

# Koudemiddelen voor Industriële Koeling

## 1 Inleiding

Vanuit een ver verleden tot op het einde van de negentiende eeuw werden om te koelen ijsblokken toegepast die men tijdens de winter verzamelde en in ondergrondse ijskelders opsloeg. Tengevolge van de voortschrijdende industrialisatie werd de permanente behoefte aan koeling zo groot, vooral bij brouwerijen, dat er gezocht werd naar middelen waarmee kunstmatig koude opgewekt kon worden. In 1810 werd de eerste koelinstallatie gebouwd die ijs produceerde door ether te laten verdampen. Reeds in 1834 werd de eerste compressiekoelmachine in bedrijf gesteld die met een (thermodynamische) kringloop functioneerde.

Het medium dat de thermodynamische kringloop in een koelmachine doorloopt, wordt het koudemiddel genoemd. Deze kringloop omvat in grote lijnen het comprimeren, condenseren, ontspannen en verdampen van het koudemiddel. Bij het selecteren van het koudemiddel spelen diverse factoren een rol. De belangrijkste zijn de thermodynamische eigenschappen van het koudemiddel en de kosten van de installatie en het energiegebruik. Sinds enige decennia vormt ook de invloed van koudemiddelen op het milieu een doorslaggevende factor op deze keuze. Daarbij spelen zowel emissies door lekkages als tengevolge van het energiegebruik een rol.

In de begintijd van de industriële koeltechniek werden als koudemiddel vooral ammoniak, methylchloride, zwaveldioxide en koolzuur toegepast. In de loop van de tijd werd zwaveldioxide om zijn geur vervangen door methylbromide dat echter zeer giftig is en daarom niet lang werd gebruikt. Koolzuur verdween uit het zicht omdat dit middel zeer hoge drukken vereist. Daarmee is van de klassieke koudemiddelen alleen nog ammoniak overgebleven, alhoewel de laatste tijd de belangstelling voor koolzuur weer toeneemt.

Om niet-giftige en reukloze alternatieven voor de klassieke koudemiddelen te vinden, zijn in de jaren '30 de CFK's (chlorofluorkoolwaterstoffen) en de HCFK's (hydrochlorofluorkoolwaterstoffen) ontwikkeld en die hebben ammoniak en koolzuur deels van de markt verdrongen. De CFK's en HCFK's

werden algemeen toegepast in de industriële en semi-industriële koeltechniek, maritieme en comfort airconditioning en voor huishoudelijke apparaten. Alleen de hoeveelheid CFK's bij de productie van schuimmatrassen en als drijfgas in spuitbussen was al 15 maal zo hoog als toegepast in de koudetechniek.

Lang daarna werd pas duidelijk welk effect de lekkage van CFK's en HCFK's op het milieu had door aantasting van de ozonlaag en versterking van het broeikas effect.

Vanwege dat effect zijn met het Montreal Protocol in 1987 wereldwijd afspraken gemaakt om deze stoffen te vervangen door chloorvrije koudemiddelen waarvan de invloed op de ozonlaag nul is en het broeikas effect minimaal.

Tot de belangrijkste koudemiddelen, die ingaande 1994 onder een bijna wereldwijd verbod vallen (de ontwikkelingslanden kunnen een uitzondering vormen), worden de CFK's gerekend.

Het vervangingsprogramma voorziet verder in een gefaseerde reductie van HCFK's met als doel een wereldwijde vervanging vóór 2030 (in ontwikkelingslanden 2040).

In Europa streeft men er naar om na 2015 de beschikbaarheid van HCFK's te beëindigen. De Europese Unie heeft in Document 500PC0096(2) de volgende besluiten genomen die relevant zijn voor de chemische industrie:

- per 1 januari 2001 is het niet meer toegestaan om CFK's te verhandelen of te gebruiken;
- per 1 januari 2001 is het niet meer toegestaan om HCFK's toe te passen in nieuwe koel- en klimaatregelingsapparatuur. Met uitzondering van apparatuur voor warmtepompen, waarvoor een uiterste datum van 1 januari 2004 geldt.

Ook in Nederland geldt dus dat na 1 januari 2001 in nieuwe installaties geen R22 (een HCFK :  $\text{CHClF}_2$ ) meer toegepast mag worden. In *tabel 1* wordt een overzicht gegeven van de CFK's en HCFK's die als koudemiddel onder de genoemde regelingen vallen.

*Tabel 1* Overzicht van uitgefaseerde CFK's en HCFK's

Koudemiddelstelling	ODP (R11=1)	Formule of samenstelling	GWP ( $\text{CO}_2 = 1$ )
<b>CFK chlorofluorkoolwaterstoffen</b>			
R11		$\text{CCl}_3\text{F}$	1,0
R12		$\text{CCl}_2\text{F}_2$	0,92 - 1,0
R502		R22/R115	0,33
<b>HCFK hydrochlorofluorkoolwaterstoffen</b>			
R22		$\text{CHClF}_2$	0,055
R401		R22/R152A/R124	0,03
R402		R22/R125/R290	0,03
R403		R22/R218/R290	0,03
R409		R22/R124/R142B	0,05

Deze brochure beoogt op basis van de huidige kennis en regels inzicht te verschaffen bij het selecteren van een koudemiddel voor nieuwe compressiekoelinstallaties. Tevens zal aangegeven worden welke koudemiddelen geschikt zijn om in bestaande installaties uitgefaseerde koudemiddelen te vervangen. Na een overzicht gegeven te hebben van beschikbare chloorvrije koudemiddelen, worden de eigenschappen van enige beschikbare koudemiddelen met elkaar vergeleken. Ook wordt aandacht geschonken aan het energie-efficiency-aspect van het gebruik van diverse koudemiddelen.

## 2 Nomenclatuur koudemiddelen

De koudemiddelen hebben een R-aanduiding die officieel wordt uitgegeven na een geslaagde test door de American Society of Heating, Refrigeration and Airconditioning Engineers (ASHRAE). Zie voor meer details de ASHRAE Standard Nr 34.

Voor enkelvoudige koudemiddelen geeft deze aanduiding de molecuulstructuur weer.

Zo bestaat bijvoorbeeld R134a uit:

1 (+1)	3 (-1)	4
2 koolstof- atomen	2 waterstof- atomen	4 fluor- atomen

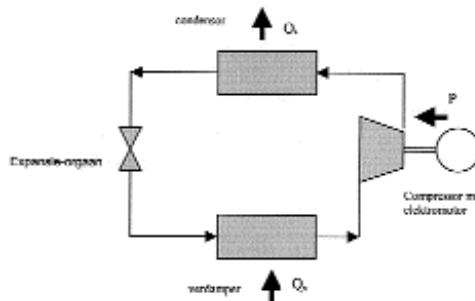
Dit geldt niet voor mengsels (blends). Wel is herkenbaar of het azeotropen, semi-azeotropen dan wel zeotropen betreft. Alle azeotropische mengsels zijn ondergebracht in de R5-serie, en de semi-azeotropische en de zeotropische mengsels in de R4-serie. Een letter achter het serienummer geeft aan dat de mengverhouding van de componenten verschilt, zoals bij R407A, R407B en R407C.

Bij de menggassen (blends) treedt bij verdamping vaak een kooktraject (temperature glide) op. Indien dit niet te verenigen is met het te koelen proces zal een enkelvoudig koudemiddel of een azeotroop menggas geselecteerd dienen te worden met een glide van circa 0 K.

In tabel 2 zijn de nu beschikbare chloorvrije HFK's en natuurlijke koudemiddelen met hun R-nummers gegeven.

## 3 Koelmachinekringloop

Het werkingsprincipe van een koelmachinekringloop berust op het afwisselend condenseren en verdampen van het koudemiddel, waarbij tevens de druk wisselt. Zie figuur 1.



Figuur 1 Kringloopkoelmachine

Omdat de verdamp(er) zich stroomafwaarts van het expansie-orgaan en vóór de compressoraanzuiging bevindt, heerst er in de verdamp(er) een relatief lage druk. Hierdoor kan het koudemiddel verdampen onder gelijktijdige opname van warmte uit de omgeving. De omgeving is in dit geval de ruimte of het product dat gekoeld moet worden. De verdikte pijlen geven de energie- of warmtestromen naar of van de omgeving aan. Het verdampte koudemiddel wordt door de compressor weer op een hogere druk (en temperatuur) gebracht. Vervolgens wordt die damp in de condensor gecondenseerd, waarbij de vrijkomende warmte overgedragen wordt aan een koelmedium (meestal water of omgevingslucht). In een expansieorgaan wordt het vloeibare koudemiddel op de verdampingsdruk gebracht. Daarmee wordt de kringloop van het koudemiddel weer gesloten.

Om het energetisch rendement van een koelinstallatie aan te geven wordt bij voorkeur gesproken van Coefficient of Performance (C.O.P.) of koudefactor. Deze wordt aangegeven als:

$C.O.P. = Q_y / P$ , waarin:

$Q_y$  = koelvermogen van de koelinstallatie in kW

$P$  = opgenomen (elektrisch) vermogen in kW

De totaal naar de omgeving af te voeren energie  $Q_k = Q_y + P$  in kW.

## 4 Selectiefactoren

Bij het selecteren van een geschikt koudemiddel zullen in het algemeen de volgende factoren een rol spelen:

- thermodynamische en fysische eigenschappen;
- milieueffecten;
- kosten van het koudemiddel, koelmachine en energiegebruik.

Om de selectie van een geschikt koudemiddel te vereenvoudigen wordt in de industriële koeltechniek uitgegaan van de volgende indeling van de werkgebieden:

**Tabel 2 Overzicht toepasbare koudemiddelen**

Koudemiddel	Formule of Samenstelling	M g/mol	t <sub>1</sub> °C	Δt <sub>s</sub> K	P50 bara	t <sub>26</sub> °C	ODP R11=1	GWP CO <sub>2</sub> =1	Vervanging Voor	Toepassing
<b>Chloorvrije fluorokoolwaterstoffen (HFK)</b>										
R23	CHF <sub>3</sub>	70	-82	0	1	1	0	12100	R13 (R503)	
R32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	52	-52	0	42	42	0	580	R12, R22 in blends	
R134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	102	-26	0	12	79	0	1300	R12, R22 in blends	Airco, warmtepomp, comm.koeling
R125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	101	-48	0		51	0	3200	R12, R22 in blends	
R143A	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	84	-48	0		56	0	4400	R12, R22 in blends	
R152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	66	-24	0		85	0	140	R12, R22 in blends	
R227ea	CF <sub>3</sub> CHF CF <sub>3</sub>	170	-16	0		96	0	3300	R114	Airco, warmtepomp, ORC
<b>Chloorvrije (HFK) blends</b>										
R404A	R143A/125/134a	98	-46	0,7	21	55	0	3750	R502	Comm.koeling en transport
R407A	R32/125/134a	90	-42,3	6,6		56	0	1920	R502	Comm.koeling
R407B	R32/125/134a	103	-45,2	4,4		54	0	2560	R502	Comm.koeling en transport
R407C	R32/125/134a	86	-40	7,1	21	60	0	1610	R22	Grote koelinst., airco, warmtepomp
R410A	R32/125	73	-52,4	0,2	29	43	0	3750	R22, R13B1	Comm.koeling, transport (hoge druk!)
R507	R143A/125	99	-46,5	0		55	0	3800	R502	Comm.koeling en transport
R508A	R23/116		-86	0		-3	0	n.v.t.	R503	
R508B	R23/116		-88	0		-3	0	n.v.t.	R503	
R417A	R125/134a/600A		-43	5,6		68	0	2120	R22	
Isceon 89	R125/218/290		-55	4,0		50	0	3090	R13B1	
<b>Natuurlijke koudemiddelen</b>										
R170	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (butaan)	30	-89	0		3	0	3	R13, R503	Installaties met kleine inhoud
R290	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (propan)	44	-42	0	16	70	0	3	R22, R502	Installaties met kleine inhoud
R600A	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (isobutaan)	58	-12	0		114	0	3	R114, R12B1	Huishoud en install. met kleine inhoud
R717	NH <sub>3</sub> (ammoniak)	17	-33	0	18	60	0	0	R22, R12B1	Grote koelinst., indirecte koeling
R744	CO <sub>2</sub> (koolzuur)	44	-57	0		-11	0	1	Diverse	In ontwikkeling
R1270	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (propyleen)	42	-48	0		61	0	3	R22, R502	Speciale installen met kleine inhoud

Verklaring:

M = moleculair gewicht

t<sub>1</sub> = kookpunt bij 1 bara

Δt<sub>s</sub> = kook- of temperatuurtraject, "temperature glide"

P50 = druk bij 50°C

t<sub>26</sub> = kookpunt bij 26 bara

- luchtbehandeling en airconditioning, tot  $-5^{\circ}\text{C}$ ;
- industriële koeling tot  $-10^{\circ}\text{C}$ ;
- industriële koeling tot  $-40^{\circ}\text{C}$ ;
- industriële koeling lager dan  $-40^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.1 Thermodynamische en fysische eigenschappen

Belangrijke factoren bij de keuze van een koudemiddel zijn onder andere:

- hoog volumetrisch koude-effect;
- hoge kritische temperatuur;
- grote latente warmte bij de gewenste verdampingstemperatuur;
- lage isentropische exponent en hoge specifieke warmte;
- laag specifiek volume van de vloeistof;
- hoge warmte-overdrachtscoëfficiënt;
- lage dynamische viscositeit;
- laag moleculair gewicht, (met uitzondering van systemen met een centrifugaal compressor);
- lage condensatiedruk bij  $+35^{\circ}\text{C}$ , verdampingsdruk bij proces temperatuur boven 1 bar;
- brandbaarheid, explosiviteit, giftigheid;
- eenvoudige lekdetectie.

Deze kenmerken kunnen gevolgen hebben voor de hoeveelheid koudemiddel in de kringloop, afmetingen van condensor en verdamper, de benodigde compressie-energie en voor de drukklasse van leidingen en warmtewisselaars.

#### 4.2 Milieueffecten

Onder milieueffecten worden hier verstaan de gevolgen voor de omgeving op korte en lange termijn die ontsnappingen van het koudemiddel via lekkages en andere emissies kunnen hebben.

Bij die milieueffecten spelen de volgende begrippen een rol.

- ODP, Ozone Depletion Potential. Dit geeft aan in hoeverre het koudemiddel de ons omringende ozonlaag afbreekt in vergelijking met R11 (een CFK:  $\text{CClF}_3$ ), dat de factor 1,0 heeft.
- GWP, Global Warming Potential. Met dit kenmerk wordt aangegeven wat het zogenaamde broeikas effect van het koudemiddel is uitgedrukt in equivalente  $\text{kg CO}_2$  in een tijdvak van 100 jaar. Bij vergelijking van de diverse alternatieven voldoet dit kenmerk onvoldoende, beter is het om te beslissen op basis van de TEWI waarde.
- TEWI, Total Equivalent Warming Impact. Hieronder wordt verstaan de som van de directe en indirecte bijdragen van het koudemiddel aan het broeikas effect, uitgedrukt in equivalente  $\text{kg CO}_2$ -uitstoot in een tijdvak van 100 jaar. De directe bijdrage ontstaat als het koudemiddel door lekkage vrijkomt in de atmosfeer. De indirecte bijdrage is het gevolg van de  $\text{CO}_2$ -emissie bij de energieopwekking, dus de efficiency van de installatie. Deze waarde wordt uitgedrukt in  $\text{kg CO}_2$ .

De TEWI-waarde, bestaande uit drie factoren, respectievelijk lekkage tijdens bedrijf, lekkage en ontsnappingen tijdens onderhoud of ontmanteling en door emissies tengevolge van energieverbruik, wordt berekend met de volgende formule:

$$\text{TEWI} = (\text{GWP} \cdot L \cdot n) + \{ \text{GWP} \cdot m \cdot (1 - \alpha_r) \} + (n \cdot E_a \cdot \beta) \text{ kg CO}_2$$

Waarbij:

GWP = Global Warming Potential in  $\text{kg CO}_2$  in 100 jaar

L = jaarlijks koudemiddelverlies van een installatie uitgedrukt in  $\text{kg}$

Gebruikelijke lekpercentages: 2,5 – 5 – 10% op jaarbasis

n = levensduur van een installatie, 10 jaar

m = koudemiddelinhoud van de installatie

$\alpha_r$  = recuperatiefactor van het koudemiddel bij onderhoud of ontmanteling van de installatie

$E_a$  = jaarlijks energieverbruik in kWh

$\beta$  =  $\text{CO}_2$ -emissie per kWh energieverbruik

voor aardgas: 0,55 voor stookolie: 0,85

voor steenkool: 1,16

meestal wordt met een energiemix gerekend,

waarbij  $\beta = 0,7$  of  $0,9$

Uit deze formule blijkt dat de indirecte bijdrage (energieverbruik) meer invloed heeft op het resultaat dan de directe bijdrage (keuze koudemiddel), vooral als de lekkages tot een minimum beperkt kunnen worden.

Internationaal is overeengekomen om alleen nog koudemiddelen toe te laten, waarvan de ODP = 0 is, en de GWP-waarde zo laag mogelijk.

Het wordt echter aangeraden om de keuze van een geschikt koudemiddel, naast de thermodynamische eigenschappen, mede te laten afhangen van de TEWI-waarde.

#### 4.3 Kosten van het koudemiddel, koelmachine en energie

De directe kosten van het koudemiddel in de koelinstallatie zijn afhankelijk van de eenheidsprijs maar ook van de totaal benodigde hoeveelheid.

De indirecte kosten worden veroorzaakt door het effect van de keuze van het koudemiddel op de afmetingen en inhoud van de installatie met de aandrijfmotor en de vereiste ontwerpdruk van de leidingen en warmtewisselaars.

Bij de koudemiddelen die een zeker brand- of explosierisico hebben, zullen de kosten voor veiligheidsmaatregelen een belangrijk deel van de indirecte kosten bedragen. Deze maatregelen kunnen bestaan uit gasdetectie, speciale lekvrije afsluiters, ventilatievoorzieningen en dergelijke.

Tevens heeft de keuze van het koudemiddel een indirecte invloed op de Coefficient of Performance (C.O.P.) van de koelinstallatie, respectievelijk op de energie-efficiency.

## 5 Industriële koudemiddelen

De beschikbare en toegelaten industriële koudemiddelen zijn de natuurlijke koudemiddelen zoals lucht en koolzuur, ammoniak, isobutaan, propaan, propyleen en de nieuwe koudemiddelen waaronder de HFK's (fluorkoolwaterstoffen). Voor een overzicht van deze koudemiddelen met hun eigenschappen zie *tabel 2*. In deze tabel is tevens aangegeven door welke koudemiddelen de uitgefaseerde koudemiddelen vervangen kunnen worden.

Bij een eventuele uitwisseling van een uitgefaseerd koudemiddel dient nagegaan te worden wat de invloed van de vervanger is op de bestaande installatie ten aanzien van koelcapaciteit, de warmteoverdracht bij de gebruikers, het energiegebruik, de ontwerpdruk en op de eigenschappen van pakkingen en smeerolie.

### 5.1 Chloorvrije koolwaterstoffen

#### R134a (CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>)

Het meest gebruikte nieuwe koudemiddel is momenteel R134a, vooral bij de luchtbehandeling van gebouwen en voor processen. R134a heeft een hoge Coefficient of Performance (C.O.P.) bij verdampingstemperaturen van -5°C en hoger ten gevolge van de relatief kleine drukverschillen. De systeemdrukken zijn laag waardoor de kosten van de installatie eveneens laag kunnen blijven. Voor cilindersmering is polyolesterolie vereist. Deze esteroliën worden ook in hydraulische systemen gebruikt. De olieoplosbaarheid geeft enerzijds problemen bij kleine zuiggasoverhitting, maar anderzijds is het terugvoeren van de olie naar de compressor eenvoudig.

Het aantal typen compressoren dat speciaal voor R134a is ontworpen neemt toe.

R134a heeft bij gelijk slagvolume echter slechts 60% van de koelcapaciteit vergeleken met de vroegere R22.

#### R404A (blend van R143A/R125/R134a) en R507 (blend van R143A/R125)

Dit zijn menggassen (de eigenschappen van R404A en R507 zijn vrijwel gelijk) met een beperkte temperature glide van 1 K. De persgastemperatuur is zeer laag waardoor R404A geschikt is voor lage verdampingstemperaturen (vriezen). De C.O.P. is niet zo hoog, vooral niet bij hogere verdampingstemperatuur. De koelinstallaties met R404A zijn relatief kostbaar omdat er diverse extra aandachtspunten zijn:

- zuiggaswarmtewisselaar, soms vereist voor een goede C.O.P., deze is ook gunstig voor de oliehuishouding;
- olieafscidders, vloeistofafscidders en onderkoelers, in verband met de lage persgasdruk;
- het gebruik van een koudemiddepomp om de druk vóór het expansieventiel (c.q. de temperatuur) te verhogen, maakt een goede regeling mogelijk.

#### R407C (blend van R32/R125/R134a)

Het menggas R407C heeft een temperatuur traject van 4 - 7 K en is zeer goed inzetbaar voor koelsystemen en airconditioners. De capaciteit en het rendement zijn enigszins lager dan die van R22. Druk en temperatuur komen overeen met R22. Voor lage temperaturen is R407A meer geschikt.

De koelinstallaties zijn in tegenstelling tot bij R404A niet zo gecompliceerd. In de esterolie die als smeermiddel dient, wordt het koudemiddel gemakkelijk opgenomen. Bovendien is deze olie zeer hygroscopisch en kan dus tijdens vullen en bij onderhoud waterdamp opnemen. Het is te verwachten dat dit koudemiddel een goede vervanger is voor R22, ook in bestaande installaties.

R407C voldoet uitstekend in koelinstallaties met directe verdamping.

#### R410A (blend van R32/R125)

R410A is eveneens een menggas, zoals de codering reeds aangeeft en heeft een klein temperatuurtraject. Het is breed inzetbaar, maar zal vanwege de hoge persgastemperatuur niet geschikt zijn voor vriestoeepassingen. R410A heeft een groot koelvermogen per slagvolume, terwijl het rendement iets minder of gelijk is aan dat van R22. In verband met de verhouding tussen slagvolume en motorvermogen zullen speciale compressoren ontwikkeld moeten worden. R410A zal voornamelijk in de markt voor kleine airconditioners en koudwatermachines floreren. De systeemdrukken zijn hoog; de afpersdruk bedraagt minstens 50 bar. De installatiebouw is totaal anders dan gebruikelijk, terwijl ook duurdere componenten nodig zijn vanwege de hoge afpersdruk. De verkrijgbaarheid van R410A-compressoren, evenals die van systeemcomponenten, is nog beperkt als gevolg van de noodzakelijke veiligheidsmaatregelen. Daar R410A echter zeer goede thermodynamische eigenschappen heeft, worden er wereldwijd onderzoeken verricht om geschikte componenten te ontwikkelen.

### 5.2 Ammoniak

In onderstaande tabel 3 is een overzicht gegeven van de toepassing van ammoniak voor koel- en vrieshuizen en in de agrarische sector in vergelijking met CFK en HCFK toepassingen.

Koudemiddelen in koel- en vrieshuizen en in de agro-industrie			
	NH <sub>3</sub>	CFK	HCFK (R22)
Verenigde Staten van Amerika	81%	9,5%	9,5%
Noord, Zuid en West Europa	65%	7%	28%
Japan, Midden Oosten,			
Franssprekende landen in Afrika	Meest CFK en HCFK		
Oost Europa	Meest NH <sub>3</sub>		

Tabel 3 Toepassing van NH<sub>3</sub> en andere koudemiddelen

Tengevolge van de uitstekende eigenschappen van ammoniak als koudemiddel, ook in vergelijking met moderne alternatieve koudemiddelen op basis van fluorkoolwaterstoffen, is met ammoniak in de koeltechniek een zeer hoge energie-efficiency te bereiken. De belangrijkste eigenschappen van een goed koudemiddel zijn reeds in paragraaf 4.1 genoemd en worden voor ammoniak (R717) en enige veel toegepaste moderne koudemiddelen met elkaar vergeleken in *tabel 4* met als referentie een koelmachine met een verdamping bij -10°C en een condensatie bij 35°C. Met behulp van deze tabel kunnen ten aanzien van ammo-

Eigenschappen van een goed koudemiddel	Voorkeur	Ammoniak		HFK blends	
		R717	R404A	R507	R407A
ODP	Laag	0	0	0	0
GWP	Laag	0	3748	3800	1900
Kritische temperatuur in °C	Hoog	132,4	82,6	70,81	83
Latente warmte bij -10°C in kJ/kg	Hoog	1296,4	177,9	172,6	215
Volumetrisch koude-effect in kJ/m <sup>3</sup>	Hoog	2591,9	2322,6	2504,7	2512,7
Isentropische exponent bij 20°C	Laag	1,317	1,294	1,331	1,274
Specifiek volume vloeistof in kg/m <sup>3</sup>	Laag	610,12	2224,8	1074	1764,42
Warmtegeleidingscoëfficiënt in W/mK	Hoog	0,52	0,666	0,6541	0,0871
Specifieke warmte bij 20°C in kJ/kgK	Hoog	4,72	1,573	1,567	1,720
Dynamische viscositeit mm <sup>2</sup> /sec	Laag	154	140,3	130,4	167
Moleculair gewicht in g/mol	Laag	17,03	97,61	98,86	90,1
Verdampingstemperatuur bij 1 bar in °C	-	-34	-46,1	-46,5	-45/-39
Condensatiedruk bij 35°C in bar	Laag	13,5	16	16,51	15,38
Temperatuurtraject (glide) in K	Minimaal	0	0,4	0	4,49
Beschikbaarheid	Altijd	Altijd	afhankelijk van ontwikkelingen		
Prijs	Laag	Ja	neen	Neen	neen
Giftigheid	Geen	Laag	geen	Geen	geen
Brandbaarheid	Geen	Laag	geen	Geen	geen
Explosiviteit	Geen	Klein	geen	Geen	geen
Geur	Geen	Ja	geen	Geen	geen

Tabel 4 Vergelijking van NH<sub>3</sub> met andere koudemiddelen

niak de volgende conclusies getrokken worden.

- NH<sub>3</sub> is milieuvriendelijk: ODP = 0, GWP = 0, dus is ook de TEWI zeer gunstig.
- Door het lage moleculair gewicht van NH<sub>3</sub> zijn hoge snelheden toelaatbaar. Dit resulteert in kleinere afmetingen van leidingen, compressoren en afsluiters. De compressor kan met veel hogere snelheden werken (bij dezelfde drukverliezen) dan bij andere koudemiddelen.
- Tengevolge van het lage moleculairgewicht zijn ook de latente warmte en de warmteoverdrachtscoëfficiënt hoog.
- De vloeistoffilms in de verdamper en in de condensor zijn zeer dun waardoor de warmteoverdracht zeer goed is, ook door de lage viscositeit en lage specifieke massa.
- Het rendement van de NH<sub>3</sub>-kringloop is zeer gunstig door een hoge kritische temperatuur (132,4°C) en druk (112,8 bar); hierdoor ligt de condensatiedruk nog ver van het kritische punt.
- Door de hoge kritische druk en temperatuur is NH<sub>3</sub> zeer geschikt als koudemiddel voor warmtepompen. Er zijn dan ook reeds industriële compressoren die aangepast zijn om bij 40 bar te opereren.
- Ammoniak is giftig (Mac-waarde 25 – 50 ppm), maar door zijn lage reukgrens (5 ppm) is het vaststellen en opzoeken van een lek in een vroeg stadium mogelijk en er kan dus tijdig ingegrepen worden. Hierbij is het feit dat NH<sub>3</sub> lichter is dan lucht behulpzaam, in tegenstelling tot de gehalogeneerde koudemiddelen die zwaarder zijn dan lucht.
- Bij eventuele lekkages wordt NH<sub>3</sub> gemakkelijk door een waterscherm geabsorbeerd.
- Bij contact met open vuur zal NH<sub>3</sub> uiteen vallen in waterdamp en stikstofoxyde. Bij gehalogeneerde koudemiddelen is er kans op het ontstaan van fosgeen of andere giftige gassen.

- Door de hoge onderste explosiegrens (15 vol%) en de daar dichtbij liggende bovengrens (30,2 vol%) is de kans op het ontstaan van een explosief mengsel zeer klein. Door het hoge ontstekingspunt (630°C) is het tevens moeilijk om NH<sub>3</sub> te ontsteken. Door de National Fire Protection Association (NFPA) in America is NH<sub>3</sub> ingedeeld bij categorie 1 (0 is geen risico, 4 is zeer gevaarlijk)
- Buitencondities waarbij een explosief mengsel van lucht en NH<sub>3</sub> kan ontstaan komen niet voor. In gesloten ruimten dient men door middel van detectoren en een ventilatiesysteem ervoor te waken dat de toegestane concentratie niet overschreden wordt.

In CPR 13, derde druk, 1998, van de Commissie Preventie van Rampen door Gevaarlijke Stoffen, zijn voorschriften gegeven voor de opslag en het veilig gebruik van ammoniak. In deel 1 worden de regels gegeven ten aanzien van transport en opslag van ammoniak, in deel 2 zijn meer specifiek de veiligheidseisen bij het gebruik van ammoniak in koelinstallaties vastgelegd.

### 5.3 Andere natuurlijke koudemiddelen

Tot de andere natuurlijke koudemiddelen behoren naast ammoniak:

- R50 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> Methaan;
- R170 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> Ethaan;
- R290 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> Propaan;
- R600A C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> Isobutaan;
- R1270 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> Propyleen;
- R718 H<sub>2</sub>O Water;
- R729 Lucht;
- R744 CO<sub>2</sub> Koolzuur.

### 5.3.1 Brandbare koudemiddelen

Tot de brandbare natuurlijke koudemiddelen worden ook een aantal koolwaterstoffen gerekend.

Alle koudemiddelen zijn volgens hun brandbaarheid in klassen ingedeeld. Die indeling is verschillend voor Europa, de Verenigde Staten van Amerika en Japan. Er is verschil in het aantal klassen, in de te hanteren criteria bij de indeling en in de testcondities.

Voor Nederland is de Nederlandse Praktijk Richtlijn NPR 7600 van toepassing waarin de veiligheidsaspecten met betrekking tot brandbaarheid van natuurlijke koudemiddelen in koelinstallaties en warmtepompen behandeld worden. Volgens de NPR 7600 is de classificatie van brandbare koudemiddelen:

- groep 1: in geen enkele concentratie in lucht brandbaar: koolzuur en enige HFK's;
- groep 2: onderste explosiegrens  $\geq 3,5$  vol% in lucht: o.a. methaan, R32, R143A, R152A;
- groep 3: onderste explosiegrens  $< 3,5$  vol% in lucht: overige koolwaterstoffen.

Tot nu toe zijn propaan (R290) en propyleen (R1270) reeds vele jaren bewezen koudemiddelen in industriële installaties met inachtneming van de nodige veiligheidsmaatregelen.

### 5.3.2 Koolzuur

Er is een stijgende interesse merkbaar voor het toepassen van koolzuur (R744) als koudemiddel.

In een cascadesysteem met bijvoorbeeld ammoniak is koolzuur een zeer aantrekkelijk koudemiddel tot temperaturen van  $-50^{\circ}\text{C}$ . In een dergelijk systeem wordt het hoge temperatuurdeel verzorgd door een compacte unit met ammoniak waarvan de verdamper fungeert als condensor voor de koolzuurcyclus. De lage temperatuurcyclus met koolzuur gaat tot aan de gewenste lage procestemperatuur. Van deze nieuwe ontwikkeling is reeds een aantal voorbeelden in bedrijf. Wel dient er extra aandacht geschonken te worden aan de ontwerpdruk omdat bij stilstand van de installatie de temperatuur tot de omgevingstemperatuur oploopt en de daarbij behorende druk hoog kan zijn: het kritisch punt ligt op  $31,1^{\circ}\text{C}$  bij een druk van 73,8 bar.

### 5.3.3 Water

Het natuurlijkste koudemiddel is sinds de oudheid het ons omringende water in twee vormen: als verdampend water of als smeltend ijs.

Het meest wordt het toegepast voor comfortkoeling: een verkoelende dronk, in de zomer een verkoelende duik in het zwembad, de wijnkoeler. Van industriële toepassingen zijn de volgende toepassingen te noemen: koeltorens met verdampingskoeling, verzadigde of oververzadigde luchttoevoer in fabrieken met hoge warmtebelasting (textiel fabrieken e.d.), in de zomer besproeien van daken.

Deze verdampingskoeling maakt gebruik van het feit dat de ons omringende lucht zelden of nooit verzadigd is waardoor het aanwezige water de natuurlijke neiging heeft om te verdampen door onttrekking van (verdampings)warmte aan de omgeving. De grens van die verdamping is bereikt indien de

omgevingstemperatuur is gedaald tot bijna aan de zogenaamde natte boltemperatuur.

Er zijn momenteel diverse technieken bekend die op een zeer effectieve manier gebruik maken van boven beschreven natuurlijke verdampingskoeling. De toepassing beperkt zich in de meeste gevallen tot comfortkoeling van fabrieken, werkplaatsen en kantoren. De haalbare inblaastemperatuur is in warme zomers 21 tot  $22^{\circ}\text{C}$  bij een buitenconditie van  $30^{\circ}\text{C}$  en een relatieve vochtigheid van 40%

Eén van de laatste ontwikkelingen is een systeem waarbij het verdampingsproces in een indirecte cyclus plaatsvindt, waardoor geen vocht in de ventilatielucht terecht komt. Een deel van de aangezogen buitenlucht (1/3 deel) voert het verdampende water af naar de omgeving, terwijl het resterende 2/3 deel via een warmtewisselaar tot dichtbij de natte boltemperatuur wordt gekoeld en aan de werkruimte wordt toegevoerd. De ruimtelucht wordt tevens in het warme jaargetijde voor 100% ververs. In vergelijking met een mechanisch gekoelde air-conditioning heeft dit nieuwe systeem een hoge energie-efficiency.

## 6 Samenvatting

Het is vanzelfsprekend dat het lekdicht zijn van de installatie en een verantwoorde verwerking van het koudemiddel tot de basiseisen van de koudetechniek behoren. Hoe minder koudemiddel in de ons omringende atmosfeer terecht komt, des te kleiner zullen de ecologische gevolgen zijn.

Bij het zoeken naar alternatieven wordt aanbevolen om als maatstaf de technische eisen te hanteren en niet te kiezen op grond van een vermeende overeenkomst met de "oude" koudemiddelen als R11, R12, R502 of R22.

Ammoniakkoelinstallaties winnen steeds meer terrein, ook bij de waterkoelmachines voor de luchtbehandeling. Niet alleen vanwege de milieuvriendelijke eigenschappen, maar vooral door de energie-efficiency die ermee te behalen is. Milieuvriendelijke koudemiddelen, zoals water, lucht en koolzuur, zijn voorlopig slechts interessant voor speciale toepassingen maar nog ongeschikt voor een wijdverbreide toepassing in de industriële koudetechniek.

Gefluorideerde ethers worden wel genoemd als koudemiddelen van de toekomst maar zijn zeker nog niet op middellange termijn beschikbaar.

Samenvattend wordt in *tabel 5* per toepassingsgebied aangegeven welk koudemiddel gebruikt kan worden:

Temperatuurgebied	Toepassingsgebied			
	Industrie	Semi-industrie	Luchtbehandeling	Transport
Boven -5°C	Ammoniak R134a	R404A R507A Ammoniak	R134a R407C Ammoniak	R134a Koolzuur Lucht
0°C tot -40°C	Ammoniak	Koolwaterstoffen Koolzuur		
Onder -40°C	Koolzuur Propaan Propyleen			

*Tabel 5 Koudemiddelen per toepassingsgebied*

## **7 Referenties**

1. CPR-13, derde druk, 1999
2. NPR 7600, Toepassing van natuurlijke koudemiddelen in koelinstallaties en warmtepompen, eerste druk, 2000
3. Koelet, P.C., Industrial Refrigeration, 1995
4. ILK-Prospekt, Kältemittel Stand/Tendenzen, 1995
5. C.J.L.van der Lande, Moderne koudemiddelen, Themadag 27-11-1997
6. Koude en Luchtbehandeling, 93e jaargang, nr 9, september 2000