



KENNISINSTITUUT VOOR DE INSTALLATIESECTOR

Deellastberekeningsmodel koelbatterij

Auteur: D.R. van der Kooij
Studentnummer: 12057444
Opleiding: Werktuigbouwkunde
Onderwijsinstelling: De Haagse Hogeschool

DEELLASTBEREKENINGSMODEL KOELBATTERIJ

BACHELORSRIPTIE: EEN ONDERZOEK NAAR EEN BEREKENINGSMODEL VAN EEN
KOELBATTERIJ IN DEELLAST VOOR EEN ONTWERPEND INGENIEUR.



AUTEUR: D.R. van der Kooij

STUDENTNUMMER: 12057444

OPLEIDING: Werktuigbouwkunde

ONDERWIJSINSTELLING: De Haagse Hogeschool

DATUM: 03-06-2016

EERSTE BEGELEIDER: ir. A.C. Taal

TWEEDE BEGELEIDER: ir. R.F. Meijs

VOORWOORD

U leest de scriptie 'Deellastberekeningsmodel koelbatterij'. Dit onderzoek is in opdracht van ISSO, kennisinstituut voor installatietechniek, uitgevoerd. Het is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de opleiding werktuigbouwkunde aan de Haagse Hogeschool te Delft. Van februari 2016 tot en met juni 2016 ben ik bezig geweest met het onderzoek en het schrijven van mijn scriptie.

Ik heb de onderzoeksvraag voor deze scriptie samen met Jan Aerts en Michel Verkerk, respectievelijk mijn inhoudsdeskundige en scriptiebegeleider, uitgewerkt. Het uitgevoerde onderzoek was erg complex en heeft uiteindelijk geleid tot antwoord op de onderzoeksvragen. Tijdens het onderzoek stonden Jan Aerts en Michel Verkerk altijd klaar om mij te helpen, evenals de begeleider vanuit mijn opleiding, Arie Taal. Als ik vast kwam te zitten stond er altijd wel iemand klaar om mij te helpen. Ik wil dan ook graag de bovengenoemde personen bedanken voor de fijne begeleiding en ondersteuning tijdens mijn afstudeerstage.

Tevens wil ik mijn collega's bij ISSO bedanken voor de gezellige sfeer en fijne samenwerking. Ik heb vaak over mijn onderzoek kunnen sparren bij uitdagingen en klagen tijdens de momenten dat alles tegen zat. Mijn familie en vrienden wil ik ook bedanken voor de adviezen en steun, in het bijzonder mijn verloofde.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Dennis van der Kooij

Rotterdam, 3 juni 2016

SAMENVATTING

Het doel van dit project is het creëren van een eenvoudig model om een koelbatterij in deellast door te rekenen. Bij dit onderzoek past de onderstaande doelstelling:

“Een praktisch toepasbaar model creëren waarmee het mogelijk is voor een ontwerpend ingenieur om het gedrag van een koelbatterij in deellast te voorspellen ten behoeve van duurzame installaties, waarvoor inzicht nodig is in het functioneren van het wetenschappelijke model van koelbatterijen.”

Dit wordt ondersteund met de volgende probleemstelling:

“Op welke wijze is het mogelijk om een fysisch wiskundig model van het vermogen van een koelbatterij in deellast te maken met een gewenste marge van $\pm 5\%$, met als basis de gegevens van de leverancier(s), waarbij de formule bedoeld is voor een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties?”

Voor het bovenstaande probleem is een onderzoek gestart naar reeds bestaande modellen. Als eerste is hierbij gekeken naar verschillende typen modellen, denk hierbij aan theoretische (wetenschappelijke) en empirische (eenvoudige) modellen. Vanuit deze basis is er gezocht naar empirische modellen. Deze modellen hebben inzicht gegeven in de verschillende mogelijkheden om een warmtewisselaar op eenvoudige wijze door te rekenen.

Een aantal gebruikte modellen zijn:

- Grondslag formules; een set basisformules waar de meeste modellen op gebaseerd zijn.
- LMTD methode; methode om het gemiddelde temperatuurverschil over de koelbatterij te berekenen.
- Bypass/contact factor model; model dat de hoeveelheid lucht in contact met het oppervlak van de warmtewisselaar berekent.
- Een verbeterd ingenieursmodel voor warmtewisselaars; algemeen model dat dieper ingaat op de berekening van UA waarden.
- ACSS model; algemeen model dat ingaat op alle variabelen in een koelbatterij.
- TU-dictaat; formules om uitgaande temperaturen van een koelbatterij te bepalen door middel van een rendement.
- ISSO handboek; set formules waarmee de waarden in het Mollier diagram berekend kunnen worden.
- Formule van Merkel; set formules die dieper ingaan op de verplaatsing van lucht in de natte kant van een koelbatterij.

De gevonden modellen sloten niet aan op de wensen van het onderzoek. Hierna is besloten om de meest eenvoudige modellen te gebruiken en deze te combineren om te zien of dit tot een passend resultaat zou leiden, wat niet het geval was. De modellen waren niet te valideren met de aangeleverde validatie modellen. Het tweede model dat ontwikkeld was, gebaseerd op het bypass factor model, was ook niet te valideren. Dit model had geen mogelijkheid om deellastsituaties te berekenen. Het laatste model, gebaseerd op de grondslag formules en de formule van Merkel, is niet afgerond door een tekort aan tijd. Dit model zou goed in staat moeten zijn om een koelbatterij in deellast door te rekenen. Keerzijde hiervan is dat er een traag wiskundig proces gebruikt moet worden om de deellastsituatie uit te rekenen.

De conclusie uit het onderzoek is dat een eenvoudig model dat voldoet aan de eisen van het onderzoek niet mogelijk is. Er wordt aangeraden om vervolgonderzoek te doen aan de hand van dit rapport.

INHOUD

Voorwoord.....	1
Samenvatting.....	2
Figurenlijst.....	5
Symbolenlijst.....	6
Griekse symbolen.....	7
Subscripts.....	7
Begrippenlijst.....	8
1. Inleiding.....	11
2. Theoretisch kader.....	12
2.1 Warmtewisselaar model.....	12
2.2 Wensen van de ontwerpend ingenieur.....	13
2.3 Probleemstelling.....	13
2.4 Doelstelling.....	13
2.5 Grafische weergave model.....	14
2.6 Grenzen & randvoorwaarden.....	15
2.7 Onderzoeksmethode.....	15
3. Invloedsfactoren.....	16
3.1 Materialen van de koelbatterij.....	16
3.2 Dimensionering van de koelbatterij.....	16
3.3 Temperaturen binnen de koelbatterij.....	17
3.4 Warmteweerstand.....	17
3.5 Warmteoverdracht.....	17
3.6 Rendementen.....	18
3.7 Stroming.....	18
3.8 Condensatie.....	19
3.9 Luchtvochtigheid.....	19
3.10 Modelvalidatie.....	20
4. Bestaande modellen.....	21
4.1 Grondslag formules.....	22
4.2 NTU methode.....	22
4.3 LMTD (LMHD) methode.....	23
4.4 Een ingenieurs model voor warmtewisselaars.....	25
4.5 Versimpeld model voor het functioneren van gekoeld water koelbatterijen.....	26
4.6 Bypass/contact factor.....	27
4.7 Een verbeterd ingenieurs model voor warmtewisselaars.....	28

4.8 ACSS model	29
4.9 TU dictaat.....	30
4.10 ISSO handboek	31
4.11 Dauwpunt calculatie	31
4.12 Formule van Merkel	32
5. Modellen	33
5.1 Vergelijking modellen	34
5.2 Model 1	35
5.3 Model 2	38
5.4 Model 3 Bypass factor	40
5.5 Model 4 Merkel en grondslagformules	41
6. Validatie	44
6.1 Model 1	44
6.2 Model 2	44
6.3 Model 3 Bypass factor	44
6.4 Model 4 Merkel en grondslagformules	44
7. Conclusie & discussie.....	45
8. Aanbevelingen	46
Literatuurlijst	47
Bijlage I validatie model 2.....	48
Bijlage II Opdrachtgever	50
Bedrijfsomschrijving.....	50
Organisatie.....	50
Bijlage III Planning.....	52
Bijlage IV Competenties	53
Bijlage V Behaalde competenties	55
Analyseren	55
Ontwerpen.....	55
Realiseren.....	55
Beheren	55
Managen.....	56
Adviseren.....	56
Onderzoeken.....	56
Professionaliseren	56
Conclusie.....	57
Bijlage VI Evaluatie	58
Bijlage VII Mollier diagram.....	59

FIGURENLIJST

Figuur 1; Koelbatterij (ISSO, 2016)	12
Figuur 2; Grafische weergave model.....	14
Figuur 3; Vinnen koelbatterij (Lienhard, 2008)	16
Figuur 4; Temperatuurverloop Vochtige lucht naar water	17
Figuur 5; Warmteoverdracht, bron: (Wang, Cai, Soh, Li, & Xie, 2002)	18
Figuur 6; Turbulente en laminaire stroming (Incropera & Dewitt, 2011)	19
Figuur 7; Condensatie in leiding (Incropera & Dewitt, 2011)	19
Figuur 8; Warmteoverdracht binnen een koelbatterij (Incropera & Dewitt, 2011)	22
Figuur 9; Temperatuurverloop tegenstroomwarmtewisselaar (Incropera & Dewitt, 2011)	24
Figuur 10; Representatie model (Wang, Cai, Soh, Li, & Xie, 2002)	26
Figuur 11; Visuele weergave model. Links droog, rechts nat.....	43
Figuur 12; Planning overzicht	52
Figuur 13; Competenties ontwikkeld tijdens opleiding.....	53
Figuur 14; Competenties te ontwikkelen tijdens afstuderen	53
Figuur 15; Competenties ontwikkeld tijdens afstuderen.....	57

SYMBOLENLIJST

Bron: (ISSO, 2014)

Symbool	Betekenis	Eenheid
A	Oppervlakte	[m ²]
BPF	Bypass factor	[-]
C	Soortelijke warmtestroom	[kJ/K·s]
c	Dauwpunt	[-]
c_p	Soortelijke warmte	[kJ/kg·K]
d	Dikte	[m]
D	Inwendige diameter	[m]
d	Diameter	[m]
f	Aandeel nat oppervlak	[-]
h	Warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m ² K]
h	Enthalpie	[J/kg]
h	Massastroomcoëfficiënt	[kg/m ² s]
m	Massa	[kg]
N	Aantal	[-]
NTU	Number of transfer units	[-]
P	Dampspanning	[N/m ²]
q_m	Massastroom	[kg/s]
q_v	Volumestroom	[m ³ /h]
R	Warmteweerstand	[W/K]
r	Weerstand	[-]
RH	Relatieve vochtigheid	[%]
S	Verhouding voelbare en totale warmteoverdracht	[-]
T	Temperatuur	[°C of K]
U	Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m ² K]
V	Snelheid	[m/s]
w	Luchtvochtigheid verhouding	[kg/kg]
x	Specifieke luchtvochtigheid	[kg/kg]

GRIEKSE SYMBOLEN

Symbol	Betekenis	Eenheid
α	Warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m ² K]
β	Contact factor	[-]
ϵ	Effectiviteit	[-]
η	Dynamische viscositeit	[N·s/m ²]
η	Rendement	[-]
θ	Temperatuur	[°C of K]
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m·K]
λ	Soortelijke warmte	[J/kg·K]
ρ	Dichtheid	[kg/m ³]
ϕ	Warmtestroom	[W]

SUBSCRIPTS

Symbol	Betekenis
a	Lucht
bd	Dauwpunt
cir	Cirkel
cond	Condensatie
ext	Externe
face	Aanzicht
i	Ingaand
int	Interne
lmtd	Log mean temperature difference
lmhd	Log mean enthalpie difference
mas	Massa
max	Maximaal
min	Minimaal
n	Natte-bol
o	Uitgaand
s	Oppervlak
sat	Verzadigde
tot	Totaal
w	Water

BEGRIPPENLIJST

Bron: (ISSO, 2014)

Begrip	Definitie/verklaring
Binnenmilieu	Het binnenmilieu omvat alle fysische, chemische en biologische factoren in een gebouw die van invloed zijn op gezondheid en welzijn van de gebruikers. De belangrijkste thema's die hier in worden onderscheiden zijn: lucht(kwaliteit), thermisch comfort, geluid en licht.
Binnenklimaat	Het complex van fysische factoren, veroorzaakt door het geheel van het gebouw zelf, de toegepaste bouwmaterialen, de voorzieningen in het gebouw en de daarin aangebrachte installaties.
Condensatie	De (fase)overgang van water in de dampvorm naar de vloeibare vorm. Wanneer vochtige lucht wordt afgekoeld zal deze lucht bij een bepaalde temperatuur het zogeheten dauwpunt - precies de maximaal mogelijke hoeveelheid damp bij die temperatuur bevatten - (verzadiging van de lucht). Bij verder afkoelen treedt condensatie op (zie ook vochtigheid van de lucht, absolute).
Conductie	Stroming van warmte binnen een materiaal als gevolg van temperatuurverschil.
Convectie	Stroming als gevolg van mechanische middelen of als gevolg van natuurlijke convectie (wind) of temperatuurverschil.
Dampspanning	De druk van de waterdamp in de lucht, uitgedrukt in Pascal. De waterdampdruk is direct afhankelijk van het waterdampgehalte van de lucht x . Bij benadering geldt: $p = 462 \cdot T \cdot c$ [Pa] Met: T = de absolute temperatuur in $^{\circ}\text{K}$ = de temperatuur in $^{\circ}\text{C} + 273$, c = de waterdampconcentratie in kg/m^3 .
Dauwpunttemperatuur	Temperatuur waarbij de in de lucht aanwezige waterdamp gaat condenseren.
Deellast	Bedrijfssituatie tussen vollast en nullast.
Duurzaamheid	Het voorzien in de eigen behoeften zonder de mogelijkheden van toekomstige generaties, om in hun behoeften te voorzien, in gevaar te brengen.
Koelbatterij	Element samengesteld uit watervoerende buizen en lamellen of vinnen waarmee warmte uit de langs de vinnen stromende lucht wordt onttrokken en overgedragen aan het door de buizen stromende water.

Latente koeling	Dat gedeelte van de totale koellast dat kan worden opgenomen door een luchtstroom met een lager vochtgehalte dan dat van de vertreklucht en die door deze vochtopname een verhoging van zijn absolute vochtigheid ondergaat tot aan die van de vertreklucht.
Luchtbehandeling	Proces waarbij de ventilatielucht één of meer van de volgende behandelingen ondergaat: verwarmen, koelen, bevochtigen, ontvochtigen, reinigen.
Luchtbehandelingskast	Onderdeel van de klimaatinstallatie waarin de ventilatielucht de luchtbehandeling ondergaat.
Luchtvochtigheid	Onderscheiden worden de absolute luchtvochtigheid (hoeveelheid waterdamp in de lucht, uitgedrukt in gram water per kg lucht) en de relatieve vochtigheid (de verhouding tussen de werkelijke waterdampconcentratie in de lucht en de bij dezelfde temperatuur behorende maximale dampconcentratie).
Massastroom	Het quotiënt van de massa water dat door een leiding stroomt en de doorstroomtijd van die massa.
Model	Verzameling van formules met als functie het uitrekenen van een van te voren opgezet doel.
Nullast	Staat voor de situatie dat de regelafluiser dicht staat.
Oppervlak	Aantal m ² warmteuitwisselend oppervlak.
Rendement	Verhouding tussen de nuttig geleverde koude en de daarvoor benodigde primaire energiehoeveelheid.
Stroming	Verplaatsing van een gasvormig of vloeibaar medium.
Stroming (laminair)	Verplaatsing van hoeveelheid lucht (stroming) waarbij de lucht zich verplaatst in ongestoorde lagen.
Stroming (turbulent)	Stroming met wervelingen.
Vermogen	De door een verwarmingslichaam afgegeven warmte per tijdseenheid.
Voelbare koeling	Dat gedeelte van de totale koellast dat kan worden opgenomen door een luchtstroom met een lagere temperatuur dan de vertrekluchttemperatuur en die door deze warmte-opname een temperatuurstijging ondergaat tot aan de vertrekluchttemperatuur.
Vollast	Bedrijfssituatie van een hydraulische schakeling waarop de ontwerpvermogens worden gerealiseerd.

Volumestroom	Het quotiënt van het volume lucht dat door het toestel stroomt en de doorstroomtijd van dat volume.
Warmtedoorgangscoefficiënt	De warmtedoorgang per constructiedeel per eenheid van oppervlakte.
Warmtegeleidingscoëfficiënt	De warmtegeleidingscoëfficiënt van een bepaalde stof is de warmtestroomdichtheid (W/m^2), die in een laag van 1 m ontstaat bij 1 K temperatuurverschil aan weerszijden van die laag, in eenheden uitgedrukt dus $W/(m \cdot K)$.
Warmtestroom	Het quotiënt van de warmte dat door een toestel stroomt en de doorstroomtijd van die warmte.
Warmteweerstand	De warmteweerstand van een constructie is letterlijk de weerstand van deze constructie tegen warmte(doorgang); deze weerstand is evenredig aan de dikte en omgekeerd evenredig aan de mate van warmtegeleiding (warmtegeleidingscoëfficiënt).
Warmtewisselaar	Zie koelbatterij.

1. INLEIDING

Om het milieu binnen gebouwen leefbaar te houden moet onder andere luchtbehandeling worden toegepast. Bij deze installaties, luchtbehandelingsinstallaties, wordt het steeds meer noodzaak om ze zo duurzaam mogelijk te maken. De installaties koelen, verwarmen en filteren buitenlucht om het klimaat binnen gebouwen optimaal te houden, en verbruiken hierbij erg veel energie. Dit kan verminderd worden door de installaties te verduurzamen. Binnen deze installaties is de koelbatterij een standaard onderdeel, deze koelt de lucht en kan deze ook ontvochtigen.

Bij het ontwerpen van installaties wordt alles op vollast berekend, dus ook de koelbatterij. Wanneer installaties duurzamer moeten worden is het ook van belang om de prestaties van de koelbatterij te weten in deellast. Dit omdat de installatie niet de volledige bedrijfstijd in vollast zal draaien. Sterker nog, deze draait het overgrote deel van de tijd in deellast. Om deze situatie voor een koelbatterij inzichtelijk te maken, op een praktisch toepasbare manier, is dit onderzoek ingesteld.

Er bestaan al modellen om koelbatterijen in deellast te berekenen. Deze modellen vragen echter te veel informatie van een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties of deze worden vanuit leveranciers aangeleverd. ISSO wil een onafhankelijk model dat hetzelfde bereikt als de reeds bestaande modellen en dat eenvoudig te gebruiken is door een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties.

“Op welke wijze is het mogelijk om een fysisch wiskundig model van het vermogen van een koelbatterij in deellast te maken met een gewenste marge van $\pm 5\%$, met als basis de gegevens van de leverancier(s), waarbij de formule bedoeld is voor een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties?”

Dit is de probleemstelling waar de bovenstaande opdrachtomschrijving toe leidt. Wanneer er wordt gekeken naar wat er gemaakt moet worden, dan komt daar de volgende doelstelling uit:

“Een praktisch toepasbaar model creëren waarmee het mogelijk is voor een ontwerpend ingenieur om het gedrag van een koelbatterij in deellast te voorspellen ten behoeve van duurzame installaties, waarvoor inzicht nodig is in het functioneren van het wetenschappelijke model van koelbatterijen.”

Bij de bovenstaande stellingen en met de achtergrond van het onderwerp komen dan nog een aantal vragen naar boven die in het onderzoek behandeld moeten worden.

- Wat zijn de wensen van een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties ten aanzien van het model?
- Welke geleidende materialen moeten worden meegenomen in het model voor koelbatterijen?
- Moeten deze materialen op te geven zijn door de ingenieur?
- Moeten er meerdere rijen van leidingen en vinnen meegenomen worden in het model?
- Hoe moet het model worden gevalideerd?

Dit alles vormt de grondslag voor het onderzoek. Verdere uitdieping van het onderzoek vindt plaats in hoofdstuk 2. Theoretisch kader. Dit hoofdstuk behandelt wat hier al is genoemd en gaat nog verder met het definiëren van de koelbatterij, de grenzen van het onderzoek en hoe het onderzoek plaats zal vinden.

2. THEORETISCH KADER

In dit hoofdstuk wordt de opdracht van het onderzoek omschreven en worden de grenzen van het project aangegeven. De opdracht in het kort samengevat luidt als volgt:

“Ontwikkel een statisch model voor een koelbatterij waarmee een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties op relatief eenvoudige praktisch toepasbare wijze vollast en deellast situaties kan berekenen.”

2.1 WARMTEWISSELAAR MODEL

In dit hoofdstuk zullen de verschillende soorten koelbatterijen worden besproken die in dit onderzoek zijn gebruikt. Dit hoofdstuk gaat dieper in op de werking van de warmtewisselaars en op de verschillende types ervan.

FIGUUR 1; KOELBATTERIJ (ISSO, 2016)



Koelbatterijen of warmtewisselaars, welke worden behandeld in dit onderzoek, koelen een medium met een ander medium waarbij de twee media niet met elkaar in contact komen. In dit geval wordt lucht afgekoeld door middel van water, dit wordt veel toegepast in een luchtbehandelingskast. In Figuur 1 is een koelbatterij te zien met een ingaande en uitgaande pijp voor het water aan de linker zijde. Aan de rechter zijde is een vlak te zien met vinnen waar de lucht langs stroomt. Tussen deze twee media wordt energie, in de vorm van warmte, overgedragen om de lucht af te koelen. Hierbij is het water kouder dan de lucht waardoor de lucht afkoelt. Dit is onder te verdelen in voelbare en latente koeling. De voelbare koeling is hierbij de verandering in temperatuur en de latente koeling de verandering in de temperatuur en de hoeveelheid vocht in de lucht. Dit bij elkaar opgeteld is de totale koeling. Er zijn daarom twee

warmtewisselaars, of koelbatterijen, te onderscheiden: de warmtewisselaar zonder condensatie en de warmtewisselaar met condensatie.

Wanneer een warmtewisselaar zonder condensatie werkt, blijft de oppervlaktetemperatuur van de leidingen en van de vinnen boven de dauwpunttemperatuur. Dit houdt in dat het vocht in de lucht niet condenseert op de leidingen en er dus geen latente koeling aanwezig is in het systeem.

Als de oppervlaktetemperatuur van de leidingen en de vinnen lager is dan de dauwpunttemperatuur dan zal het vocht in de lucht condenseren op de leidingen en vinnen. Dit houdt in dat de warmtewisselaar zowel voelbaar als latent koelt.

2.2 WENSEN VAN DE ONTWERPEND INGENIEUR

De wensen van een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties zijn sterk gerelateerd aan de werkzaamheden die de persoon uitvoert. Door de hoge werkdruk bij adviesbureaus is het vaak noodzaak om snel te kunnen werken, zo blijft er meer tijd over voor andere projecten. Hierbij wordt vaak nauwkeurigheid ingeleverd voor snelheid.

Voor het te creëren model kan dus gezegd worden dat de ingenieur alleen de specificaties waar hij direct toegang tot heeft, wil/kan gebruiken om de koelbatterij door te rekenen. Daarnaast moet het model dus ook binnen korte tijd de gewenste uitkomst geven en dit in een gemakkelijk te gebruiken omgeving.

2.3 PROBLEEMSTELLING

In dit hoofdstuk wordt de probleemstelling beschreven. Dit is op basis van de opdrachtomschrijving in hoofdstuk 2.1 Warmtewisselaar model.

Probleemstelling:

“Op welke wijze is het mogelijk om een fysisch wiskundig model van het vermogen van een koelbatterij in deellast te maken met een gewenste marge van $\pm 5\%$, met als basis de gegevens van de leverancier(s), waarbij de formule bedoeld is voor een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties?”

De probleemstelling leidt tot verschillende deelvragen die beantwoord moeten worden tijdens het onderzoek.

Deelvragen:

- Wat zijn de wensen van een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties ten aanzien van het model?
- Welke geleidende materialen moeten worden meegenomen in het model voor koelbatterijen?
- Moeten deze materialen op te geven zijn door de ingenieur?
- Moeten er meerdere rijen van leidingen en vinnen meegenomen worden in het model?
- Hoe moet het model worden gevalideerd?

Eisen:

- Er moet een enkel model gemaakt worden.
- Er is een gewenste marge van $\pm 5\%$ in vergelijking met de referentiemodellen.
- Er moet zowel latente als voelbare koeling berekend worden, dit moet het model zelf bepalen.
- Gegevens van de fabrikant, welke worden aangeleverd aan de ingenieur van luchtbehandelingsinstallaties, moeten worden gebruikt als input voor het model. Overige specificaties van een koelbatterij mogen niet gevraagd worden.

2.4 DOELSTELLING

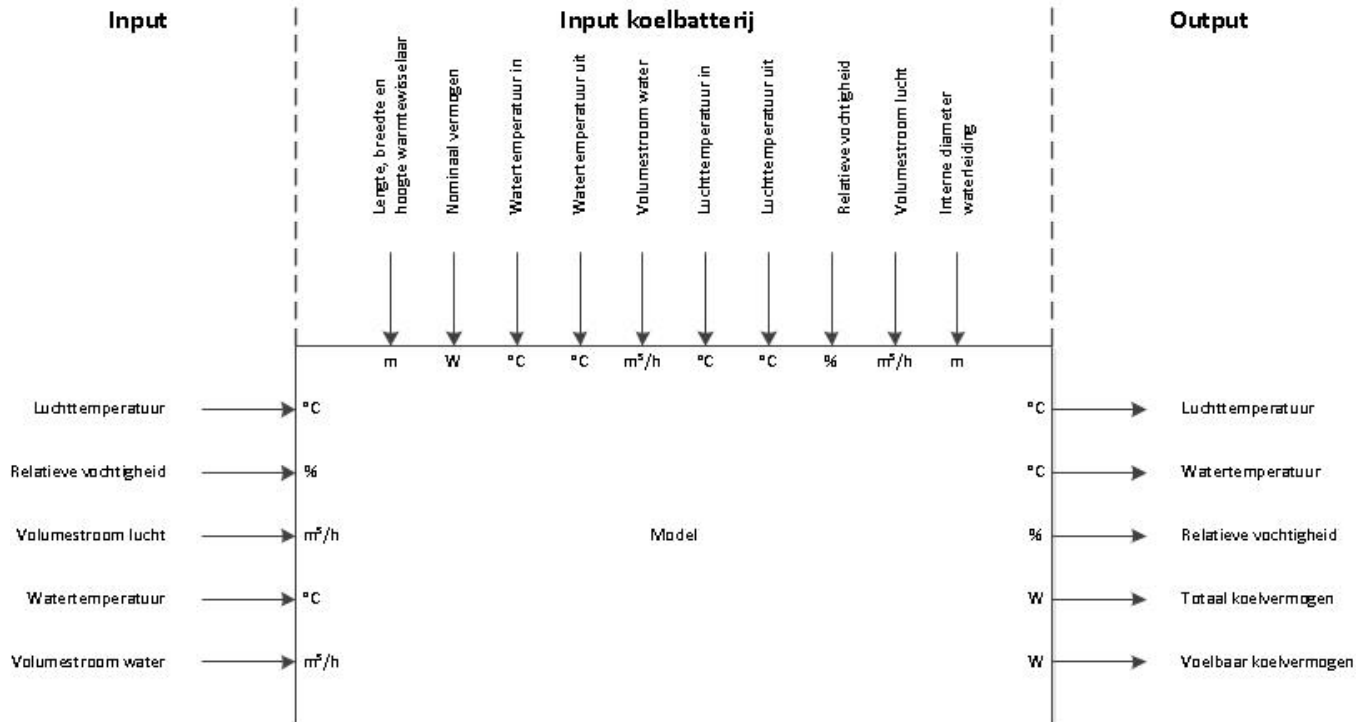
Het doel van dit project is om onderzoek te doen naar het vereenvoudigen van de bestaande modellen voor een koelbatterij. Bij dit onderzoek past de onderstaande doelstelling:

“Een praktisch toepasbaar model creëren waarmee het mogelijk is voor een ontwerpend ingenieur om het gedrag van een koelbatterij in deellast te voorspellen ten behoeve van duurzame installaties, waarvoor inzicht nodig is in het functioneren van het wetenschappelijke model van koelbatterijen.”

2.5 GRAFISCHE WEERGAVE MODEL

De eisen en wensen van het model worden in Figuur 2 schematisch weergegeven. Hierin is een complete weergave gegeven van hoe het model uiteindelijk moet werken. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de 'input' zijde, waar de deellastsituatie moet worden ingevuld, de 'input koelbatterij' zijde, waar de fabriekseigenschappen van de koelbatterij moeten worden ingevuld, en de 'output' zijde, waar de uitkomsten worden weergegeven.

FIGUUR 2; GRAFISCHE WEERGAVE MODEL



Waarin: θ = Temperatuur [°C]
 x = Relatieve vochtigheid [%]
 q = Volumestroom [m³/h]
 ϕ = Vermogen [W]

Er moeten een aantal gegevens van de fabrikant bij 'Input koelbatterij' worden ingevoerd. Hiermee wordt bepaald wat voor koelbatterij het is, inclusief de dimensies en eigenschappen. Met deze eigenschappen en een nieuwe 'input' kan vervolgens bepaald worden wat er gebeurt wanneer de input variabelen worden gevarieerd, wat wordt weergegeven aan de 'output' kant. Dit wil zeggen dat wanneer het systeem is gedimensioneerd door de 'Input koelbatterij' en er waarden worden ingevoerd bij 'Input' het model dan moet uitrekenen hoe de koelbatterij reageert, weergegeven bij 'output'. De gegevens aan de 'output' kant moeten worden gevalideerd, pas hierna kan geconcludeerd worden dat deze voldoen aan de opdracht. De validatie wordt gedaan met behulp van leveranciersgegevens en modellen en daarnaast ook met behulp van eerder uitgevoerde onderzoeken.

De gebruikte modellen om te valideren zijn:

- Coils for Windows (Luvata Söderköping AB, 2010).
- AlfaSelect AIR (Alfa Laval, 2013).
- GPC.EU 2015 (Güntner, 2015).

2.6 GRENZEN & RANDVOORWAARDEN

Om het project binnen de perken te houden zijn er een aantal projectgrenzen opgesteld. Dit om verwarring over de verwachtingen van het eindresultaat te voorkomen.

- Er wordt alleen gekeken naar de koelbatterij, overige, eventueel aangekoppelde apparaten, worden buiten beschouwing gelaten.
- Er worden geen extra variabelen toegevoegd buiten degenen aangegeven in de opdracht. Een uitzondering hierop is wanneer deze nodig blijkt te zijn vanuit het zelf uitgevoerde onderzoek.
- Er wordt alleen met het koelmiddel 'water' gewerkt, overige koelmiddelen worden buiten beschouwing gelaten.
- Er wordt ontworpen voor een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties, met andere niveaus en/of beroepen wordt geen rekening gehouden.
- Er wordt gewerkt met gegevens (productspecificaties) die worden aangeleverd door leveranciers van koelbatterijen.
- Er worden tussentijdse rapporten geleverd, deze worden in het eindrapport geplaatst en vormen geen apart document.
- Er wordt alleen gekeken naar de thermische balans van de koelbatterij.

2.7 ONDERZOEKSMETHODE

Om het onderzoek op gang te krijgen is het vereist om eerst inzicht te krijgen in de verschillende modellen en de soorten modellen die al bestaan. Daarnaast moet er studiemateriaal geraadpleegd worden ten behoeve van het literatuuronderzoek, om de basis van het model te kunnen maken.

Als eerste zal er gekeken worden naar de basismodellen/formules van een warmtewisselaar of koelbatterij. Dit zal inzicht geven in hoe het model er uiteindelijk uit zal moeten komen te zien. Als tweede zullen er meer ingewikkelde modellen gezocht moeten worden en als laatste moeten de validatiemodellen, aangeleverd door de opdrachtgever, bestudeerd worden. Er moet gekeken worden of de modellen zo te gebruiken zijn, gecombineerd of verbeterd kunnen worden.

3. INVLOEDSFACTOREN

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de belangrijke aspecten van de koelbatterij. Een koelbatterij heeft verschillende onderdelen die invloed hebben op het onderzoek, daarnaast spelen in/om die verschillende onderdelen allerlei verschillende processen. Deze bijzonderheden worden in dit hoofdstuk toegelicht.

3.1 MATERIALEN VAN DE KOELBATTERIJ

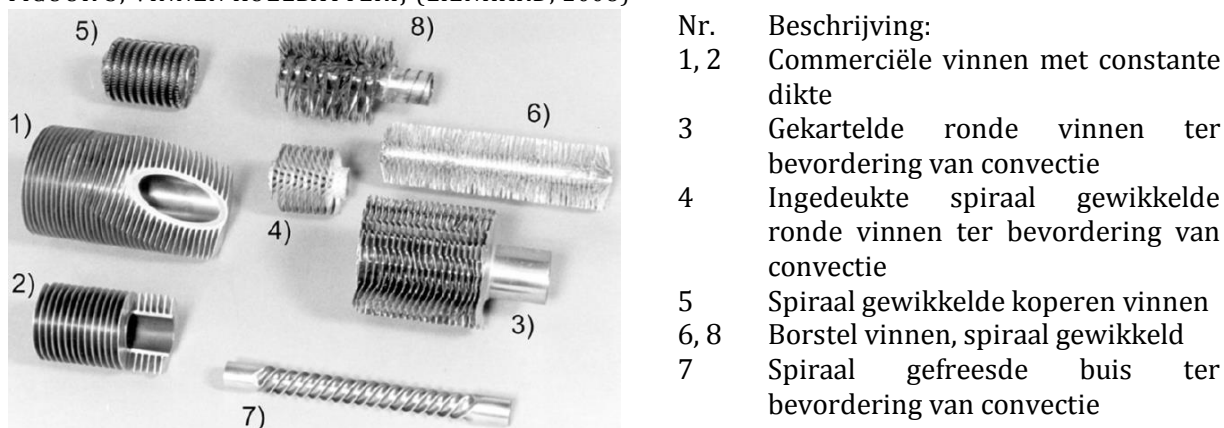
De meeste koelbatterijen worden uitgevoerd met koperen buizen en aluminium vinnen (Brink, 2012). Wanneer er ook sprake is van koperen vinnen dan stijgt de warmteoverdrachtscoëfficiënt met ongeveer 10%. Aangezien niet altijd het materiaal bij de fabrieksspecificaties vermeld wordt, zal worden uitgegaan van aluminium vinnen. Wanneer er met koper gewerkt wordt dan kan hier eventueel rekening mee gehouden worden door de eerder genoemde factor toe te passen.

De invloed van warmteoverdracht in het metaal is verwaarloosbaar klein in vergelijking met de convectie warmteoverdracht (Morisot, Marchio, & Stabat, 2002). Het verschil van 10% maakt in het model weinig uit wanneer er vanuit deze hoek naar gekeken wordt.

3.2 DIMENSIONERING VAN DE KOELBATTERIJ

Naast dat een koelbatterij een bepaalde grootte heeft (Lengte, breedte en hoogte), bestaat een koelbatterij ook uit een aantal rijen en een aantal vinnen. Voor een voorbeeld van een leiding met vinnen zie Figuur 3. Dit wordt in de meeste modellen meegenomen en dit moet bij de theoretische modellen worden ingevoerd, in tegenstelling tot de empirische modellen (Voor modeltypen zie hoofdstuk 3.10 Modelvalidatie). Het aantal rijen van een warmtewisselaar bepaalt de weerstand en ook de efficiëntie van de koelbatterij. Wanneer er meer rijen in een warmtewisselaar zitten wordt deze langer. Een langere warmtewisselaar zorgt ervoor dat er meer lucht in contact komt met de koelbatterij. Ook zorgt dit ervoor dat er meer vermogen van de ventilator nodig is om de lucht door de koelbatterij heen te krijgen in verband met de weerstand die dit opwekt. Hetzelfde effect kan bereikt worden door de vinnen van de koelbatterij dichter bij elkaar te plaatsen.

FIGUUR 3; VINNEN KOELBATTERIJ (LIENHARD, 2008)

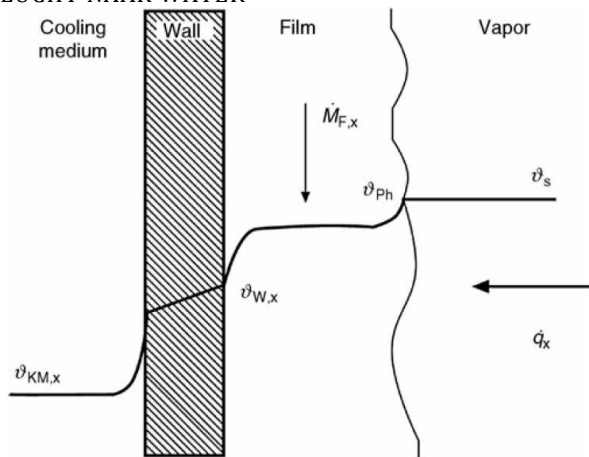


Uit het model moeten de dimensies van de koelbatterij volgen, dit in de vorm van een warmte-uitwisselend oppervlak. Met dit gegeven kan vervolgens de deellastsituatie van de koelbatterij worden bepaald. Het warmte-uitwisselend oppervlak is hierbij het oppervlak van de leidingen en de vinnen.

3.3 TEMPERATUREN BINNEN DE KOELBATTERIJ

Binnen een koelbatterij koelt de lucht af en warmt het water op. De temperaturen in dit proces verlopen niet allemaal lineair, zie Figuur 4. Om dit beter in beeld te brengen wordt veelal bij tegenstroomwarmtewisselaars gebruik gemaakt van de 'log mean temperature difference' (LMTD) methode (Morisot, Marchio, & Stabat, 2002). Een normaal temperatuurverschil is vaak niet voldoende nauwkeurig om een model door te rekenen. De LMTD methode maakt gebruik van het temperatuurverschil tussen de bulk van de lucht en de bulk van het water. Dit is dus niet het temperatuurverschil over de hele warmtewisselaar maar slechts over een bepaald oppervlak van de warmtewisselaar.

FIGUUR 4; TEMPERATUURVERLOOP VOCHTIGE LUCHT NAAR WATER



3.4 WARMTEWEERSTAND

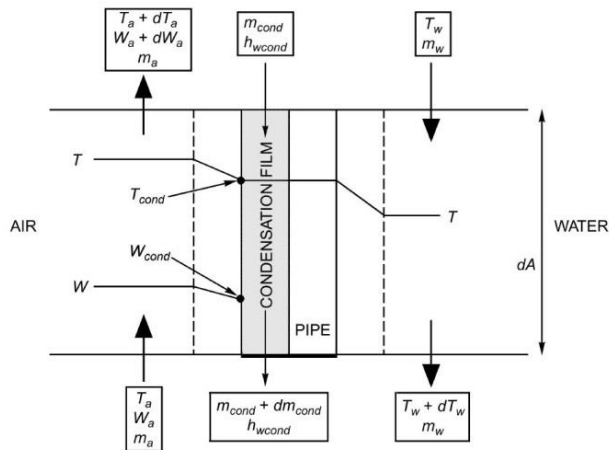
De volgende belangrijke factor is de warmteweerstand, de eigenschap van een materiaal om warmtestroom te remmen. Elke stof in de koelbatterij heeft in meer of mindere mate een warmteweerstand. Dit heeft niet alleen invloed op het rendement maar ook op het algemeen functioneren van de koelbatterij. Binnen de koelbatterij zijn het materiaal en de condensatiefilm, de waterlaag op de leidingen en vinnen, de belangrijkste delen met een warmteweerstand.

3.5 WARMTEOVERDRACHT

Met de lucht die langs de leidingen en vinnen loopt gebeurt een aantal dingen. Het materiaal waarvan de leidingen en vinnen gemaakt zijn, neemt warmte uit de lucht op. Daarnaast, als de leidingen koud genoeg zijn, condenseert er ook vocht uit de lucht op de vinnen en leidingen. De vinnen en leidingen worden in dit proces warmer, waarbij de vinnen de warmte weer overdragen aan de leidingen. Het water is kouder dan de leidingen en de lucht, waardoor deze de warmte opneemt en uit de koelbatterij haalt.

Door middel van convectie wordt er warmte overgedragen van lucht naar de leidingen en vinnen en vervolgens van de leidingen naar het water. De overdracht tussen de vinnen en de leidingen is conductie. Conductie speelt een erg kleine rol in het hele warmteoverdrachtsproces door de hoge geleiding van de gebruikte materialen.

FIGUUR 5; WARMTEOVERDRACHT, BRON: (WANG, CAI, SOH, LI, & XIE, 2002)



Het in dit hoofdstuk omschreven proces wordt afgebeeld in Figuur 5. Links is de luchtzijde binnen de warmtewisselaar. Dit gaat over in een condensatiefilm, die niet perse overall aanwezig is, en vervolgens in de wand van de pijp. Rechts hiervan is het koude water dat de lucht afkoelt.

3.6 RENDEMENTEN

Een andere factor die een grote rol speelt binnen de koelbatterij is het rendement. Er zijn verschillende rendementen te onderscheiden in een enkel apparaat. Als eerste is er het algemene rendement van de koelbatterij. Dit heeft betrekking op:

- Het ongewenste koudeverlies naar de omgeving.
- De niet optimale overdracht van warmte tussen de twee media.
- De tijd waar de warmteoverdracht in plaatsvindt.
- De snelheden waarmee de lucht en het water door de koelbatterij heen stromen.
- Of er sprake is van droge koeling, natte koeling of gedeeltelijk natte koeling.

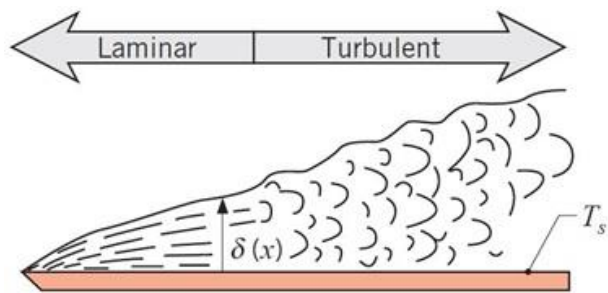
Een tweede rendement is het vin rendement. Dit heeft alleen betrekking op de efficiëntie van de vinnen. Wanneer deze dezelfde temperatuur zouden hebben als het koude water is er sprake van een vin rendement van 100%. Aangezien dit in de praktijk nooit het geval is, is het vin rendement nooit 100%. Het vin rendement is al verwerkt in het bovengenoemde algemene rendement.

3.7 STROMING

Wanneer er met vloeistoffen en gassen wordt gewerkt die met een bepaalde snelheid door een beperkte ruimte stromen, dan kan de stroming variëren. Er kan sprake zijn van laminaire en turbulente stroming, afhankelijk van de snelheid waarmee de vloeistof of het gas stroomt door de ruimte. Is er sprake van een lage stroomsnelheid dan zal de stroming laminair, zonder haakse stromingen, zijn. Wanneer er hogere stroomsnelheden zijn dan is er waarschijnlijk sprake van turbulente stroming, de stof stroomt niet puur in één richting maar ook haaks op zichzelf (Zie Figuur 6).

De stroming wordt niet meegenomen in het model. Dit wordt meegenomen in theoretische modellen maar is te ingewikkeld om te gebruiken in een empirisch model.

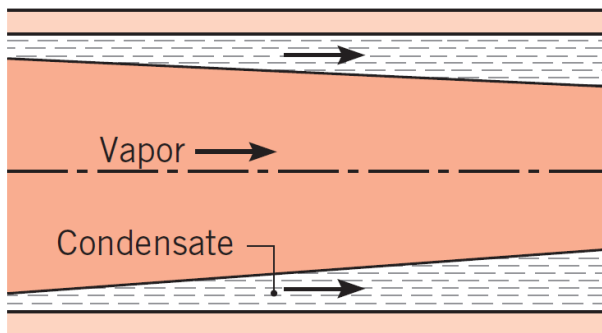
FIGUUR 6; TURBULENTE EN LAMINAIRE STROMING (INCROPERA & DEWITT, 2011)



3.8 CONDENSATIE

Zoals al eerder genoemd speelt de 'natheid' van de koelbatterij ook een belangrijke rol. Wanneer er vocht door invloed van temperatuur en stroming uit de lucht condenseert op de vinnen en de leidingen van de koelbatterij dan beïnvloedt dit het rendement, de warmteweerstand, de warmteoverdracht en de convectie. Het condenseren van vocht uit de lucht is vaak een gewenst effect binnen koelbatterijen.

FIGUUR 7; CONDENSATIE IN LEIDING (INCROPERA & DEWITT, 2011)



Wanneer er een bepaalde temperatuur op het oppervlak van de koelbatterij wordt bereikt, de dauwpunttemperatuur, dan zal het vocht in de lucht op het koude oppervlak condenseren. Wanneer er condens op het oppervlak van de vinnen zit dan komt er nog een tweede mechanisme in actie en dat is diffusie, het vocht in de lucht wordt aangetrokken door de waterfilm op de vinnen. Naarmate er verder in de koelbatterij wordt gekeken zal er meer vocht ophopen op de vinnen, te zien in Figuur 7.

3.9 LUCHTVOCHTIGHEID

Niet alleen de eigenschappen van de koelbatterij hebben een grote invloed op het functioneren ervan, ook die van het water en van de lucht kunnen hier een grote invloed op hebben. Dit is al eerder aangetipt bij hoofdstuk 3.7 Stroming. De luchtvochtigheid, eerder genoemd in verschillende hoofdstukken, heeft een grote invloed op het rendement van het systeem. Koeling door middel van condensatie is veel effectiever dan droge koeling.

3.10 MODELVALIDATIE

Men onderscheidt twee typen modellen: theoretische- en empirische modellen. De empirische modellen zijn de meer eenvoudige van de twee. Deze modellen zijn vaak een benadering van de theoretische modellen. De theoretische modellen zijn erg accurate modellen, maar zijn in rekentijd wel erg traag en hebben veel variabelen nodig in vergelijking met de empirische modellen. De empirische modellen zijn ook benaderingen van de werkelijkheid, maar wel zeer nauwkeurig. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de empirische modellen, waarbij de theoretische modellen als referentie en eventueel als validatie dienen (Wang, Cai, Soh, Li, & Xie, 2002).

Het model dat gecreëerd moet worden in dit onderzoek, in verband met het aantal bekende variabelen, is een empirisch model. Dit model kan vervolgens gevalideerd worden met een beproefd empirisch en/of theoretisch model.

4. BESTAANDE MODELLEN

Het fysisch wiskundig model dat gemaakt moet worden, wordt gebaseerd op een aantal onderzoeken, waaronder publicaties over bepaalde formules en/of modellen. In dit hoofdstuk worden deze modellen en formules behandeld. De modellen zijn een opstap naar het uiteindelijke model.

Als eerste wordt er gekeken naar de standaard warmteberekeningen. Deze berekeningen vormen de grondslag voor vrijwel alle volgende modellen.

Als tweede wordt er gekeken naar de NTU methode. Deze methode kijkt naar de effectiviteit van de koelbatterij met behulp van de soortelijke warmtestroom, de warmtestroom, de effectiviteit en de temperaturen.

Als derde wordt er gekeken naar de LMTD methode. Deze methode berekent het temperatuurverschil over de koelbatterij. Dit is een meer geavanceerde methode dan de standaard gebruikte manier om het temperatuurverschil te berekenen.

Als vierde wordt de methode van 'een ingenieursmodel voor warmtewisselaars' bekeken. Dit model is specifiek gemaakt voor ingenieurs. In dit model wordt erg specifiek gekeken naar de warmteweerstand van de lucht in de koelbatterij.

Als vijfde wordt er gekeken naar 'versimpeld model voor het functioneren van gekoeld water koelbatterijen'. Dit model gaat niet in op de warmteweerstand maar focust meer op de oppervlakte en de warmtedoorgangscoefficiënt.

Als zesde wordt de bypass factor behandeld. Dit model kijkt naar de hoeveelheid lucht die door een koelbatterij stroomt zonder van temperatuur te veranderen door invloed van de koelbatterij. Er wordt aangenomen dat deze lucht mengt met de gekoelde lucht aan de achterzijde van de koelbatterij.

Als zevende wordt 'een verbeterd ingenieursmodel voor warmtewisselaars' behandeld. Er wordt hier gekeken naar de binnen- en buitenzijde van de warmtewisselaar, hiermee wordt de binnenkant van de leiding en de buitenkant van de leiding en vinnen bedoeld. Daarnaast gaat het model dieper in op de warmteweerstand van lucht. Ook wordt er in dit model nadrukkelijk verschil gemaakt tussen latente en voelbare koeling.

Als achtste model komt het 'ACSS' model aan bod. Dit model is erg eenvoudig en legt de focus op het droge en natte gedeelte van de koelbatterij. Dit model is gebaseerd op de LMTD en de LMHD methode.

Hierna volgen nog drie formules ter ondersteuning van de modellen: Het 'temperatuur rendement' van het TU-dictaat, deze formule biedt hulp bij het berekenen van 'output' condities van water en lucht; de formule om de luchtvochtigheid in lucht te berekenen aan de hand van relatieve vochtigheid en de temperatuur van de lucht; als laatste nog de formule van Merkel, deze formule houdt rekening met latente overdracht van warmte naar de filmlaag, condensatie van vocht in de lucht naar het oppervlak in de koelbatterij en met diffusie van vocht in de lucht naar de reeds bestaande filmlaag.

In hoofdstuk 5. Modellen staat een overzicht met de modellen waarin de samenhang/overlap wordt afgebeeld.

4.1 GRONDSLAG FORMULES

Voor vrijwel alle modellen in dit onderzoek geldt dat deze gebaseerd zijn op, of een uitbreiding zijn van een set basisformules. Deze grondslag zal in dit hoofdstuk worden behandeld en worden uitgelegd.

Er zijn twee manieren om het vermogen van een koelbatterij te berekenen. Beide zijn hieronder weergegeven:

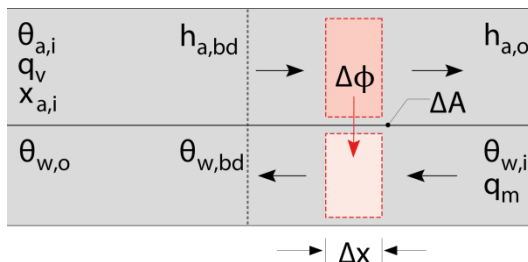
$$\Phi = q_m \cdot c_p \cdot \Delta\theta \quad [1.1]$$

$$\Phi = U \cdot A \cdot \Delta\theta_{lmd} \quad [1.2]$$

Waarin:	Φ	= Warmtestroom	[W]
	q_m	= Massastroom	[kg/s]
	c_p	= Soortelijke warmte	[kJ/kg·K]
	θ	= Temperatuur	[K]
	U	= Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m ² K]
	A	= Oppervlakte	[m ²]

De eerste van de twee formules kijkt naar de stromen binnen de warmtewisselaar. De tweede formule kijkt naar de warmteoverdracht over het systeem, waar rekening gehouden wordt met de stromen. Zie Figuur 8 voor een illustratie van formules [1.1] en [1.2]. In hoofdstuk 4.3 LMTD (LMHD) methode wordt hier verder op ingegaan.

FIGUUR 8; WARMTEOVERDRACHT BINNEN EEN KOELBATTERIJ (INCROPERA & DEWITT, 2011)



In de afbeelding staat weergegeven dat per oppervlakte van de warmtewisselaar een bepaalde hoeveelheid warmte wordt overgedragen van de warme naar de koude zijde, afhankelijk van de temperatuur.

4.2 NTU METHODE

Bron: (Incropera & Dewitt, 2011)

Een veelgebruikt model is de NTU methode, vanwege zijn eenvoud in gebruik. Deze zal daarom als eerste model worden toegelicht. NTU staat voor 'number of transfer units' en wordt gebruikt om de warmtestroom binnen een warmtewisselaar te bepalen.

Als eerste wordt hiervoor gekeken naar de effectiviteit van de warmtewisselaar, ook wel het rendement van de warmtewisselaar. Deze wordt berekend aan de hand van de volgende formules: [1.3], [1.4] en [1.5].

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{max}} \quad [1.3]$$

$$\phi_{max} = C_{min}(\theta_{a,i} - \theta_{w,i}) \quad [1.4]$$

$$\phi = C_a(\theta_{a,i} - \theta_{a,o}) = C_w(\theta_{w,o} - \theta_{w,i}) \quad [1.5]$$

Waarin:	ϕ	= Warmtestroom	[W]
	ε	= Effectiviteit	[-]
	C	= Soortelijke warmtestroom	[kJ/Ks]
	θ	= Temperatuur	[K]

De effectiviteit kan ook omschreven worden als volgt:

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \quad [1.6]$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad [1.7]$$

Waarin:	U	= Warmtedoorgangscoefficiënt	[W/m ² K]
	NTU	= Number of Transfer Units	[-]
	A	= Oppervlakte	[m ²]

Dit kan vervolgens geïnterpreteerd worden voor de warmtewisselaar die in dit onderzoek gebruikt wordt, de tegenstroom warmtewisselaar. Deze ziet er als volgt uit:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{(-NTU(1-C_r))}}{1 - C_r \cdot e^{(-NTU(1-C_r))}} \text{ bij } C_r < 1 \quad [1.8]$$

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \text{ bij } C_r = 1 \quad [1.9]$$

C_r wordt hierbij uitgerekend door C_{min} te delen door C_{max} .

In dit model wordt geen rekening gehouden met de stroming van lucht en water, met luchtvochtigheid en condensatie en met specifieke rendementen van de koelbatterij.

4.3 LMTD (LMHD) METHODE

Bron: (Incropera & Dewitt, 2011; Springer, 2010)

Naast de NTU methode wordt voor warmtewisselaars waar de ingaande en uitgaande temperaturen van bekend zijn de LMTD (Log Mean Temperature Difference) methode gebruikt. Deze methode bepaalt net als de NTU methode de hoeveelheid warmte die wordt overgedragen tussen de media. Deze methode is ook te gebruiken met enthalpie, dit wordt in hoofdstuk 4.12 Formule van Merkel weergegeven. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat voor de droge kant van de warmtewisselaar, waar de LTMD methode voor gebruikt wordt, deze over de hele droge kant gebruikt kan worden. Dit is niet mogelijk voor de natte kant. Voor de natte kant is dit alleen mogelijk voor een klein oppervlak. Dit omdat er een lineair verband wordt aangenomen tussen de verzadigde enthalpie van de lucht en de temperatuur van het oppervlak, wat in werkelijkheid niet zo is. Deze formule is tot stand gekomen door het afleiden van de formule van Merkel, zie 4.12 Formule van Merkel.

Om de warmtestroom te berekenen wordt de volgende formule gebruikt:

$$\phi = U \cdot A \cdot \Delta\theta_{lmtd} \quad [2.0]$$

$$\Delta\theta_{lmtd} = \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\ln\left(\frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_1}\right)} = \frac{\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2}{\ln\left(\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2}\right)} \quad [2.1]$$

$$\Delta\theta_1 = \theta_{h,1} - \theta_{c,1} = \theta_{a,i} - \theta_{w,o} \quad [2.2]$$

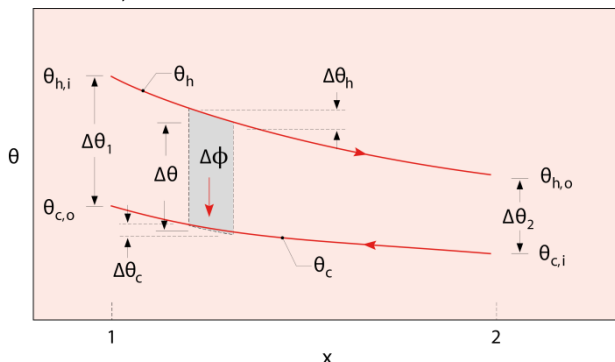
$$\Delta\theta_2 = \theta_{h,2} - \theta_{c,2} = \theta_{a,o} - \theta_{w,i} \quad [2.3]$$

Waarin:	ϕ	= Warmtestroom	[W]
	U	= Warmtedoorgangscoefficiënt	[W/m ² K]
	θ	= Temperatuur	[K]
	A	= Oppervlakte	[m ²]

De temperaturen in deze formule kunnen vervangen worden door enthalpie, alleen moet hier rekening gehouden worden met het eerder genoemde probleem over welk oppervlak te gebruiken is. Meer hierover in het hoofdstuk 4.12 Formule van Merkel.

Zowel de NTU methode als de LMTD methode kunnen voor alleen temperatuur of voor enthalpie berekeningen worden gebruikt, dus met alleen temperatuur of met temperatuur en luchtvochtigheid (Morisot, Marchio, & Stabat, 2002). Voor een voorbeeld van het temperatuurverloop binnen een tegenstroomwarmtewisselaar zie Figuur 9.

FIGUUR 9; TEMPERATUURVERLOOP TEGENSTROOMWARMTEWISSELAAR (INCROPERA & DEWITT, 2011)



De afbeelding geeft weer dat bij een bepaald temperatuurverschil een bepaalde hoeveelheid warmte van de koude naar de warme kant van de warmtewisselaar stroomt.

Deze methode heeft op het moment twee onbekenden, waarvan 1 onbekende nog berekend kan worden. Het gaat hier om het oppervlak en om de warmtedoorgangscoefficiënt. Het oppervlak is nodig om het systeem uiteindelijk te definiëren en zo de deellastsituatie te berekenen. De warmtedoorgangscoefficiënt kan berekend worden, en de uitkomsten moeten tussen de 25-50 W/m²K uitkomen (Incropera & Dewitt, 2011). Het berekenen kan als volgt worden gedaan:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_a} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_w}} \quad [2.4]$$

Waarin:	h	= Warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m ² K]
	d	= Dikte	[m]
	λ	= Warmtegeleidingscoëfficiënt	[m ²]

Het materiaal en de dikte hiervan is hierbij niet van groot belang. De eigenschappen van de vloeistof en van het gas daarentegen wel, deze beïnvloeden de warmteoverdrachtscoëfficiënt heel sterk.

4.4 EEN INGENIEURS MODEL VOOR WARMTEWISSELAARS

Bron: (Wang, Cai, Soh, Li, & Xie, 2002)

Het volgende model is specifiek voor koelbatterijen ontworpen, met in gedachten de ontwerpend ingenieur. Dit sluit goed aan bij het huidig lopende onderzoek. Ten grondslag aan het model ligt, dat wanneer een koelbatterij gebruikt wordt om te koelen deze de prestaties van een luchtbehandelingskast sterk beïnvloedt. Het koelen en ontvochtigen van lucht gebruikt veel energie in vergelijking met de andere onderdelen van een luchtbehandelingskast.

De warmte en/of koude gegenereerd door de koelbatterij wordt weergegeven in de volgende formule:

$$\phi = \frac{\theta_{a,i} - \theta_{w,i}}{R_h} \quad [2.5]$$

$$R_h = R_1 + R_3 \quad [2.6]$$

Waarin:	ϕ	= Warmtestroom	[W]
	R_h	= Warmteweerstand	[W/K]
	R_1	= Warmteweerstand water	[W/K]
	R_3	= Warmteweerstand lucht	[W/K]
	θ	= Temperatuur	[K]

Hierbij wordt de warmteweerstand van de metalen wand weggelaten omdat het metaal een zeer goede geleider is en dus een kleine rol speelt in het geheel.

Een analyse van de vloeistof en het gas leidt dan vervolgens tot de volgende formule:

$$\frac{h \cdot D}{\lambda} = C \left(\frac{D \cdot \rho \cdot v}{\eta} \right)^e \left(\frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \right)^f \quad [2.7]$$

$$h = C \left(\frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \eta \cdot D} \right)^e \left(\frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \right)^f \frac{\lambda}{D} = b \cdot q_m \quad [2.8]$$

$$b = \frac{C \cdot 4^e \cdot c_p^f \cdot \lambda^{1-f} \cdot \eta^{f-e}}{\pi^e \cdot D^{1+e}} \quad [2.9]$$

Waarin:	D	= Inwendige diameter	[m]
	λ	= Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m·K]
	C	= Constante	[-]
	c_p	= Soortelijke warmte	[kJ/kg·K]
	η	= Dynamische viscositeit	[Ns/m ²]
	f	= Constante	[-]
	e	= Constante	[-]

Met deze gegevens kan dan vervolgens bepaald worden dat:

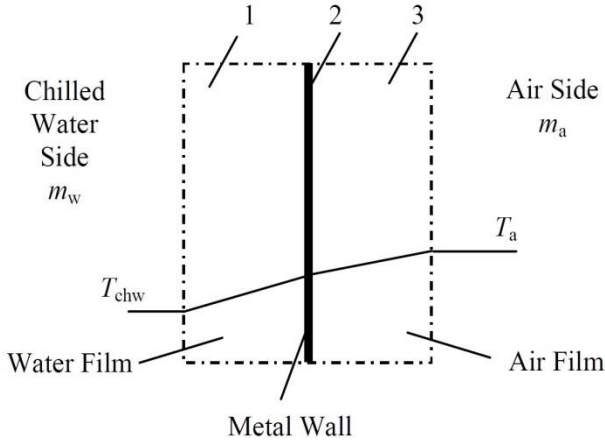
$$R_h = \frac{1}{h_{w,i} \cdot A_w} + \frac{1}{h_{a,i} \cdot A_a} = \frac{c_w \cdot q_{m,w}^e + c_a \cdot q_{m,a}^e}{c_w \cdot q_{m,w}^e \cdot c_a \cdot q_{m,a}^e} \quad [3.0]$$

Formule [3.0] gecombineerd met formule [2.5] levert dan [3.1].

$$\phi = \frac{b_a \cdot A_a \cdot q_{m,a}^e}{1 + \left(\frac{b_a \cdot A_a}{b_w \cdot A_w} \right) \cdot \left(\frac{q_{m,a}}{q_{m,w}} \right)^e} (\theta_a - \theta_w) \quad [3.1]$$

Waarin:	A	= Oppervlakte	[m ²]
	θ	= Temperatuur	[°C]
	b	= Variabele	[-]
	q_m	= Massastroom	[kg/s]
	ϕ	= Warmtestroom	[W]
	e	= Constante	[-]

FIGUUR 10; REPRESENTATIE MODEL (WANG, CAI, SOH, LI, & XIE, 2002)



Wanneer dit model terug wordt geleid naar de kern dan kan de conclusie getrokken worden dat dit in de basis dezelfde formule is als [2.0]. Het verschil is dat bij dit model de U-waarde volledig uitgeschreven is, dit is voor meer ingewikkelde berekeningen van belang om de nauwkeurigheid te bewaken. Voor een representatie van het model zie Figuur 10.

Dit model berekent specifiek de warmtegeleiding van de koelbatterij, met onderscheid tussen de natte en de droge kant. Er wordt echter geen rekening gehouden met rendementen of met stromingen binnen de

koelbatterij, dit zou wel in een factor verrekend kunnen zitten.

4.5 VERSIMPELD MODEL VOOR HET FUNCTIONEREN VAN GEKOELD WATER KOELBATTERIJEN

Bron: (Morisot, Marchio, & Stabat, 2002)

Dit model heeft hetzelfde doel als het vorige model, namelijk om met zo min mogelijk variabelen een koelbatterij in deellast te kunnen berekenen. Het onderscheid zich door een andere aanpak te gebruiken om tot hetzelfde resultaat te komen.

De totale overdracht van warmte binnen een koelbatterij kan worden weergegeven door middel van de convectie coëfficiënt tussen de lucht en het warmteuitwisselend oppervlak en de massastroom coëfficiënt aan de luchtzijde:

$$\phi = h_{ext} \cdot A \cdot (\theta_a - \theta_{cond}) + h_{mas} \cdot A \cdot [w_a \cdot (H_{fg} + c_{pv} \cdot \theta_a) - w_{cond} \cdot (H_{fg} + c_{pv} \cdot \theta_{cond})] \quad [3.2]$$

$$\phi = \frac{U_{ext} \cdot A}{c_{pa}} \cdot (h_a - h_{condSat}) \quad [3.3]$$

Waarin:	ϕ	= Warmtestroom	[W]
	c_p	= Soortelijke warmte	[J/kg·K]
	h	= Warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m ² K]
	h_a/h_{conSat}	= Enthalpie	[J/kg]
	h_{mas}	= Massastroomcoëfficiënt	[kg/m ² s]
	U	= Warmtedoorgangcoëfficiënt	[W/m ² K]
	θ	= Temperatuur	[K]
	A	= Oppervlakte	[m ²]
	w	= Luchtvochtigheid verhouding	[kg/kg]

Wanneer hetzelfde wordt bekeken voor de waterkant dan ziet deze formule er als volgt uit:

$$\phi = h_{int} \cdot A \cdot (\theta_{cond} - \theta_w) \quad [3.4]$$

$$\phi = \frac{U_{int} \cdot A}{c_{psat}} \cdot (h_{condSat} - h_{wsat}) \quad [3.5]$$

Wanneer de waterzijde en de luchtzijde worden samengenomen en in een enkele formule worden herschreven dan ziet deze er als volgt uit:

$$\phi = U_h \cdot A \cdot (h_a - h_{wsat}) \quad [3.6]$$

Met:

$$\frac{1}{U_d A} = \frac{c_{pa}}{U_{ext} \cdot A_{ext}} + \frac{c_{psat}}{U_{int} \cdot A_{int}} \quad [3.7]$$

Net als het vorige model geeft dit model de mogelijkheid om de U-waarde nauwkeurig te berekenen. Wel berekenen beide methoden de U-waarde op een andere manier.

4.6 BYPASS/CONTACT FACTOR

Bron: (Ibe & Anyanwu, 2013)

De efficiëntie van de koelbatterij, zoals omschreven bij de NTU methode, kan ook anders omschreven worden. De bypass factor of de contact factor kunnen gebruikt worden om de efficiëntie van een koelbatterij te omschrijven. Deze methode omschrijft hoeveel lucht er door de koelbatterij gaat zonder beïnvloed te worden door de koelbatterij. Dit laat zien hoe effectief de koelbatterij is.

Als eerste de contact factor:

$$\beta = \frac{(X_a - X_b)}{(X_a - X_c)} = \frac{(h_a - h_b)}{(h_a - h_c)} \approx \frac{(\theta_a - \theta_b)}{(\theta_a - \theta_c)} \quad [3.8]$$

Waarin:	β	= Contact factor	[-]
	X	= Specifieke luchtvochtigheid	[kg/kg]
	h	= Enthalpie	[kJ/kg]
	θ	= Temperatuur	[K]
	a	= Ingaand	[-]
	b	= uitgaand	[-]
	c	= Dauwpunt	[-]

Met de contact factor kan de bypass factor worden bepaald, daarnaast kan deze ook op zichzelf berekend kan worden.

$$BPF = 1 - \beta \quad [3.9]$$

$$BPF = \frac{(h_b - h_c)}{(h_a - h_c)} = \frac{(\theta_b - \theta_c)}{(\theta_a - \theta_c)} = \frac{(X_b - X_c)}{(X_a - X_c)} \quad [4.0]$$

Waarin:	BPF	= Bypass factor	[-]
---------	-----	-----------------	-----

Deze waardes worden gebruikt om te analyseren hoeveel lucht er in contact komt, of juist niet in contact komt, met de warmtewisselaar. De lucht die in contact komt met de warmtewisselaar wordt afgekoeld en er wordt eventueel vocht uit onttrokken. De lucht die niet in contact komt met de warmtewisselaar heeft dezelfde eigenschappen als de ingaande lucht. De uitgaande luchtstroom is dus een mix van gekoelde en niet gekoelde lucht, deze verhouding kan met de formules bepaald worden.

4.7 EEN VERBETERD INGENIEURS MODEL VOOR WARMTEWISSELAARS

Bron: (Buhl, Wang, & Haves, 2012)

Dit model is net als de vorige modellen ook op dezelfde methode gebaseerd. Dit ook met dezelfde achterliggende gedachte, dat een accuraat model vaak te arbeidsintensief is om te gebruiken bij het ontwerpen en voorspellen van installaties. De basisformule voor dit model is:

$$\frac{1}{UA_{tot}} = \frac{1}{UA_{ext}} + r_{pijp} + \frac{1}{UA_{int}} \quad [4.1]$$

Waarin:	UA	= Warmtedoorgangscoefficiënt · Oppervlak	[W/K]
	r	= Weerstand	[-]

De weerstand van de pijp wordt in dit model weggelaten, omdat dit bij schone warmtewisselaars verwaarloosbaar is. In het model hebben de externe en interne delen een relatie tot elkaar. Deze relatie kan omschreven worden als de relatieve vochtigheid aan de uittredende zijde van de warmtewisselaar.

Wanneer er wordt gerekend met dit model dan kan het volgende worden vastgesteld:

$$R = a_1 \cdot S \cdot Vel_a^{-0.8} + a_2 \cdot Vel_a^{-0.8} + a_3 \quad [4.2]$$

$$R = \frac{A_{face} \cdot N_{row}}{UA_{tot}} \quad [4.3]$$

$$Vel_a = \frac{m_a}{\rho_a \cdot A_{face}} \quad [4.4]$$

$$Vel_w = \frac{m_w}{\rho_w \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot N_{cir}} \quad [4.5]$$

Waarin:	a _{1,2,3}	= Constante	[-]
	A	= Oppervlakte	[m ²]
	N	= Aantal	[-]
	S	= Verhouding voelbare en totale warmteoverdracht	[-]
	Vel	= Snelheid	[m/s]
	m	= Massa	[kg]
	ρ	= Dichtheid	[kg/m ³]
	d	= Diameter	[m]

Met behulp van de onderstaande formules kunnen de a-waardes en de uiteindelijke UA-waardes bepaald worden. Deze waardes definiëren de koelbatterij, en kunnen eventueel in een ander model gebruikt worden.

$$UA_{dry} = (1 - f_{wet}) \left(\frac{1}{UA_{ext}} + \frac{1}{UA_{int}} \right)^{-1} \quad [4.6]$$

$$UA_{wet} = f_{wet} \left(\frac{1}{\frac{UA_{ext} \cdot c_{p,sat}}{c_p}} + \frac{1}{UA_{int}} \right)^{-1} \quad [4.7]$$

$$UA_{ext} = \frac{C \cdot A_{face} \cdot N_{row}}{\left(a_1 \left(\frac{\rho_a \cdot A_{face}}{m_a} \right)^{0.8} + a_3 \right)} \quad [4.8]$$

$$UA_{int} = C \cdot \left(\frac{A_{face} \cdot N_{row}}{a_2} \right) \cdot \left(\rho_w \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} N_{cir} \right)^{0.8} \quad [4.9]$$

Waarin: C = Constante [-]
 f = Aandeel nat oppervlak (0=droog) [-]

In dit model worden veel factoren gebruikt die compenseren voor de onbekende systeemeigenschappen van de koelbatterij. Het is hier dus erg lastig te zeggen wat wel en niet wordt gebruikt in dit model.

4.8 ACSS MODEL

Bron: (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)

Dit model, dat ook gebruik maakt van de LMTD methode, berekent op basis van een reeks standaardvariabelen de uittredende watertemperatuur en de watervolumestroom. Dit wordt gedaan door middel van een nat en een droog warmte-uitwisselend oppervlak.

$$A_o = A_{dry} + A_{wet} \quad [5.0]$$

$$A_{dry} = \frac{\phi_{dry}}{(c_{p,dry} \cdot \Delta\theta_{lmt d})} \quad [5.1]$$

$$A_{wet} = \frac{\phi_{wet}}{(c_{p,wet} \cdot \Delta h_{lmhd})} \quad [5.2]$$

Waarin: ϕ = Warmtestroom [W]
 c_p = Soortelijke warmte [J/kg·K]
 A = Oppervlakte [m²]
 $\Delta\theta_{lmt d}$ = Log mean temperature difference [K]
 Δh_{lmhd} = Log mean enthalpy difference [K]

Wanneer de oppervlakte berekening in de algemene warmtebalans wordt verwerkt, dan kan een oplossing gevonden worden voor beide formules. Dit kan eventueel ook gecombineerd worden met andere modellen om zo tot een beter resultaat te komen. Deze methode wordt ook gecombineerd met de *LMHD* methode. Dit is dezelfde methode als de *LMTD* methode, alleen wordt er in dit geval met enthalpie gewerkt in plaats van met temperaturen.

$$U_{dry} = \{a_1 v_w^{-0.8} + b_1 + c_1 v_a^{-0.64}\}^{-1} \quad [5.3]$$

$$U_{wet} = \{a_2 v_w^{-0.8} + b_2 + c_2 v_a^{-0.8}\}^{-1} \quad [5.4]$$

$$\Delta\theta_{lmtd} = \frac{(\theta_{ai}-\theta_{wo})-(\theta_{a,bd}-\theta_{w,bd})}{\ln\left(\frac{(\theta_{ai}-\theta_{wo})}{(\theta_{a,bd}-\theta_{w,bd})}\right)} \quad [5.5]$$

$$\Delta\theta_{lmhd} = \frac{(h_{a,bd}-h_{w,bd})-(h_{ao}-h_{wi})}{\ln\left(\frac{(h_{a,bd}-h_{w,bd})}{(h_{ao}-h_{wi})}\right)} \quad [5.6]$$

Waarin:	h	= Enthalpie	[J/kg]
	v	= Snelheid	[m/s]
	U	= Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m²K]
	a,b,c	= Constanten	[-]

Met:	a ₁	= 0.00569	a ₂	= 0.00290
	b ₁	= 0.00547	b ₂	= 0.00279
	c ₁	= 0.03100	c ₂	= 0.01100

Dit model, net als het vorige model, werkt met veel constanten om de missende informatie van de koelbatterij aan te vullen. Hier is het dus ook lastig te bepalen wat wel en niet is meegenomen aan eigenschappen in de koelbatterij.

4.9 TU DICTAAT

Bron: (Paassen, 2003)

Het volgende model is ter ondersteuning van de andere modellen, en geen model op zich. Er wordt hier gekeken naar temperatuur efficiëntie. Dit houdt in hoe efficiënt de koelbatterij de lucht afkoelt in vergelijking met de maximaal mogelijke afkoeling van de lucht.

$$\eta_k = \frac{\theta_{w,o}-\theta_{w,i}}{\theta_{a,i}-\theta_{w,i}} \quad [5.7]$$

$$\eta_w = \frac{\theta_{a,o}-\theta_{a,i}}{\theta_{a,i}-\theta_{w,i}} \quad [5.8]$$

Waarin:	η	= Rendement	[-]
	θ	= Temperatuur	[°C]

Deze methode is ontwikkeld om de uitgaande temperaturen van warmtewisselaars eenvoudig in deellast te kunnen berekenen. Hiervoor geldt wel dat het alleen toepasbaar is voor droge koelers, er moet dus nog worden bepaald wat de foutmarge is van deze methode bij gedeeltelijk of volledig natte koelers.

4.10 ISSO HANDBOEK

Bron: (Knoll, Wagenaar, & van Weele, 2002)

Dit hoofdstuk is wederom een aanvulling op de modellen. In de meeste modellen is de luchtvochtigheid nodig en deze is uit te rekenen met de volgende methode. Als eerste wordt de verzadigde dampspanning bepaald, gevolgd door de dampspanning en als laatste de absolute luchtvochtigheid.

$$P_{verz} = \frac{C_1}{\theta} + C_2 + C_3 \cdot \theta + C_4 \cdot \theta^2 + C_5 \cdot \theta^3 + C_6 \cdot \log \theta \quad [5.9]$$

Waarin:	θ	= Temperatuur	[K]
	p	= Dampspanning	[N/m ²]
	C	= Constante	[-]

Met:	C_1	= -5800.2206	C_2	= 1.3914993
	C_3	= -0.048640239	C_4	= 0.41764768E ⁻⁴
	C_5	= -0.1445209E ⁻⁷	C_6	= 6.5459673

Met de bovenstaande formules kunnen de onderstaande formules worden uitgerekend.

$$P_l = \frac{RH}{100} \cdot P_{verz} \quad [6.0]$$

$$x = 0.622 \cdot \frac{P_l}{(10^5 - P_l)} \quad [6.1]$$

Waarin:	RH	= Relatieve vochtigheid	[%]
---------	------	-------------------------	-----

4.11 DAUWPUNT CALCULATIE

Bron: (Sensirion, 2006)

Dit model is ter ondersteuning van de andere modellen en een benadering van het Mollier diagram. De eerste formule in dit model bepaald de verzadigde waterdampspanning.

$$P_{verz} = \alpha \cdot e^{\left(\frac{\beta \cdot \theta}{\lambda + \theta}\right)} \quad [6.2]$$

Waarin:	θ	= Temperatuur	[K]
	P	= Dampspanning	[N/m ²]

Met:	$\alpha = 6.112$	$\beta = 17.62$	$\lambda = 243.12$
------	------------------	-----------------	--------------------

Vervolgens kan de dauwpunttemperatuur bepaald worden met de volgende formule:

$$\theta_{dp} = \frac{\lambda \cdot \ln\left(\frac{P_l}{\alpha}\right)}{\beta - \ln\left(\frac{P_l}{\alpha}\right)} \quad [6.3]$$

Wanneer de dampspanning wordt ingevoegd in formule [6.3] en deze vervolgens wordt samengevoegd met formule [6.2] dan volgt daar de volgende formule uit:

$$\theta_{dp} = \frac{\lambda \cdot \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{\beta \cdot \theta}{\lambda + \theta}\right)}{\beta - \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{\beta \cdot \theta}{\lambda + \theta}\right)} \quad [6.4]$$

Waarin:	RH	= Relatieve vochtigheid	[%]
---------	------	-------------------------	-----

4.12 FORMULE VAN MERKEL

Bron: (Paassen, 2003)

De formule van Merkel is een formule die de warmtestroom berekent wat van de lucht, inclusief vocht in de lucht, overgedragen wordt aan de filmlaag. Deze formule houdt rekening met latente overdracht van warmte naar de filmlaag, condensatie van vocht in de lucht naar het oppervlak in de koelbatterij en met diffusie van vocht in de lucht naar de reeds bestaande filmlaag.

$$\Delta\phi = \frac{\alpha}{c_p} \cdot \Delta A \cdot (h - h_s) \quad [6.5]$$

Waarin:	ϕ	= Warmtestroom	[W]
	c_p	= Soortelijke warmte	[J/kg·K]
	A	= Oppervlakte	[m ²]
	α	= Warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m ² K]
	h	= Enthalpie	[J/kg]

Omdat de formule kijkt naar de enthalpie waardes tussen de lucht en de filmlaag op een specifiek stuk in de koelbatterij werkt de formule met kleine delen in de koelbatterij, dit in plaats van een temperatuurverschil over de hele koelbatterij of het natte deel van de koelbatterij. De enthalpie van de filmlaag is onbekend en kan bepaald worden met de volgende formule:

$$h + C \cdot \theta_w = h_{cond} + C \cdot \theta_{cond} \quad [6.6]$$

Waarin:	C	= Constante	[-]
	θ	= Temperatuur	[K]

5. MODELLEN

In dit hoofdstuk zullen de verschillende modellen besproken worden. Als eerste wordt een vergelijking gemaakt tussen de bestaande modellen. Hierna volgen de gemaakte modellen met onderbouwing.

Tijdens het onderzoek is geconcludeerd dat het model een heel belangrijk aspect van de koelbatterij moet bepalen, dit is het punt waar de koelbatterij overgaat van nat naar droog. Dit wordt door de bestaande modellen gedaan door middel van iteratie, wat voor een ontwerpend ingenieur een te traag proces is. De definitie van iteratie is herhaling, dit betekent dat een formule meerdere malen herhaald moet worden om tot een resultaat te komen. Een voorbeeld van een model dat alleen met iteratie op te lossen is, is het 'LMHD' model. Een model wat hier geen gebruik van maakt is het 'Bypass factor' model. Het 'Bypass factor' model is alleen niet voldoende om het gewenste resultaat te behalen. Het uiteindelijke doel van het onderzoek is dus om een model te creëren wat de eenvoud heeft van het 'Bypass factor' model en de resultaten van het 'LMHD' model.

Een tweede belangrijk punt, wat al eerder is behandeld in hoofdstuk 3.10 Modelvalidatie, is de diepgang van het model. De geometrie van een koelbatterij is te ingewikkeld om met een empirisch model door te rekenen. Voor de modellen wordt dan ook een eenvoudige geometrie aangenomen, om zo het model eenvoudig te houden. De uitgekozen geometrie, welke het meeste overeenkomt met de geometrie van een koelbatterij, is die van een tegenstroom platenwisselaar. Wanneer blijkt dat met deze geometrie de foutmarge in de eisen van het model wordt overschreden dan wordt er gekeken naar een dubbele leiding met koelwater en met lucht die langs de leidingen stroomt.

Nog een aanname die wordt gedaan bij het maken van de modellen is dat de bijdrage van de warmteweerstand van de metalen in de vinnen en buizen verwaarloosbaar klein is (Morisot, Marchio, & Stabat, 2002). In de modellen worden de eigenschappen van de materialen om deze reden achterwege gelaten.

5.1 VERGELIJKING MODELLEN

Als eerste zal in dit hoofdstuk worden gekeken naar de vergelijking tussen de reeds bestaande modellen. Er zijn in totaal 9 modellen met elk andere variabelen welke berekend worden en met elk een gebruiksgemak. Het gebruiksgemak wordt beoordeeld met een -, --, + of ++. Hierbij is de -- het slechtst en de ++ het beste, gebaseerd op persoonlijk gebruik van de modellen. De eigenschappen welke het model beschikt zijn aangegeven met een *. Dit alles is vertaald in de onderstaande tabel, Tabel 1.

TABEL 1; EIGENSCHAPPEN REEDS BESTAANDE MODELLEN

	NTU methode	LMTD methode	Een ingenieursmodel voor warmtewisselaars	Versimpeld model voor het functioneren van gekoeld water koelbatterijen	Bypass/contact factor	Een verbeterd ingenieurs model voor warmtewisselaars	ACSS model	TU dictaat	ISSO handboek	Dauwpunt calculatie	Formule van Merkel
Gebruiksgemak	-	+	--	--	-	+	++	++	++	++	-
Output eisen:											
Luchttemperatuur	*	*			*			*		*	*
Watertemperatuur	*	*						*			*
Relatieve vochtigheid									*		
Koelvermogen totaal	*		*	*		*					*
Koelvermogen latent			*	*		*					*
Benodigde variabelen:											
Oppervlakte			*	*		*	*				*
Warmtegeleidings-coëfficiënt				*		*	*				*
Snelheden						*					
Enthalpie		*							*		*

Voor het eerste model is er een keuze gemaakt op basis van gebruiksgemak. De meest gebruiksvriendelijke modellen die elkaar aanvullen zijn de volgende vier van het rijtje: De basis van het model wordt gevormd door het 'ACSS' model. Dit model wordt aangevuld met de modellen uit: 'TU dictaat', 'ISSO handboek' en 'een verbeterd ingenieursmodel voor warmtewisselaars'.

5.2 MODEL 1

Dit model is gebaseerd op de meest eenvoudige modellen, welke gecombineerd direct in de praktijk toepasbaar zijn. Wanneer dit model niet afdoende nauwkeurig blijkt dan zal het model verbeterd moeten worden met meer ingewikkelde modellen.

Het model is in twee stappen weergegeven. Het eerste deel, Tabel 2, geeft weer welke stappen er genomen moeten worden om de warmtewisselaar te dimensioneren. Deze stap wordt gedaan om de deellastsituatie te kunnen berekenen. Wanneer de systeemeigenschappen van de koelbatterij niet bekend zijn dan is dit niet of onnauwkeurig te bepalen. Het tweede deel, Tabel 3, geeft de stappen weer die genomen moeten worden om tot de gewenste antwoorden in het model te komen.

Er zijn verschillende modellen gecombineerd tot een enkel model. Dit is, zoals eerder genoemd, gedaan op basis van de eenvoud in gebruik. De modellen welke gebruikt worden zijn:

- Een verbeterd ingenieursmodel voor warmtewisselaars;
- ACSS model;
- TU-dictaat;
- ISSO handboek;
- Dauwpunt calculatie.

Hierbij worden de snelheden van de media bepaald met 'Een verbeterd ingenieursmodel voor warmtewisselaars'. Deze gegevens zijn nodig om de warmteoverdracht binnen de koelbatterij te kunnen bepalen.

Vervolgens wordt in stap 2 de U-waardes bepaald, de systeemeigenschappen voor warmteoverdracht. Dit wordt gedaan door middel van het 'ACSS model'. Deze twee modellen vullen elkaar op dit vlak erg goed aan en zijn beide erg makkelijk in gebruik.

Om in deellast de uitgaande temperaturen te kunnen bepalen is er een model nodig wat dit bepaalt, of dit moet gedaan worden door middel van iteratie. Het laatste is bij dit model niet gewenst omdat dit het model direct een stuk ingewikkelder maakt en ook gedeeltelijk dynamisch. Er is hier dus gekozen om een model te gebruiken, het model van het 'TU-dictaat'. Dit model bepaalt een rendement wat in deellast gebruikt wordt om de uitgaande temperaturen te bepalen.

Omdat het model met zowel latent als voelbare koeling rekent moet er een scheiding zijn en kan er niet alleen met temperaturen gerekend worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het model uit het 'ISSO handboek'. Dit model bepaalt met behulp van de temperatuur en de luchtvochtigheid de enthalpie. Enthalpie wordt gebruikt om het natte gedeelte van de koelbatterij door te rekenen.

Als er wordt gerekend met een temperatuurverschil dan is dit vaak niet nauwkeurig genoeg. Een logaritmisch temperatuurverschil is een stuk nauwkeuriger en wordt gehaald uit het 'ACSS model'. Hierbij wordt aangenomen dat aan de natte kant van de warmtewisselaar de enthalpie een lineair verband houdt met de temperatuur van het oppervlak.

Het volgende model dat wordt gebruikt is het 'dauwpunt calculatie model'. Het dauwpunt moet bepaald worden om de scheiding tussen het latente en voelbare gedeelte van de koelbatterij te bepalen. Dit is de meest eenvoudige methode om de scheiding te vinden.

De scheiding wordt vervolgens bepaald door middel van een zelf opgestelde formule. Deze formule, in stap 7, neemt aan dat de temperaturen in de koelbatterij lineair toe- en afnemen. Wanneer dit wordt aangenomen dan zal op een bepaald punt de dauwpunttemperatuur kruisen met de watertemperatuur. Op dit punt wordt dan aangenomen dat de koelbatterij overgaat van voelbare naar latente koeling.

Als laatste stap wordt het oppervlakte van het systeem bepaald, wat het systeem volledig definieert. Dit oppervlak, bepaald met het 'ACSS model', wordt gebruikt om de deellastsituatie door te rekenen.

TABEL 2; STAPPENPLAN VOLLAST SITUATIE

Vollast stap:	Doel:	Formule:
1	Water/luchtsnelheid berekenen (Buhl, Wang, & Haves, 2012)	$Vel_a = \frac{m_a}{\rho_a \cdot A_{face}}$
		$Vel_w = \frac{m_w}{\rho_w \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} N_{cir}}$
2	U-waardes berekenen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$U_{dry} = \{a_1 v_w^{-0.8} + b_1 + c_1 v_a^{-0.64}\}^{-1}$
		$U_{wet} = \{a_2 v_w^{-0.8} + b_2 + c_2 v_a^{-0.8}\}^{-1}$
3	Temperatuur rendement berekenen (Paassen, 2003)	$\eta_k = \frac{\theta_{ku} - \theta_{ki}}{\theta_{wi} - \theta_{ki}}$
		$\eta_w = \frac{\theta_{wu} - \theta_{wi}}{\theta_{wi} - \theta_{ki}}$
4	Enthalpie berekenen (ISSO, 2014)	$h = 1.006\theta + x \cdot (2491 + 1.926\theta)$
		$x = 0.622 \cdot \frac{P_l}{(10^5 - P_l)}$
5	Temperatuur/enthalpieverschil berekenen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$\Delta\theta_{lmt d} = \frac{(\theta_{ai} - \theta_{wo}) - (\theta_{a,bd} - \theta_{w,bd})}{\ln\left(\frac{(\theta_{ai} - \theta_{wo})}{(\theta_{a,bd} - \theta_{w,bd})}\right)}$
		$\Delta\theta_{lmhd} = \frac{(h_{a,bd} - h_{w,bd}) - (h_{ao} - h_{wi})}{\ln\left(\frac{(h_{a,bd} - h_{w,bd})}{(h_{ao} - h_{wi})}\right)}$
6	Dauwpunt temperatuur bepalen (Sensirion, 2006)	$\theta_{dp} = \frac{c \cdot \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot \theta}{c + \theta}\right)}{b - \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot \theta}{c + \theta}\right)}$
7	Fractie nat oppervlak bepalen	$\theta_{dp,i} - \Delta\theta_{dp} \cdot x = \Delta\theta_w \cdot x + \theta_{w,i}$
8	Oppervlakte bepalen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$A = \frac{\phi}{U_{dry} \cdot \Delta\theta_{lmt d} + U_{wet} \cdot \Delta h_{lmhd}}$

De stappen weergegeven in Tabel 3 voeren dezelfde stappen uit als de stappen in Tabel 2, alleen in een andere volgorde. Op deze manier wordt het vermogen en de overige benodigde ‘output’ waardes uitgerekend.

TABEL 3; STAPPENPLAN DEELLAST SITUATIE

Deellast stap:	Doel:	Formule:
9	Temperaturen berekenen (Paassen, 2003)	$\eta_k = \frac{\theta_{ku} - \theta_{ki}}{\theta_{wi} - \theta_{ki}}$
		$\eta_w = \frac{\theta_{wu} - \theta_{wi}}{\theta_{wi} - \theta_{ki}}$
10	Enthalpie berekenen (ISSO, 2014)	$h = 1.006\theta + x \cdot (2491 + 1.926\theta)$
		$x = 0.622 \cdot \frac{P_l}{(10^5 - P_l)}$
11	Temperatuur/enthalpieverschil berekenen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$\Delta\theta_{lmtd} = \frac{(\theta_{ai} - \theta_{wo}) - (\theta_{a,bd} - \theta_{w,bd})}{\ln\left(\frac{(\theta_{ai} - \theta_{wo})}{(\theta_{a,bd} - \theta_{w,bd})}\right)}$
		$\Delta\theta_{lmhd} = \frac{(h_{a,bd} - h_{w,bd}) - (h_{ao} - h_{wi})}{\ln\left(\frac{(h_{a,bd} - h_{w,bd})}{(h_{ao} - h_{wi})}\right)}$
12	Water/luchtsnelheid berekenen (Buhl, Wang, & Haves, 2012)	$Vel_a = \frac{m_a}{\rho_a \cdot A_{face}}$
		$Vel_w = \frac{m_w}{\rho_w \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} N_{cir}}$
13	U-waardes berekenen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$U_{dry} = \{a_1 v_w^{-0.8} + b_1 + c_1 v_a^{-0.64}\}^{-1}$
		$U_{wet} = \{a_2 v_w^{-0.8} + b_2 + c_2 v_a^{-0.8}\}^{-1}$
14	Dauwpunt temperatuur bepalen (Sensirion, 2006)	$\theta_{dp} = \frac{c \cdot \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot \theta}{c + \theta}\right)}{b - \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot \theta}{c + \theta}\right)}$
15	Fractie nat oppervlak bepalen	$\theta_{dp,i} - \Delta\theta_{dp} \cdot x = \Delta\theta_w \cdot x + \theta_{w,i}$
16	Vermogen bepalen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$\phi_{tot} = U_{dry} \cdot A_{dry} \cdot \Delta\theta_{lmtd} + U_{wet} \cdot A_{wet} \cdot \Delta h_{lmhd}$

Na een analyse van het gemaakte model is ontdekt dat er een fout in zit. Bij de gegevens van de leveranciers is een foute aanname gedaan en hier is het model op gebaseerd, wat deze fout in het model ook meteen meeneemt. Dit model kan dus niet de gewenste gegevens berekenen.

De fout zit in stap 10. Hier wordt aangenomen dat de gegevens van de fabrikant aangeven dat lucht een ingaande en uitgaande luchtvochtigheid heeft van 50%. Dit is echter onmogelijk wanneer lucht door een koelbatterij heengaet zonder de lucht hierna nog te behandelen. Alleen de ingaande lucht heeft een luchtvochtigheid van 50%.

5.3 MODEL 2

Dit model gaat verder op model 1. De in het vorige hoofdstuk aangegeven fout is gecorrigeerd en aangepast in dit model.

Het model is in twee stappen weergegeven. Het eerste deel, Tabel 4, geeft weer welke stappen er moeten worden genomen om de warmtewisselaar te dimensioneren. Deze stap wordt gedaan om de deellastsituatie te kunnen berekenen. Wanneer de systeemeigenschappen van de koelbatterij niet bekend zijn dan is dit niet of onnauwkeurig te bepalen. Het tweede deel, Tabel 5, geeft de stappen weer die genomen moeten worden om tot de gewenste antwoorden in het model te komen.

TABEL 4; STAPPENPLAN VOLLAST SITUATIE

Vollast stap:	Doel:	Formule:
1	Water/luchtsnelheid berekenen (Buhl, Wang, & Haves, 2012)	$Vel_a = \frac{m_a}{\rho_a \cdot A_{face}}$
		$Vel_w = \frac{m_w}{\rho_w \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} N_{cir}}$
2	U-waardes berekenen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$U_{dry} = \{a_1 v_w^{-0.8} + b_1 + c_1 v_a^{-0.64}\}^{-1}$
		$U_{wet} = \{a_2 v_w^{-0.8} + b_2 + c_2 v_a^{-0.8}\}^{-1}$
3	Temperatuur rendement berekenen (Paassen, 2003)	$\eta_k = \frac{\theta_{ku} - \theta_{ki}}{\theta_{wi} - \theta_{ki}}$
		$\eta_w = \frac{\theta_{wu} - \theta_{wi}}{\theta_{wi} - \theta_{ki}}$
4	Enthalpie berekenen (ISSO, 2014)	$h = 1.006\theta + x \cdot (2491 + 1.926\theta)$
		$x = 0.622 \cdot \frac{P_l}{(10^5 - P_l)}$
5	Temperatuur/enthalpieverschil berekenen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$\Delta\theta_{lmt d} = \frac{(\theta_{ai} - \theta_{wo}) - (\theta_{a,bd} - \theta_{w,bd})}{\ln\left(\frac{(\theta_{ai} - \theta_{wo})}{(\theta_{a,bd} - \theta_{w,bd})}\right)}$
		$\Delta\theta_{lmhd} = \frac{(h_{a,bd} - h_{w,bd}) - (h_{ao} - h_{wi})}{\ln\left(\frac{(h_{a,bd} - h_{w,bd})}{(h_{ao} - h_{wi})}\right)}$
6	Dauwpunt temperatuur bepalen (Sensirion, 2006)	$\theta_{dp} = \frac{c \cdot \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot \theta}{c + \theta}\right)}{b - \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot \theta}{c + \theta}\right)}$
7	Fractie nat oppervlak bepalen	$\theta_{dp,i} = \Delta\theta_w \cdot x + \theta_{w,i}$
8	Oppervlakte bepalen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$A = \frac{\phi}{U_{dry} \cdot \Delta\theta_{lmt d} + U_{wet} \cdot \Delta h_{lmhd}}$

TABEL 5; STAPPENPLAN DEELLAST SITUATIE

Deellast stap:	Doel:	Formule:
9	Temperaturen berekenen (Paassen, 2003)	$\eta_k = \frac{\theta_{ku} - \theta_{ki}}{\theta_{wi} - \theta_{ki}}$
		$\eta_w = \frac{\theta_{wu} - \theta_{wi}}{\theta_{wi} - \theta_{ki}}$
10	Enthalpie berekenen (ISSO, 2014)	$h = 1.006\theta + x \cdot (2491 + 1.926\theta)$
		$x = 0.622 \cdot \frac{P_l}{(10^5 - P_l)}$
		$P_{verz} = \frac{C_1}{\theta} + C_2 + C_3 \cdot \theta + C_4 \cdot \theta^2 + C_5 \cdot \theta^3 + C_6 \cdot \log \theta$
11	Luchtvochtigheid aan de uitzijde bepalen (ISSO, 2014)	$RH = \frac{100 \cdot P_l}{P_{verz}}$ met $0 < RH < 100$
12	Temperatuur/enthalpieverschil berekenen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$\Delta\theta_{lmt d} = \frac{(\theta_{ai} - \theta_{wo}) - (\theta_{a,bd} - \theta_{w,bd})}{\ln\left(\frac{(\theta_{ai} - \theta_{wo})}{(\theta_{a,bd} - \theta_{w,bd})}\right)}$
		$\Delta\theta_{lmh d} = \frac{(h_{a,bd} - h_{w,bd}) - (h_{ao} - h_{wi})}{\ln\left(\frac{(h_{a,bd} - h_{w,bd})}{(h_{ao} - h_{wi})}\right)}$
13	Water/luchtsnelheid berekenen (Buhl, Wang, & Haves, 2012)	$Vel_a = \frac{m_a}{\rho_a \cdot A_{face}}$
		$Vel_w = \frac{m_w}{\rho_w \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} N_{cir}}$
14	U-waardes berekenen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$U_{dry} = \{a_1 v_w^{-0.8} + b_1 + c_1 v_a^{-0.64}\}^{-1}$
		$U_{wet} = \{a_2 v_w^{-0.8} + b_2 + c_2 v_a^{-0.8}\}^{-1}$
15	Dauwpunt temperatuur bepalen (Sensirion, 2006)	$\theta_{dp} = \frac{c \cdot \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot \theta}{c + \theta}\right)}{b - \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot \theta}{c + \theta}\right)}$
16	Fractie nat oppervlak bepalen	$\theta_{dp,i} = \Delta\theta_w \cdot x + \theta_{w,i}$
17	Vermogen bepalen (Yamaguchi, Miyata, & Oda, 2006)	$\phi_{tot} = U_{dry} \cdot A_{dry} \cdot \Delta\theta_{lmt d} + U_{wet} \cdot A_{wet} \cdot \Delta h_{lmh d}$

In stap 17 kan de formule gesplitst worden en ook de droge en natte koeling apart worden berekend. Voor een compleet overzicht van de uitleg over de gebruikte modellen, zie 5.2 Model 1.

5.4 MODEL 3 BYPASS FACTOR

Bron: (Wesselingh, 1996)

De bypass factor, reeds uitgelegd in hoofdstuk 4.6 Bypass/contact factor, heeft een compleet model om een koelbatterij uit te rekenen. Er is nog extra onderzoek gedaan of dit model ook te gebruiken is om deellastsituaties te berekenen. Dit model gaat volledig uit van de luchtzijde van de koelbatterij.

$$\Delta h = \frac{\phi}{q_m \cdot 1.2} \quad [6.5]$$

$$h_{a,o} = \Delta h - h_{a,i} \quad [6.6]$$

Waarin:	h	= Enthalpie	[J/kg]
	ϕ	= Vermogen	[W]
	q_m	= Massastroom	[kg/s]

Na deze twee berekeningen moet de natteboltemperatuur bepaald worden uit het Mollier diagram, gevolgd door het bepalen van de Bypass factor aan de hand van een tabel (Wesselingh, 1996). Als laatste volgt nog een tweetal formules.

$$\theta_{a,o} = \theta_{a,no} + (\theta_{a,i} - \theta_{a,ni}) \cdot BPF \quad [6.7]$$

$$\phi_v = q_m \cdot 1.2 \cdot (\theta_{a,i} - \theta_{a,o}) \quad [6.8]$$

Waarin:	θ	= Temperatuur	[K]
	BPF	= Bypass factor	[-]

Na analyse van het model blijkt het uiteindelijk niet mogelijk te zijn om deze te gebruiken om deellastsituaties te berekenen met de van te voren gestelde eisen. Dit model biedt wel houvast om andere modellen te verbeteren. Wanneer de uitgaande watertemperatuur bekend is in de deellastsituatie, zoals in sommige reeds bestaande modellen het geval is, dan kan de deellastsituatie wel worden berekend. Dit is niet gevalideerd omdat het in dit onderzoek een eis was om deze waarde uit te rekenen.

Na dit model ook grondig onderzocht te hebben kan de conclusie getrokken worden dat een eenvoudig model met de gestelde eisen niet mogelijk is.

5.5 MODEL 4 MERKEL EN GRONDSLAGFORMULES

In het laatste deel van het onderzoek is nog een extra model naar voren gekomen. Dit model, de formule van Merkel, is een methode om de natte zijde van een koelbatterij nauwkeurig door te rekenen. Dit wordt gedaan door middel van iteratie in het natte deel. Het voordeel hiervan is dat voor de afgifte van vocht zowel de condensatie als de diffusie worden meegenomen in het model. Dit is niet het geval in andere modellen. Het nadeel van deze methode is dat het door middel van iteratie moet worden berekend. Dit model wordt door vrijwel alle bestaande modellen toegepast. Omdat eerdere modellen geen resultaat hebben gegeven is besloten dit model te maken en te testen.

Dit model is in drie onderdelen verdeeld. Het eerste deel is het droge deel, het tweede het grensvlak tussen nat en droog en het derde deel is het natte gedeelte van de koelbatterij.

Als eerste het droge gedeelte. In het droge gedeelte kan alles worden berekend met behulp van temperaturen, omdat het vochtgehalte in de lucht niet verandert. Voor het droge gedeelte zijn de volgende formules te gebruiken:

$$\phi_d = U \cdot A \cdot \Delta\theta_{lmd} \quad [6.9]$$

$$\phi_d = q_m \cdot c_p \cdot \Delta\theta_a \quad [7.0]$$

$$\phi_d = q_m \cdot c_p \cdot \Delta\theta_w \quad [7.1]$$

$$A_d = \frac{q_m \cdot c_p \cdot (\theta_{a,i} - \theta_{a,g})}{\alpha \cdot \Delta\theta_{lmd}} \quad [7.2]$$

Waarin:	ϕ	= Warmtestroom	[W]
	q_m	= Massastroom	[kg/s]
	c_p	= Soortelijke warmte	[kJ/kg·K]
	θ	= Temperatuur	[K]
	U	= Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m²K]
	A	= Oppervlakte	[m²]
	α	= Warmteoverdrachtcoëfficiënt	[W/m²K]

Met de vollast berekening kunnen de U en A waardes in de formules worden bepaald. In de deellastberekening is er een groter aantal onbekenden en zullen verschillende vergelijkingen gebruikt moeten worden om tot een resultaat te komen. De onbekenden in het droge gedeelte in deellast van dit model zijn:

Onbekenden:	ϕ_d	= Warmtestroom	[W]
	$\theta_{a,bd}$	= Temperatuur lucht grens	[K]
	$\theta_{w,bd}$	= Temperatuur water grens	[K]
	$\theta_{w,o}$	= Temperatuur water uitgaand	[K]
	U_d	= Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m²K]
	A_d	= Oppervlakte	[m²]

Het natte gedeelte heeft niet alleen te maken met alleen de temperatuur. Naast de temperatuur komt de luchtvochtigheid ook om de hoek kijken. Het vocht uit de lucht condenseert naar het oppervlak van de koelbatterij. Daarnaast is er ook sprake van diffusie van het vocht uit de lucht naar de filmlaag. Dit geheel kan met behulp van iteratie en de volgende formules worden opgelost.

$$\Delta\phi_n = \frac{\alpha}{c_p} \cdot \Delta A \cdot \Delta h_{lmd} \quad [7.3]$$

$$h_a + C \cdot \theta_w = h_s + C \cdot \theta_s \quad [7.4]$$

$$\text{Met: } C = \frac{c_p}{\frac{\alpha}{k} - 1} \quad [7.5]$$

$$\phi_n = q_m \cdot c_p \cdot \Delta h_a \quad [7.6]$$

$$\phi_n = q_m \cdot c_p \cdot \Delta \theta_w \quad [7.7]$$

$$A_n = \frac{q_m \cdot (h_{a,g} - h_{a,o})}{\frac{\alpha}{c_p} \cdot \Delta h_{lmhd}} \quad [7.8]$$

Waarin:	ϕ	= Warmtestroom	[W]
	c_p	= Soortelijke warmte	[J/kg·K]
	A	= Oppervlakte	[m ²]
	α	= Warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m ² K]
	h	= Enthalpie	[J/kg]
	q_m	= Massastroom	[kg/s]

Met de vollast berekening kunnen de U en A waardes in de formules worden bepaald. In de deellastberekening is er een groter aantal onbekenden en zullen verschillende vergelijkingen gebruikt moeten worden om tot een resultaat te komen. De onbekenden in het natte gedeelte in deellast van dit model zijn:

Onbekenden:	ϕ_n	= Warmtestroom	[W]
	$h_{a,o}$	= Enthalpie	[J/kg]
	$h_{a,bd}$	= Enthalpie	[J/kg]
	$\theta_{w,bd}$	= Temperatuur water grens	[K]
	U_w	= Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m ² K]
	A_w	= Oppervlakte	[m ²]

Enthalpie bevat de waardes voor temperatuur en voor luchtvochtigheid. Dit houdt dus in dat de enthalpie van de uitgaande lucht vertaald kan worden naar $x_{a,o}$ en $\theta_{a,o}$. Naast de voor droog en nat genoemde formules en onbekenden is er ook nog het grensvlak. Dit grensvlak heeft enkele formules en een aantal onbekenden. De formules welke gebruikt worden op het grensvlak zijn formule [7.3] en de onderstaande:

$$h_{a,bd} = \frac{C \cdot (h_{a,i} - B \cdot \theta_{w,o}) + B \cdot (h_{a,bd} - C \cdot \theta_{a,bd})}{B + C} \quad [7.9]$$

$$B = \frac{q_{m,w} \cdot c_p}{q_{m,a}} \quad [8.0]$$

$$\theta_{a,bd} = \theta_{a,i} \cdot \frac{h_{a,i} \cdot h_{a,bd}}{c_p} \quad [8.1]$$

Waarin:	B, C	= Variabelen	[W]
---------	------	--------------	-----

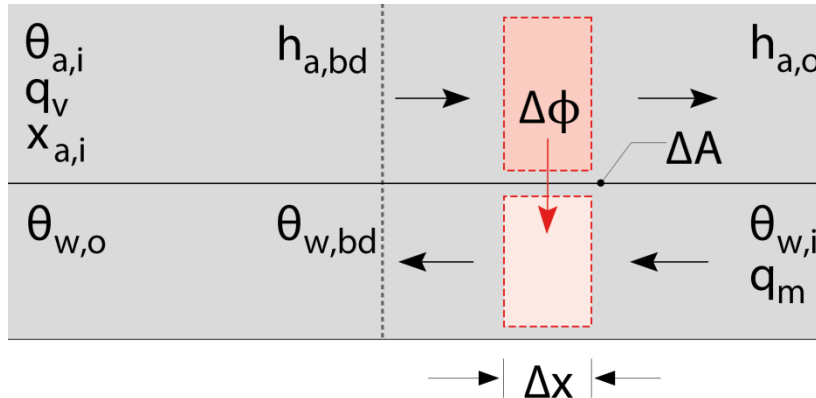
Op het grensvlak zijn de volgende onbekenden:

Onbekenden:	$\theta_{a,bd}$	= Temperatuur lucht grens	[K]
	$h_{a,bd}$	= Temperatuur water grens	[K]
	$\theta_{w,bd}$	= Temperatuur water grens	[K]

Wanneer alle voorgaande formules samen worden gebruikt en met behulp van een stelsel van vergelijkingen iteratief opgelost worden dan worden de systeemvariabelen vastgelegd, denk hierbij aan het oppervlak van de warmtewisselaar. Dit stelsel bestaat uit een combinatie van lineaire en niet lineaire vergelijkingen wat ervoor zorgt dat deze niet op een eenvoudige wijze kan worden opgelost en er dus naar ingewikkelde methodes uitgeweken moet worden.

Voor een visuele weergave zie Figuur 11. De symbolen op de afbeelding komen overeen met de symbolen gebruikt in het model. De linkerzijde in de afbeelding is de droge zijde van de warmtewisselaar, de rechterzijde is de natte zijde. De stippellijn in het midden van de afbeelding vormt de scheidingslijn tussen droog en nat.

FIGUUR 11; VISUELE WEERGAVE MODEL. LINKS DROOG, RECHTS NAT.



Er zijn in het model in totaal minder onbekenden dan er formules zijn. Dit betekent dat het model wiskundig op te lossen is. Om dit model op te lossen moet wel gebruik gemaakt worden van een iteratief proces. Dit proces vergt erg veel tijd en is niet geschikt voor een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties.

Binnen de tijd van het onderzoek is niet genoeg tijd geweest om het model af te ronden. Wat tot nog toe onderzocht is vormt een handvat om verder onderzoek uit te voeren naar dit onderwerp.

6. VALIDATIE

In dit hoofdstuk worden de verschillende modellen getoetst aan de hand van de programma's aangeleverd door de opdrachtgever. De vollast gegevens van de fabrikant worden in de modellen ingevoerd en vervolgens wordt zowel bij het programma als bij het model de deellastsituatie ingevoerd. De gegevens van deze vergelijking worden naast elkaar gelegd, wat de toetsing van het model vormt.

De gebruikte programma's/modellen om te valideren zijn:

- Coils for Windows (Luvata Söderköping AB, 2010).
- AlfaSelect AIR (Alfa Laval, 2013).
- GPC.EU 2015 (Güntner, 2015).

6.1 MODEL 1

Bij model 1 bleek vlak na de totstandkoming ervan dat deze niet correct was samengesteld. Het model bevatte een aanname die niet representatief was voor de werkelijkheid. Het model nam aan dat de ingaande relatieve luchtvochtigheid even hoog was als de uitgaande relatieve luchtvochtigheid. Dit is echter niet mogelijk zonder nabehandeling van de lucht. Model 1 is om deze reden niet gevalideerd.

6.2 MODEL 2

Dit model is de gecorrigeerde versie van model 1. De aanname welke was gedaan in model 1 was incorrect en is in dit model verbeterd. Door de samenstelling van het model was het echter onmogelijk om deze te valideren. In de validatiemodellen zijn de uitgaande temperaturen van de koelbatterij afhankelijk van de massastromen/volumestromen en ingaande en uitgaande water- en luchttemperaturen. In het zelf gecreëerde model was dit niet het geval, hierin was er sprake dat de uitgaande temperaturen alleen afhankelijk waren van de temperaturen van de vollastsituatie en de ingaande water- en luchttemperaturen van de deellastsituatie. Dit werd veroorzaakt door het gebruik van het TU-dictaat. Dit zorgt ervoor dat dit model niet te vergelijken is met de validatiemodellen. Voor een voorbeeld zie Bijlage I validatie model 2. In dit voorbeeld is te zien dat de volumestroom van de lucht verlaagd wordt, hiermee wordt de uitgaande luchttemperatuur ook lager in het validatiemodel. Dit is niet het geval in het zelf gemaakte model, omdat niet alle benodigde variabelen aan de uitgaande temperaturen zijn gekoppeld.

6.3 MODEL 3 BYPASS FACTOR

Het model is, net als de voorgaande modellen, niet te valideren. Er is geen mogelijkheid om met de gestelde eisen de deellastsituatie van een koelbatterij te berekenen. Tijdens de poging(en) tot het valideren van de modellen is tot de conclusie gekomen dat vrijwel alle modellen gebruik maken van een iteratief proces om het probleem op te lossen. Een iteratief proces vereist te veel tijd van een ontwerpend ingenieur om te voldoen aan de eisen van het onderzoek.

6.4 MODEL 4 MERKEL EN GRONDSLAGFORMULES

Dit model is, net als de vorige modellen, niet te valideren. Dit model is in het onderzoek niet afgekomen door tijdgebrek en er was ook geen mogelijkheid om een deel van het model te valideren.

7. CONCLUSIE & DISCUSSIE

De globale conclusie uit het onderzoek is dat het niet mogelijk is om een eenvoudig fysisch wiskundig model te maken van een koelbatterij in deellast. De ontworpen modellen voldoen niet aan de eisen van het onderzoek wat leidt tot de conclusie dat het niet mogelijk is om een eenvoudig genoeg model te maken. Het is echter wel mogelijk om een ingewikkelder model te creëren wat alleen niet aan de eisen van het onderzoek voldoet, denk hierbij aan het gebruik van iteratief oplossen of het toevoegen van een variabele aan de 'input' zijde van het model. Het laatste, het toevoegen van een variabele, zou kunnen worden gedaan met de uitgaande watertemperatuur.

Er is te werk gegaan door publicaties over koelbatterijen in deellast te besturen en te documenteren. Met deze modellen is getracht een eenvoudig model te maken wat gemakkelijk te gebruiken is door een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties. Dit model was niet te valideren met de validatie modellen in verband met een missende afhankelijkheid in het model, de temperaturen van de koelbatterij waren niet afhankelijk van de stromen in de koelbatterij. Dit is in de praktijk wel het geval en zo ook in de validatie-modellen, wat er toe leidt dat het zelf gecreëerde model niet bruikbaar is in de praktijk. Na het eerste model is er, op aanraden van de inhoudsdeskundige, dieper ingegaan op een eenvoudig model, het Bypass factor model. Deze was niet te gebruiken in deellastsituaties. Als laatste is er gekeken naar een ingewikkelder model wat gebruik maakt van een iteratieproces. Dit model werkt te traag om te voldoen aan de eisen van een ontwerpend ingenieur. Dit model is ook niet volledig uitgewerkt tijdens de duur van het onderzoek omdat deze te ingewikkeld was om binnen de tijd uit te werken.

De wensen van een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties zijn sterk gerelateerd aan de werkzaamheden die de persoon uitvoert. Bij het ontwerpen van klimaatinstallaties is het vaak noodzaak om snel te kunnen werken.

De invloed van warmteoverdracht in het metaal is verwaarloosbaar klein in vergelijking met de convectie warmteoverdracht. De materialen waarvan de leidingen en vinnen zijn gemaakt zijn niet meegenomen in de calculaties. De materialen zijn dus niet vereist bij het opgeven van variabelen.

De hoeveelheid rijen in het model speelt een grote rol. Dit bepaalt de weerstand van de koelbatterij voor de lucht en ook de hoeveelheid lucht die contact maakt met de vinnen en leidingen van de koelbatterij.

Het doel van het onderzoek is niet behaald. Er is geen praktisch toepasbaar model gecreëerd waarmee een koelbatterij in deellast kan worden berekend. Uit het onderzoek is gebleken dat dit niet mogelijk is met de huidige eisen.

Bij een vervolgonderzoek zou het aangeraden worden om het laatst gecreëerde model op te pakken en deze verder uit te werken. Er moet gekeken worden of dit model eenvoudiger gemaakt kan worden om het zo in te passen bij de wensen van een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties.

8. AANBEVELINGEN

De resultaten van het onderzoek laten zien dat het niet mogelijk is om een eenvoudig model te maken van een koelbatterij in deellast. Dit zou wel mogelijk moeten zijn. Het advies is dan ook om dit onderzoek voort te zetten en andere modellen te onderzoeken naar de mogelijkheid tot een eenvoudig model.

Er is in het onderzoek niet genoeg tijd geweest om het laatste model verder uit te diepen, dit model heeft een grote kans om een geschikt model te vormen. Het laatste model maakt gebruik van een ingewikkeld wiskundig proces, iteratie, wat niet gewenst is voor een ontwerpend ingenieur. Er moet gekeken worden of dit achterwege gelaten kan worden door bijvoorbeeld gebruik te maken van het fitten van verschillende soorten koelbatterijen. Ook moet er onderzocht worden of het model te gebruiken is zonder iteratie toe te passen. Wanneer dit mogelijk is en de validatie binnen de marges van het onderzoek valt dan voldoet het model wel volledig aan de eisen van een ontwerpend ingenieur van klimaatinstallaties.

Wanneer het huidige model getest wordt dan wordt aangeraden om dit met de Newton Rhapsone methode te doen (Springer, 2010). Dit is een geteste methode om numerieke iteratie toe te passen op differentieerbare functies.

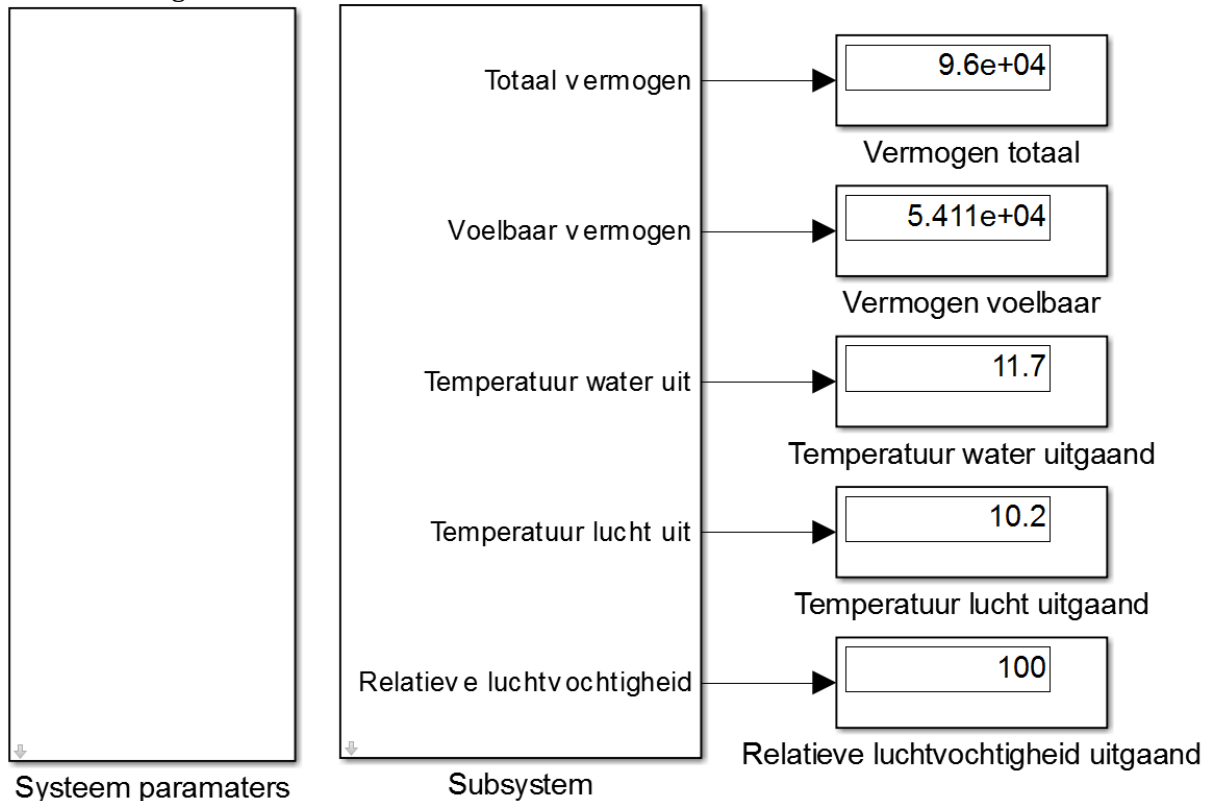
Een andere mogelijkheid om de modellen werkend te krijgen is door een variabele van de 'output' naar de 'input' te halen. Een voorbeeld wat in reeds bestaande modellen wordt gebruikt is de uitgaande watertemperatuur. Als deze temperatuur samen met de ingaande temperatuur en de massastroom van het water vast staat dan ligt een gedeelte van de koelbatterij vast. Als dit zo is dan kan de koelbatterij op een eenvoudige manier worden berekend. Dit is niet alleen van toepassing op het laatste model, maar ook op het 'Bypass factor' model.

LITERATUURLIJST

- Alfa Laval. (2013). AlfaSeleft AIR.
- Brink, A. v. (2012). *Waterzijdige prestaties van een koelbatterij in niet-ontwerpcondities*.
- Buhl, F., Wang, L., & Haves, P. (2012). *An Improved Simple Chilled Water Cooling Coil Model*.
- Güntner. (2015, 11 11). GPC.EU Customer.
- Ibe, C., & Anyanwu, E. (2013). *Principles of tropical air conditioning*.
- Incropera, F., & Dewitt, D. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.
- ISSO. (2014). *Publicatie 39*.
- ISSO. (2016, 05 06). *Mediabank ISSO*. Opgehaald van Mediabank: <http://media.isso.nl/>
- Knoll, W., Wagenaar, E., & van Weele, A. (2002). *Handboek installatietechniek*. ISSO.
- Lienhard, J. (2008). *A Heat Transfer Textbook*.
- Luvata Söderköping AB. (2010). Coils for Windows.
- Morisot, O., Marchio, D., & Stabat, P. (2002). *Simplified model for the operation of chilled water cooling coils: Under nonnomial conditions*.
- Paassen, A. v. (2003). *Heat exchangers in heating ventilating and air conditioning (HVAC)*. Delft.
- Sensirion. (2006). *Dew-point calculation*.
- Springer. (2010). *VDI Heat Atlas*. Springer.
- Taal, A. (2012). *Toegepaste Energieleer Warmte- en stromingsleer*.
- Wang, Y., Cai, W., Soh, Y., Li, S., & Xie, L. (2002). *An Engineering Model of Coils and Heat Exchangers for HVAC System Simulation and Optimization*.
- Wesselingh, N. (1996). *Het koelen van lucht*.
- Yamaguchi, H., Miyata, M., & Oda, H. (2006). *Experimental Study of a Cooling Coil and the Validation of its Simulation Model for the Purpose of Commissioning*.

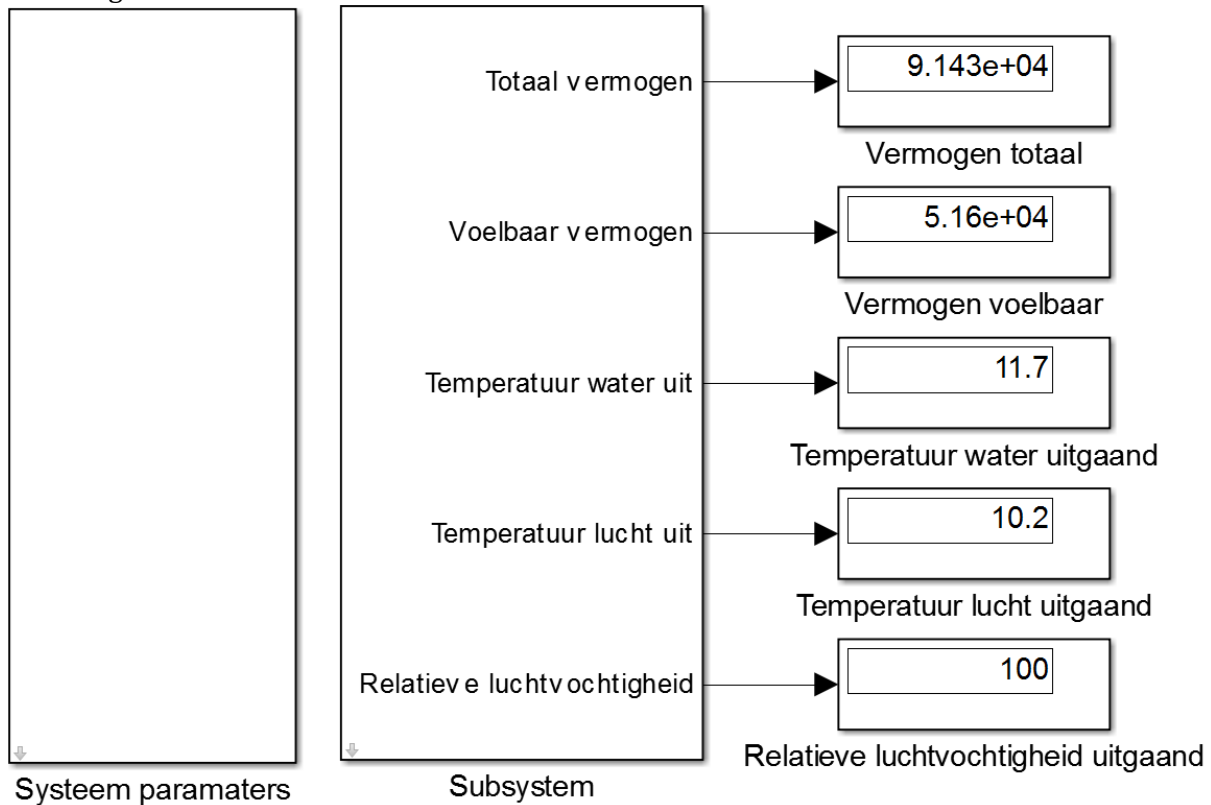
BIJLAGE I VALIDATIE MODEL 2

Start instelling:



Water		Evaporating	Steam	Condensing
Id Id: (Nameless)		Coil application Coil application: Coil		
Air Flow rate, m³/h: 10000 10000.0 Temperature in, °C: 28 28.0 Humidity in, %: 50 Temperature out, °C: 10.2 Humidity out, %: 100 Velocity, m/s: 2.6 Pressure drop, Pa: 182		Coil Type: QFCQ QFCQ External width, mm: 1400 External height, mm: 1000 Finned width, mm: 1200 Finned height, mm: 900 No of tube rows: 8 Fin pitch: 2 No of water passes: 10 Connection side: Undetermined Connection number: DN1x50		
Water Temperature in, °C: 6 6.0 Temperature out, °C: 11.7 Flow rate, l/s: 4 4.00 Water Velocity, m/s: 1.5 Pressure drop, kPa: 50		Ordering code and price QFCQ-_____-0_ X ... QFCQ-120-090-08-20-10-150 Price: On request. Number of coils: 1		
Capacity Capacity, kW: 100 96.0				

Instelling deellast:



Water		Evaporating		Steam		Condensing	
Id Id: (Nameless)				Coil application Coil application: Coil			
Air Flow rate, m³/h: 9000 9000.0 Temperature in, °C: 28 28.0 Humidity in, %: 50 Temperature out, °C: 8.7 Humidity out, %: 100 Velocity, m/s: 2.3 Pressure drop, Pa: 190				Coil Type: QFCQ QFCQ External width, mm: 1400 External height, mm: 1000 Finned width, mm: 1200 Finned height, mm: 900 No of tube rows: 12 Fin pitch: 2.5 No of water passes: 12 Connection side: Undetermined Connection number: DN1x50			
Water Temperature in, °C: 6 6.0 Temperature out, °C: 11.7 Flow rate, l/s: 4 4.00 Water Velocity, m/s: 1.2 Pressure drop, kPa: 39				Ordering code and price QFCQ-120-090-12-25-12-150 X ... QFCQ-120-090-12-25-12-150 Price: On request. Number of coils: 1			
Capacity Capacity, kW: 100 96.1							

BIJLAGE II OPDRACHTGEVER

In dit hoofdstuk staat een omschrijving van het afstudeer bedrijf en de organisatie hiervan.

BEDRIJFSOMSCHRIJVING

ISSO is het kennisinstituut van de installatiesector. Zij voorzien de bouwkolom in technische kennis over installaties. ISSO versterkt de installatietechniek in de bouwkolom, bevordert de eenduidigheid en maakt via normatieve richtlijnen de kwaliteit van installaties inzichtelijk.

ISSO streeft naar duurzame, veilige en kwalitatief hoogwaardige installaties. En naar installaties die voldoen aan wet- en regelgevingen en normen.

Zij voorzien in technische kennisbehoefte met (digitale) publicaties, digitale diensten en instructiebijeenkomsten voor alle partijen in de bouwkolom, met name installateurs. Zij richten zich met name op de disciplines werktuigkunde, sanitair, elektrotechniek en ICT.

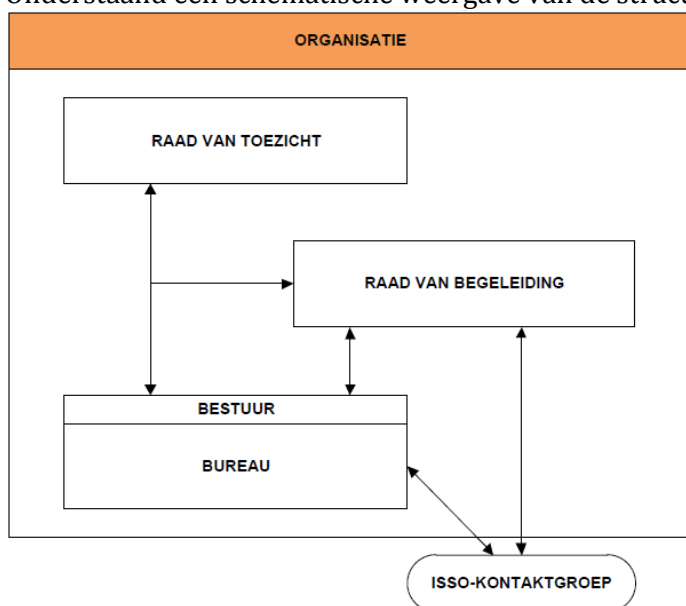
Voor een overzicht van, en informatie over recente projecten: [Werkvelden](#).

Bron: [Over ISSO](#)

ORGANISATIE

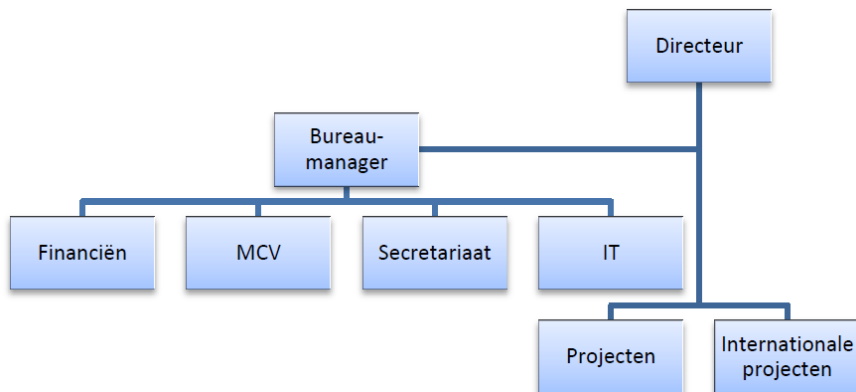
ISSO is een stichting met een bovenliggende Raad van Toezicht. De Raad van Toezicht wordt (technisch inhoudelijk) geadviseerd door de Raad van Begeleiding, onder wiens verantwoordelijkheid de onderzoeksprogrammering en kennisoverdracht resultaten tot stand worden gebracht. Ten behoeve van de begeleiding van de onderzoeken worden ISSO-kontaktgroepen ingesteld die de bepaalde studies en publicatievoorbereidingen daadwerkelijk begeleiden. Het bureau ISSO coördineert al deze werkzaamheden en realiseert de uitgave van de ISSO-publicaties.

Onderstaand een schematische weergave van de structuur van ISSO:



Zoals in bovenstaande constructie is aangegeven wordt het bestuur van ISSO onder toezicht gehouden door een Raad van Toezicht. Statutair gezien is de directie van ISSO hierdoor 'het bestuur' van de organisatie. De Raad van Toezicht houdt namelijk toezicht op het bestuur.

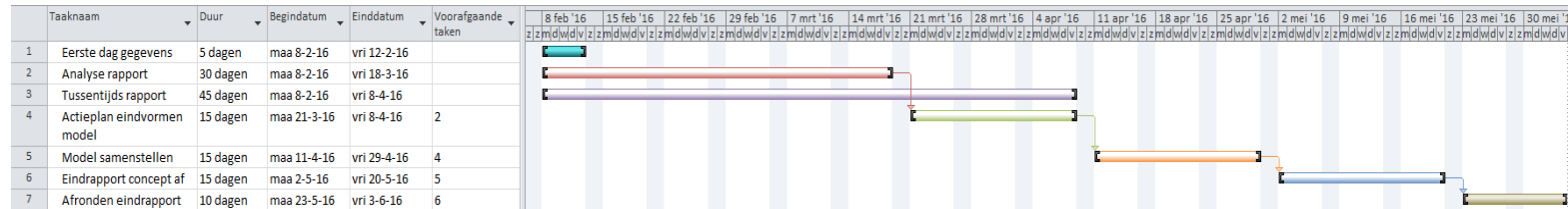
Het kwaliteitsmanagementsysteem is gericht op het bureau van ISSO. Onderstaand een schematische weergave van het bureau van ISSO:



BIJLAGE III PLANNING

Voor het voorspoedig verlopen van het afstudeer proces is er een grove planning gemaakt om dit project in goede banen te leiden.

FIGUUR 12; PLANNING OVERZICHT



De tussentijdse rapporten en/of verslagen worden geleverd in het eindrapport. Er wordt hiervoor geen aparte documentatie gemaakt.

Eerste dag gegevens:

De eerste dag gegevens zijn een set met gegevens bedoeld voor de afstudeercoach. Deze gegevens bevatten informatie over het bedrijf waar de stage gelopen wordt met manieren om contact op te nemen met de afstudeerbegeleider.

Analyse rapport:

Het analyse rapport, verwerkt in het format van het eindrapport, bevat achtergrondinformatie en informatie over benodigde gegevens voor het project. Deze gegevens zijn nodig om verdere beslissingen in het project te kunnen nemen en om de nieuwe modellen te kunnen maken. In dit rapport zal inzicht worden verkregen in de reeds bestaande formule(s) en bekende variabelen welke moeten worden gebruikt. Daarnaast zal er ook een kort onderzoek plaatsvinden over de variabelen en of deze niet in een eventueel andere vorm gegoten moeten worden.

Actieplan voor eindvormen model:

Op basis van het analyse rapport wordt een actieplan gemaakt voor de eindvormen van het model. Hierin wordt behandeld of er één of meer formule(s) komen en wat de aanpak is om tot het model te komen.

Coach bezoek:

Tweemaal gedurende de afstudeerstage is er een coach bezoek gepland. Dit bezoek dient ervoor om de coach in te lichten over de gang van zaken en voor de coach om te zien of de student nog op schema loopt.

Tussentijds rapport:

Het tussentijdse rapport, verwerkt in het format van het eindrapport, dient ervoor om de voortgang van het project te laten zien aan de afstudeer coach. Dit rapport bevat geen extra informatie, alleen de informatie en resultaten die tot op dat moment bereikt zijn.

Eindrapport concept:

Het eindrapport concept is de eerste versie van het eindrapport. Dit rapport dient als review materiaal en om te toetsen of alles wat in het rapport staat correct is voordat het ingeleverd wordt.

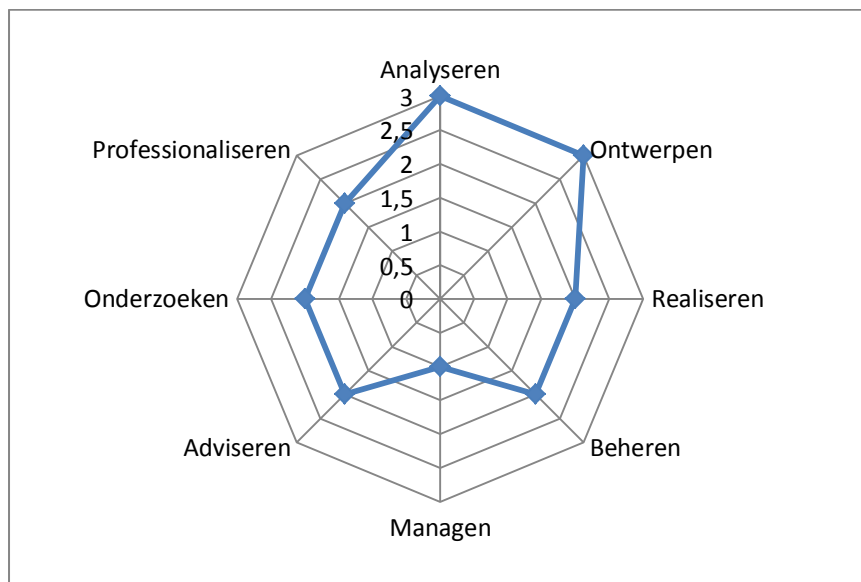
Eindrapport:

Het laatste rapport binnen de afstudeerstage. Hierin staat het volledige onderzoek met resultaten. Dit is het eindproduct, met eventuele modellen, van de afstudeerstage.

BIJLAGE IV COMPETENTIES

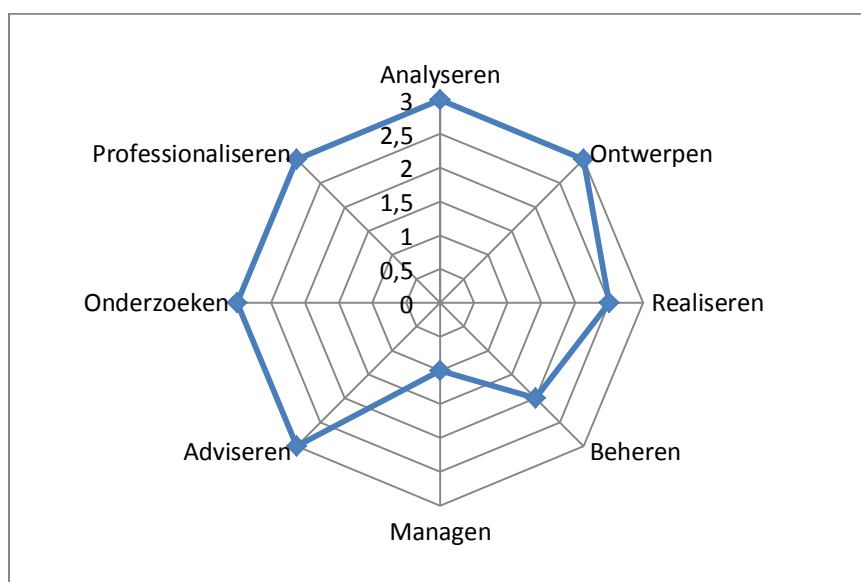
Tijdens het afstuderen moeten er ook een aantal competenties ontwikkeld worden. De competenties tot nu toe verworven in de opleiding zijn weergegeven in Figuur 13. Deze competenties moeten verder ontwikkeld worden tijdens het afstuderen.

FIGUUR 13; COMPETENTIES ONTWIKKELD TIJDENS OPLEIDING



Het competentieprofiel, weergegeven in Figuur 14, is het competentieprofiel te bereiken tijdens het afstuderen. Drie competenties zullen tijdens de stage verhoogd moeten worden naar niveau drie om het gewenste resultaat te bereiken.

FIGUUR 14; COMPETENTIES TE ONTWIKKELEN TIJDENS AFSTUDEREN



De eerste competentie, onderzoeken, heeft betrekking op de opdracht in verband met de benodigde onderzoeken naar de op het moment al bestaande formules. Deze formules zijn op wetenschappelijk niveau en er moet worden onderzocht wat er moet veranderen aan het model om deze in de gewenste vorm te krijgen. Daarnaast is het ook nodig om een onderzoek in te stellen naar de wensen van de uiteindelijke gebruiker van het model.

Professionaliseren is een competentie die in elke opdracht voorkomt. Dit houdt in dat het niveau van student naar ingenieur getild moet worden. De laatste stap in de studie moet gedaan worden om goed te kunnen functioneren in het bedrijfsleven.

De laatste competentie is realiseren. Deze competentie heeft invloed op het eindresultaat. Er moet uiteindelijk een product worden afgeleverd waarmee door de gestelde doelgroep gewerkt kan worden. Dit moet aan alle vooraf gestelde eisen voldoen.

BIJLAGE V BEHAALDE COMPETENTIES

In Bijlage IV Competenties zijn de te behalen competenties weergegeven. In deze bijlage zullen deze competenties worden aangehaald en bekeken of deze aan het einde van de afstudeerstage zijn behaald.

De competenties zullen per stuk worden behandeld, met als eerste de competentie Analyseren.

ANALYSEREN

Deze competentie is begonnen op niveau 3 en ook op dit niveau gebleven. Tijdens het schrijven van de scriptie heb ik erg veel gegevens voor ogen gekregen. Ik heb al deze gegevens aandachtig doorgelezen en verbanden gezocht tussen de verschillende bestaande modellen. De uiteindelijke verbanden hebben tot een groot deel van het resultaat van mijn onderzoek geleid, waarom ik denk deze competentie te hebben behaald.

Het onderzoek was 'ongestructureerd complex', 'onbekend complex' en 'zelfstandig':

Nadat ik de grenzen en eisen van het project op een rij had ben ik zelfstandig in de literatuur gedoken. Hiervoor heb ik geen handvatten aangereikt gekregen. Ik heb volledig zelfstandig naar literatuur gezocht en deze getoetst. Van te voren had ik alleen de eisen en wensen van het project en een globale kennis van warmtewisselaars, dit is snel uitgebouwd naar diepgaande kennis over koelbatterijen en een projectplan.

ONTWERPEN

De competentie ontwerpen is begonnen op niveau 3 en hier ook op gebleven. Er is met behulp van geleerde methodes te werk gegaan om de modellen op te zetten. Deze competentie is niet volledig aan bod gekomen tijdens het schrijven van de scriptie en daarom wordt hier ook verder niet over uitgeweid.

REALISEREN

Realiseren is gestart op niveau 2 en doorgestegen naar niveau 2.5. Tijdens de afstudeerstage zijn meerdere modellen opgezet en getest. De modellen voldeden uiteindelijk niet aan de vooraf opgestelde eisen maar er is structureel te werk gegaan om tot de modellen te komen.

Het realiseren van de modellen was 'ongestructureerd complex', 'onbekend complex' en 'onder begeleiding indien nodig'.

De context van de modellen was volledig onbekend bij de start van de afstudeerstage. Dit is met behulp van de analyse duidelijk gemaakt in de loop van het proces. De taak voor het maken van de modellen was volledig vrij op de vooraf gestelde eisen na, wat maakt dat de eerste twee modellen volledig zelfstandig gemaakt zijn. Later in de stage heeft mijn inhoudsdeskundige hints gegeven om verder te kijken naar andere onderzoeken welke ik zelf nog niet had gevonden. Er is uiteindelijk geen werkend product opgeleverd wat maakt dat deze competentie niet verder is gegroeid.

BEHEREN

Deze competentie is tijdens de stage niet aan de orde gekomen en is dus op gelijk niveau gebleven.

MANAGEN

Deze competentie is tijdens de stage niet aan de orde gekomen en is dus op gelijk niveau gebleven.

ADVISEREN

Het niveau van adviseren is van niveau 2 naar niveau 3 gestegen. De modellen zijn niet afgerond en de conclusie is getrokken dat het initiële plan niet mogelijk was. Met deze informatie is een advies uitgebracht om het onderzoek voort te zetten.

Het adviseren was 'ongestructureerd complex', 'onbekend complex' en 'zelfstandig':

Het laatste model is niet afgekomen en er is dus geen concreet bruikbaar product. Nadat bleek dat het laatste model niet af zou komen ben ik gaan kijken naar wat voor mogelijkheden er waren om het onderzoek voort te zetten. Tijdens dit proces ben ik gaan kijken naar mogelijke oplossingen en heb ik deze gedocumenteerd voor een vervolgonderzoek.

ONDERZOEKEN

De competentie onderzoeken is vanuit de opleiding op niveau 2 en ik ben naar niveau 3 gegroeid. Tijdens de afstudeerstage heb ik veel onderzoek gedaan naar bestaande modellen en de mogelijkheden om deze te gebruiken in mijn eigen modellen. Er is breed gezocht naar alle mogelijke modellen met hetzelfde onderwerp en daarnaast zijn de modellen getest op bruikbaarheid.

Het onderzoeken was 'ongestructureerd complex', 'onbekend complex' en 'zelfstandig':

Er zijn, alvorens het onderzoek gestart is, geen documenten aangereikt bij de start van het onderzoek. Deze documenten zijn zelf gezocht en bestudeerd. Dit maakte de taak zelf ongestructureerd en complex. Het onderzoek begon met een enkel document wat al snel is uitgroeit tot een groot aantal publicaties en documenten. Dit alles is volledig zelfstandig uitgevoerd.

PROFESSIONALISEREN

Als laatste competentie is de competentie professionaliseren. Tijdens de afstudeerperiode is er actief gewerkt aan de werktuigbouwkundige competenties. Sommige competenties zijn globaal bijgehouden en sommige zijn verbeterd.

Het totaal van de opdracht was 'ongestructureerd complex', 'onbekend complex' en 'zelfstandig':

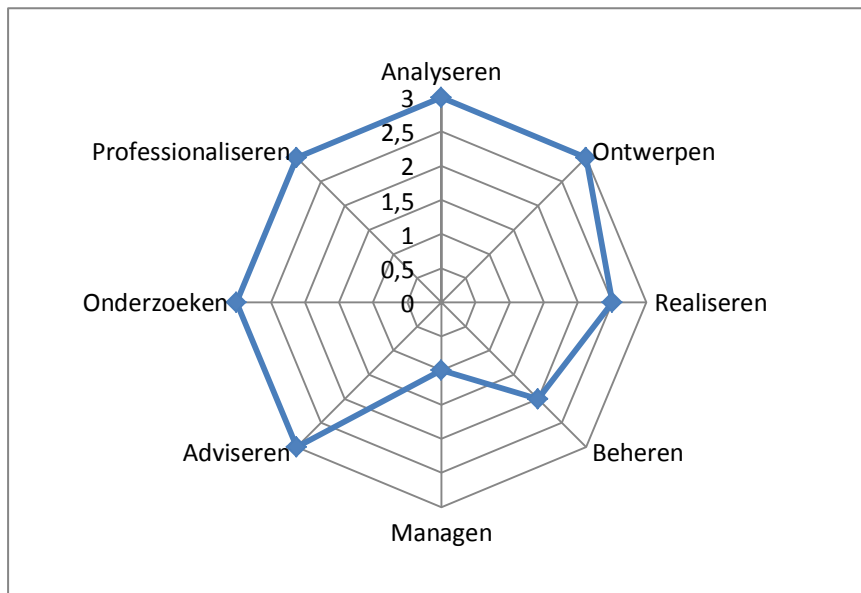
Het verwerven van nieuwe competenties was met de grootte van het project geen probleem. De opdracht was onbekend complex. Van tevoren had ik geen idee hoe moeilijk de opdracht uiteindelijk zou zijn. Tijdens de afstudeerstage is ook gebleken dat niet alleen de opdracht maar ook de taken in de opdracht erg complex waren. Dit was voor mij het eerste grote project wat ik individueel heb uitgevoerd en dit bracht veel uitdagingen met zich mee.

CONCLUSIE

De verwachtingen van de competenties zijn niet uitgekomen. Realiseren werd geschat op niveau 3 en adviseren op niveau 2. Omdat het niet is gelukt om een model te maken dat voldoet aan de eisen en er een vervolgonderzoek gedaan moet worden zijn deze twee competenties omgedraaid. Realiseren is gegroeid naar niveau 2.5 in plaats van de verwachte 3 en adviseren is gestegen naar niveau 3 in plaats van constant gebleven. Alle andere competenties zijn ontwikkeld zoals van tevoren verwacht.

Het competentieprofiel na het afstuderen ziet er als volgt uit:

FIGUUR 15; COMPETENTIES ONTWIKKELD TIJDENS AFSTUDEREN



BIJLAGE VI EVALUATIE

In deze bijlage wordt de afstudeerstage geëvalueerd. Er zullen een aantal situaties worden geschetst en wat algemene punten worden behandeld.

De stage is in zijn geheel goed verlopen. Ik heb veel geleerd over het onderwerp en over mijn manier van werken.

De eerste situatie waar ik het over wil hebben is de situatie met mijn inhoudsdeskundige. Mijn inhoudsdeskundige is een direct persoon, wat enige botsing met mijn persoonlijkheid gaf. In het begin van de periode was het zo dat wij allebei de 'kat uit de boom' aan het kijken waren. Voor mijn gevoel botste het in het begin heel erg maar ik had toch besloten dat ik deze opdracht graag bij hem wilde uitvoeren. In het begin ben ik zelfstandig veel bezig geweest en waren de gesprekken erg lastig. Tegen het einde van mijn afstudeerperiode ben ik hem frequenter gaan zien en verliep het contact een stuk vlotter en prettiger. In het begin zag ik het niet zitten om hem regelmatig te zien omdat ik goed bezig was en het contact erg stroef liep. Ik zou de volgende keer in zo'n situatie er toch naar streven eerder en frequenter af te spreken. Achteraf had ik waarschijnlijk meer sturing en informatie kunnen krijgen als ik in het begin vaker naar hem toe was gegaan.

Een tweede situatie was ook met mijn inhoudsdeskundige. In het begin van de afstudeerperiode was het project omkaderd en besproken. Nadat dit vast werd gelegd is dit nog een aantal keer aangepast omdat hij toch een ander idee erbij had dan ik dat persoonlijk had. Dit zou ik de volgende keer anders aanpakken. Ik zou de volgende keer direct met mijn opdrachtgever gaan zitten om alles goed door te spreken en samen tot een akkoord te komen over de inhoud van de opdracht.

Tegen het einde van de stageperiode had ik pas echt door hoe exact een warmtewisselaar in elkaar steekt. Dit is geleerd door veel onderzoek en door uitleg van mijn inhoudsdeskundige. Als ik dit eerder op deze manier door had gehad dan had ik waarschijnlijk verder gekomen in mijn onderzoek. Ik zou dan ook de volgende keer eerst nog dieper in de materie duiken om de werking volledig onder de knie te krijgen. Daar bereik ik tegen het einde van de zo'n periode meer mee.

Aan het einde van de stageperiode is het niet gelukt om het laatste model te testen en verder uit te werken. Dit was nadat de conclusie getrokken was dat een eenvoudig model simpelweg niet mogelijk was. Dit model is nog gestart om te kijken of deze nog aangepast kon worden naar een iets eenvoudiger model dan dat deze op dat moment was. Omdat het model niet af was tegen het einde van de afstudeerperiode gaf dit mij het gevoel dat het onderzoek nog niet af was. Toch, ondanks dat gevoel, zou ik dit de volgende keer weer doen. Dit omdat het erg leerzaam is om toch nog dieper in de stof te duiken, ook al geeft dit niet perse de gewenste resultaten.

Een laatste punt wat ik mee heb gekregen van mijn inhoudsdeskundige is het verschil tussen zijn manier van werken en mijn manier van werken. Waar ik veel lees en probeer alles te begrijpen duikt hij meteen in de formules en probeert zo de materie te begrijpen. Ik denk dat mijn manier van werken meer tijd en energie kost. Ik heb hier van geleerd en wil dit voor de toekomst meenemen.

BIJLAGE VII MOLLIER DIAGRAM

