in het verslag. Ook hebben we besproken wat ons onderzoek nog kan betekenen voor Bluerise

Week 13 (5-5 t/m 11-5)

**Dinsdag 6 mei 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Uitleg over bepaalde berekeningen voor de dimensionering van de warmtewisselaars

**Vrijdag 9 mei 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Bespreken van het verslag en opzet van het experiment

Week 14 (12-5 t/m 18-5)

-

Week 15 (19-5 t/m 25-5)

**Maandag 19 mei 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Bespreken van het verslag en voortgang van het experiment

**Dinsdag 20 mei 2014**

Met wie:

Diego Acevedo

Wat:

Bespreken van onze resultaten en wat die kunnen betekenen voor Bluerise.

Week 16 (26-5 t/m 1-6)

**Maandag 26 mei 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Bespreken veranderingen in het rapport en de minipaper. Ook hebben we de voortgang van het project besproken en gekeken naar de deadlines.

Week 17 (2-6 t/m 8-6)

**Maandag 2 juni 2014**

Met wie:

Dr. ir. C.A. Infante Ferreira

Wat:

Bespreken van de minipaper en enkele aanmerkingen op het verslag

Week 18 (9-6 t/m 15-6)