

Door **Ir. R.T.M. (Rob) ter Steeg MTD**

Projectleider / onderzoeker Afdeling Koude, Warmte en Installaties TNO Bouw en Ondergrond Apeldoorn

Artikel naar aanleiding van de gehouden presentatie op de KNVvK themadag 'Installaties met kleine koudemiddelinhoud' van 11 februari 2010

MiniRef: koudemiddelreductie bij bestaande systemen

Miniref: reduction of refrigerant charge at existing systems

Het MiniRef was een Europees programma gericht op de reductie van de koudemiddelinhoud van bestaande systemen, dat werd uitgevoerd in de jaren 2006-2008. Doel was het reduceren van de koudemiddelinhoud zonder concessies te doen aan koelprestaties. Dit artikel beschrijft de resultaten verkregen met een tweetal testsystemen: een systeem dat gebruik maakt van het koudemiddel R507 en een dat gebruik maakt van het koudemiddel R717.

De R507 referentie-installatie is een state-of-the-art-systeem met een koelvermogen van 50 kW. In verband met de hoge kosten voor het maken van prototype microchannelwarmtewisselaars is dat tijdens de uitvoering teruggebracht tot 12,5 kW. Gevolg van deze wijziging is dat de compressor en de leidingen overgedimensioneerd waren.

figuur 1 Krachtopnemers geplaatst onder de condensor.



Koudemiddelinhoud en verdeling

Om een beeld te krijgen van de mogelijke besparingen is geprobeerd de koudemiddel inhoud van het systeem zo goed mogelijk in kaart te brengen. Daarvoor werden vaten voorzien van vloeistofniveau-opnemers. In volumes

met een enkele fase (gas of vloeistof) is vervolgens de koudemiddelinhoud berekend op basis van het interne volume en de dichtheid bij de gemeten druk en temperatuur. In de condensor en verdampers, waar het koudemiddel zowel in gas als in vloeistof fase voorkomt, zijn krachtopnemers (zie figuur 1) geplaatst, zodat continu het gewicht kon worden gemeten. In de praktijk wordt de nauwkeurigheid van deze manier van meten beperkt door onder andere het relatief geringe gewicht van het koudemiddel ten opzichte van de warmtewisselaar (vooral bij DX) en de opwaartse kracht van de ventilatoren. De meetnauwkeurigheid was daarom beperkt. Als er nauwkeurigere metingen nodig waren, dan werden de condensor en verdampers geïsoleerd van de rest van het systeem en het koudemiddel afgetapt en gewogen.

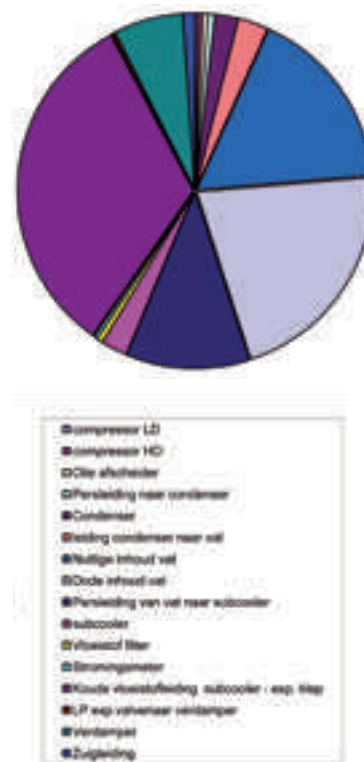
Op grond van de metingen en berekeningen van de vloeistofverdeling in het systeem werd een koudemiddelinhoud van 52 kg voorspeld. Uiteindelijk is 41,5 kg afgetapt.

Koudemiddel in leidingen

De koudemiddelverdeling in het oorspronkelijke systeem is weergegeven

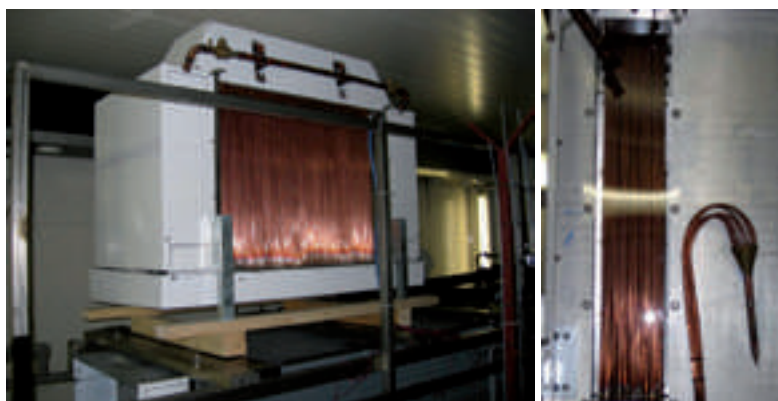
in figuur 2. Duidelijk is te zien dat de vloeistofleidingen een relatief groot gedeelte van het koudemiddel bevatten.

Figuur 2: koudemiddelverdeling in het oorspronkelijke R507 systeem.





Figuur 3: aluminum warmtewisselaar.



Figuur 4: warmtewisselaar opgebouwd uit koperen pijpen.

Andere componenten met veel koudemiddelinhoud zijn het voorraadvat, de verdamer en het vat dat voor de subkoeler is geplaatst. De inhoud van het voorraadvat is relatief eenvoudig te reduceren. Er is relatief veel koudemiddel aanwezig onder de aftapaansluitingen in het voorraadvat. Deze ‘dode’ vloeistof heeft geen enkele functie voor de werking van het systeem. De inhoud van de verdamer kan worden teruggebracht door over te gaan op alternatieve constructies voor de verdamer. De subkoeler is niet noodzakelijk voor het functioneren van het systeem en onderkoeling zou ook op een alternatieve wijze gerealiseerd kunnen worden. Een aantal wijzigingen voor het reduceren van de koudemiddelinhoud is vervolgens uitgevoerd op de zendinstallatie.

Nakoelen in separaat circuit

In de referentiesituatie wordt de vloeistof uit het voorraadvat nagekoeld in een separaat circuit dat geïntegreerd is in de condensor. Dit is gunstig voor het rendement en koelvermogen, maar ongunstig voor de koudemiddelinhoud, en de vloeistoftemperatuur zal nooit lager worden dan de buitentemperatuur. In de MiniRef-situatie is de onderkoelrus vervangen door een pijp-in-pijpzuiggaswisselaar, waarbij de uit het vat afkomstige vloeistof gekoeld wordt door de koudemiddelstroom uit de verdamer. Omdat de vloeistofinspuiting in de verdamer geregeld wordt op

de gastemperatuur aan de uittrede van de warmtewisselaar, verdampert er in de interne warmtewisselaar nog koudemiddel. Hierdoor kan de te verdampen vloeistof maximaal nagekoeld worden. Deze condities zijn zeer gunstig voor het toepassen van microchannel warmtewisselaars, omdat er dan minder gas ontstaat tijdens de expansie, waardoor de koudemiddelverdeling in de verdamer minder kritisch wordt.

In de situatie met een interne warmtewisselaar wordt er echter minder warmte afgegeven aan de omgeving en daardoor is het koelvermogen kleiner en het rendement lager.

Alternatieve warmtewisselaars

Om de hoeveelheid koudemiddel te beperken zijn twee alternatieve warmtewisselaars geprobeerd, namelijk een

aluminium microchannel warmtewisselaar (zie figuur 3) en een warmtewisselaar opgebouwd uit koperen buisjes (zie figuur 4). De microchannel levert een aanzienlijke reductie van de koudemiddelinhoud, maar brengt een aantal nadelen met zich mee die nader zullen worden bekeken tijdens de beschrijving van het R717-systeem verderop.

Resultaten MiniRef R507

De resultaten verkregen bij het R507-systeem zijn weergegeven in tabel 1. Duidelijk is te zien dat er bij de warmtewisselaars een grote winst is te boeken, maar dat het effect op de totale koudemiddelinhoud van het systeem beperkt blijft. Door het wegvallen van de onderkoeler daalt de koelcapaciteit en stijgt het opgenomen vermogen.

tabel 1 Reductie koudemiddel R507 MiniRef

	REFERENTIE	MINIREF	(% reductie)
R507 Massa (totaal)	41,5 kg	30,3 kg	27 %
R507 Massa (verdamer)	3,3 kg	0,1 kg	97 %
R507 Massa (condensor)	1,1 kg	0,1 kg	81 %
Capaciteit	14,4 kW	12,0 kW	17 %
Gevraagd vermogen.	9,4 kW	9,9 kW	-5 %

R717 Ammoniak systeem

Het tweede systeem dat is gebruikt voor het experimenteren was een 50 kW tweetrapspompsysteem met een open tussenkoeler. Zie figuur 5. Dit was een systeem dat is uitgelegd voor een optimaal rendement, maar door de aanwezigheid van twee grote vaten ook een grote koudemiddelinhoud heeft.

Figuur 5: het ammoniaksysteem zoals gebruikt in de experimenten.



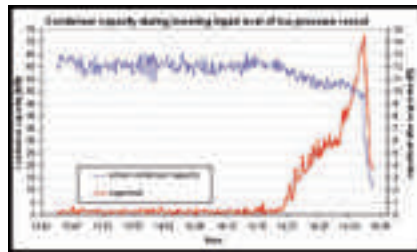
Ammoniakstelsysteem

Bij het ammoniakstelsysteem is de minimaal benodigde koudemiddelinhoud bepaald door het vloeistofniveau in de vaten stapsgewijs te verlagen. In het lagedrukvat leidt het verlagen van het vloeistofniveau tot stabiliteitsproblemen met de vloeistofpomp, die aanvankelijk in beperkte mate opgevangen kunnen worden met toerentalaanpassingen van de pomp. In figuur 6 is het verloop van de condensorcaciteit en de oververhitting die optreedt na de verdamper, weergegeven. Hieruit blijkt dat de condensorcaciteit aanvankelijk geleidelijk afneemt op het moment dat er oververhitting optreedt. Uiteindelijk valt het debiet geheel weg, omdat de pompwerking instabiel wordt. Het minimum is bepaald door koudemiddel toe te voegen tot de prestaties weer optimaal waren.

Koudemiddelverdeling

De koudemiddelverdeling is weergegeven in figuur 7: deze is ook bepaald door het berekenen van volumes en door ge-

deeltes van het systeem af te tappen. In vergelijking met het R507-systeem is de inhoud van de leidingen en de compressor hier een stuk kleiner. Meer dan de helft van de koudemiddelinhoud wordt bepaald door de aanwezige voorraadvaten. Bijna een kwart door de verdamper. Bij dit systeem zijn de verdamper en voorraadvaten daarom in hoge mate bepalend voor de koudemiddelinhoud.



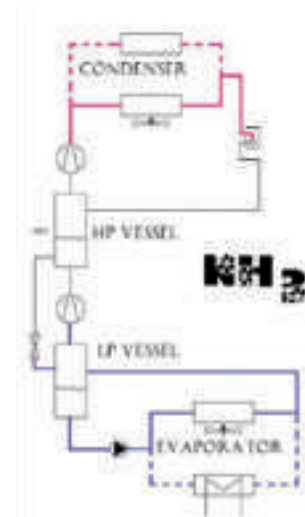
Figuur 6: verloop van de condensorcaciteit bij aftappen van het koudemiddel.

Figuur 7: koudemiddelverdeling voor het R717-referentiesysteem.



- Zuig Compressor HD
- Pers compressor HD
- Olie afsluider HD
- Gasliding HD naar condenser
- Condenser
- Condenser naar vat
- Hogedruk vloeistof vlotter
- Van HD vloeistofvlotter naar MD vat
- MD vat
- Zuigleiding MP vat- HD compressor
- Compressor LD zuig
- Compressor LD pers
- Lagedruk olieafsluider
- Perleiding LD compressor naar MD vat
- Leiding van MP vat naar expansieklep
- Strömingsmeter MD
- Leiding Expansieklep LD vat
- LD vat
- Zuigleiding LD vat naar compressor
- Vloeistof pomp
- Leiding vloeistof pomp naar verdamper
- Strömingsmeter LD
- verdamper
- Leiding verdamper naar LD vat

Figuur 8: herontwerp van het systeem om tot een lagere koudemiddelinhoud te komen.



Vaten

De in het systeem aanwezige vaten bieden de beste mogelijkheden om de koudemiddelinhoud terug te brengen. Het hogedrukvat, dat tevens de functie heeft van tussenkoeler en subkoeler, wordt vervangen door een veel compactere, dus koudemiddel reducerende Q-plate warmtewisselaar. Deze dient zowel als tussenkoeler en als vloeistofkoeler. De warmte die bij deze processen vrijkomt, wordt opgenomen door het verdampen van een deel van de condensorvloeistof op tussendrukniveau. Omdat er voor warmte-uitwisseling met een platenwarmtewisselaar temperatuurverschillen nodig zijn en omdat het gas niet volledig teruggekoeld kan worden naar 0 K oververhitting, zal dit systeem op zijn best de efficiëntie van een open systeem kunnen benaderen.

Het lagedrukvat wordt vervangen door een vat met een kleinere diameter, maar met een gelijke (vloeistof)hoogte. De kleinere diameter geeft een kortere verblijftijd en hogere snelheden, waardoor

er hogere eisen worden gesteld bij het gebruik als afscheider.

Microchannel verdamper

Aanvullend aan de bovengenoemde maatregelen zijn de verdamper en condensor vervangen door aluminium microchannel warmtewisselaars. Ondanks de compacte bouw en de goede warmteoverdracht van microchannel warmtewisselaars worden deze voor verdampers nog maar zelden gebruikt. Dit komt omdat verdampertoepassing van een microchannel warmtewisselaar door de benodigde vloeistofverdeling, rijpobouw en rijpwaterafvoer wezenlijk complexer is dan condensortoepassingen.

Tijdens de experimenten die werden uitgevoerd kwamen deze aspecten van een microchannel verdamper duidelijk naar voren:

- het bleek dat het in DX situaties zeer lastig is om met een tweefasemengsel een goede koudemiddelverdeling te realiseren. Daardoor is niet het gehele oppervlak van de verdamper 100 procent effectief. In figuur 9 is een duidelijk voorbeeld te zien van de ongelijke vloeistofverdeling; het verdamperoppervlak is onregelmatig berijpt
- condenswater wordt vastgehouden in de fijne structuur van de vinnen
- rijp treedt vooral op aan de luchtintredezijde van de verdamper. De rijp groeit aan op het oppervlak waar de lucht de verdamper binnentreedt. Een geringe rijphoeveelheid kan zo de luchtstroom snel blokkeren.

Resultaten MiniRef R717

Door deze maatregelen is een grote koudemiddelinhoudreductie gerealiseerd, zoals weergegeven in tabel 2. Te zien is ook dat de tussenkoeler, die nooit de efficiëntie van een open tussenkoeler kan halen, een geringere subkoeling geeft. Daardoor neemt het gevraagde elektrisch vermogen toe.

tabel 2 Overzicht resultaten R717 systeem miniref.

Figuur 9: dichtvriezen van een microchannel verdamper.



Bevindingen

Het op industriële schaal testen van verschillende koudemiddelarme configuraties heeft vele interessante bevindingen opgeleverd. Sommige bevindingen bevestigen zaken die al langer bekend waren, andere bevindingen bevatten nieuwe aspecten. De volgende bevindingen betreffende algemene ontwerpregels voor koelsystemen kwamen aan het licht:

- Microchannel warmtewisselaars zijn door hun fijne structuur zeer compact

en licht en hebben een hoge capaciteit. Ze zijn echter wel gevoeliger voor het luchtzijdig verstopping door water en rijpvorming.

- Het gebruik van een separate externe vloeistofkoeler levert een goed rendement, maar verhoogt de koudemiddelinhoud. De verhoging in koudemiddelinhoud kan beperkt worden door het vloeistofbuffervat dicht bij de condensor te plaatsen. Het buffervat dient in de schaduw geplaatst te worden en de verbetering in prestaties is afhankelijk van het klimaat ter plekke.

Koudemiddelreductie

Met betrekking tot koudemiddelreductie kwamen de volgende zaken naar voren:

- Vloeistofleidingen kunnen een significante invloed hebben op de koudemiddelinhoud. Beperking van leidinglengten is daarom belangrijk.
- Een zeer groot gedeelte van de vloeistof bevindt zich in voorraadvaten en afscheiders. Vatvolumes dienen beperkt te blijven. Het verdient daarom aanbeveling om alleen verticaal georiënteerde voorraadvaten te gebruiken, het vatvolume te minimaliseren en dode vloeistofzones te voorkomen.
- Overmatige koudemiddelvulling levert geen energetische voordelen. De inhoud dient wel voldoende te zijn om schom-

NH3	Referentie installatie	MiniRef
T_0 [°C]	-28	-27,8
T_1 [°C]	-0,1	-0,2
T_{in} [°C]	35,7	34,2
Subkoeling condensor [K]	1,3	-0,2
Subkoeling tussenkoeler	35,8	11,1
Q_c [kW]	60,7	67,2
Q_e [kW]	40,5	43,5
$P_{\text{elektrisch}}$ [kW]	29,6	33,4
COP	1,37	1,3
Koudemiddelinhoud [kg]	56,6	16,3
Inhoud condensor [kg]	3,9	
Inhoud verdamper [kg]	13,7	

melingen in condities op te vangen.

- Een koelsysteem bevat gewoonlijk vele locaties waar vloeistof achterblijft. Dit verdient extra aandacht bij ontwerp en installatie.

Specifieke bevindingen MiniRef

De volgende bevindingen specifiek voor MiniRef kwamen naar voren:

- Het is gebruikelijk dat fabrikanten van condensoren en verdamper alleen het volume van de buizen opgeven en niet van de headers. Zeker bij microchannels, met relatief grote headers, geeft dit een vertekend beeld.
- Het gebruik van een actiefgekoelde interne warmtewisselaar (waarbij de oververhittingsensor is geplaatst tussen de interne warmtewisselaar en de compressor) maakt de vloeistofverdeling in de verdampers minder kritisch. Als er dan vloeistof uit de verdampers komt, dan hoeft de expansieklep niet direct te sluiten.
 - * Deze actief gekoelde interne warmtewisselaar maakt een installatie minder gevoelig voor ondervulling.
 - * De actief gekoelde interne warmtewisselaar zorgt voor reductie van flashgas na het expansieventiel, maar dit alleen is onvoldoende om een goede koudemiddelverdeling te realiseren bij microchannel verdamper.
- Microchannel verdamper dienen korte circuits te hebben om overmatige drukval te voorkomen.
- De aanwezigheid van olie heeft geen problemen opgeleverd in de microchannel verdamper bij vriestoeepassingen. Dit is voornamelijk te verklaren doordat de verdamper nat zijn toegepast (natte retour uit verdampers) zodat olie goed meegenomen wordt.
- De bestaande aluminium microchannel verdamper zijn door hun fijne aluminium vinctuur niet geschikt voor verdamper toepassingen onder 0°C. De standtijd is door de snelle lokale berijping gering.

Vervolg MiniRef bij TNO

Voor TNO is de reductie van koudemiddelinhoud een belangrijke onderzoeksrichting. Doel van de koudemiddelreductie is het beperken van de schadelijke effecten van koudemiddelen en kostenre-

ductie door systeemverkleining.

De bevindingen uit het MiniRef zijn bij TNO gebruikt om de onderzoeksrichting te bepalen. Op dit moment vindt er bij TNO onderzoek plaats naar het gebruik van microchannel warmtewisselaars als verdampers. Daarnaast wordt gekeken naar mogelijkheden om de afscheiding van gas in kleine vaten te verbeteren.

Samenvatting

Het MINIREF programma zoals uitgevoerd in de jaren 2006-2008 was een Europees programma gericht op de reductie van de koudemiddelinhoud van bestaande systemen zonder het koelendement aan te tasten. Dit artikel beschrijft de resultaten verkregen met een tweetal testsystemen: namelijk een systeem dat gebruik maakt van het koudemiddel R507 en een dat gebruik maakt van het koudemiddel R717.

De belangrijkste bevindingen waren dat de grootste hoeveelheid koudemiddel bevindt zich gewoonlijk in leidingen en opslagvaten; de verdampers bevat relatief veel koudemiddel en de condenser bevat weinig koudemiddel; bij toepassing van microchannel warmtewisselaars als verdampers zijn slechte koudemiddelverdeling, slechte drainage van condens en voortijdig dichtvriezen problematisch; indien de minimaal vereiste hoeveelheid koudemiddel aanwezig is heeft volumevergroting van het koudemiddel geen rendementsverbetering tot gevolg; interne warmtewisselaars en subkoelers kunnen een aanzienlijke koudemiddelinhoud hebben, maar gezien de rendementsinvloed kunnen deze niet zondermeer worden weggelaten.

Summary

The MINIREF program as performed from 2006-2008 was a European program aimed at reduction of refrigerants of existing systems without affected the cooling efficiency.

This article describes the results as obtained using two test systems: a system that uses refrigerant R507 and a system that uses refrigerant R717,

The most important findings are: the majority of the refrigerant is usually located in tubing and storage vessels; the evaporator contains comparatively much refrigerant and the condenser contains little refrigerant; microchannel heat exchangers applied as evaporators suffer from a bad refrigerant distribution, retention of condensed water, and premature freezing; as long as the minimum required refrigerant is present, increasing the refrigerant volume does not yield efficiency improvement; internal heat exchangers and sub coolers may contain a substantial refrigerant volume, but considered their effect on efficiency; these components cannot be omitted without further consequences.

Meer informatie:

TNO Bouw en Ondergrond
Afdeling koude, Warmte en Installaties
Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn
T: 0888-662256 (direct)
F: 0888-662248
E: rob.tersteeg@tno.nl