



Best Practice Koudemiddelen voor Industriële Koeling

1. Inleiding

Het medium dat de thermodynamische kringloop in een koelinstallatie doorloopt, wordt het koudemiddel genoemd. Deze kringloop omvat in grote lijnen het comprimeren, condenseren, expanderen 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 en bij ontmanteling, als ten gevolge van het energiegebruik een rol.

Om niet-giftige en reukloze alternatieven voor de klassieke koudemiddelen (ammoniak, koolzuur, zwaveldioxide) te vinden, zijn in de jaren '30 de synthetisch koudemiddelen zoals de CFK's (chlorofluorkoolwaterstoffen) en de HCFK's (hydrochlorofluorkoolwaterstoffen) ontwikkeld. 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.

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-efficiëntie-aspect van het gebruik van diverse koudemiddelen.

2. Vuistregels

- Gebruik bij voorkeur [natuurlijke koudemiddelen](#) wegens het ontbreken van ozonlaag afbrekend vermogen, geen of laag effect als broeikasgas.
- [Ammoniak](#) is een koudemiddel waarmee een zeer hoge energie-efficiëntie wordt bereikt (link naar paragraaf 9.2.). Wel dienen extra veiligheidsmaatregelen worden genomen wegens de giftigheid van ammoniak.
- Bij gebruik van F-gassen, kies dan voor types met een met een lage GWP wegens een toekomstige [uitfasering](#). Bij een F-gas met lage GWP, ofwel lage CO₂-equivalent kan de voorgeschreven [frequentie van lekcontroles](#) beperkt blijven.
- [Kooldioxide](#) of CO₂ leent zich goed in cascade systeem met bijvoorbeeld ammoniak.
- In algemeen is het gewenst zo weinig mogelijk koudemiddel in een installatie. Dat vraagt om [compacte warmtewisselaars](#) en een secundair circuit met een [koudedragers](#). Weeg dit wel af tegen het extra energieverbruik dat het secundaire circuit vraagt.

3. Wet en regelgeving

Vanwege bovengenoemd milieu-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.

Juli 2015

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 besluiten genomen die relevant zijn voor de chemische industrie:

HCFK uitfasering

Vanaf 1-1-2015 geldt een algemeen verbod op het gebruik van HCFK's, zoals het veelgebruikte R22, (ook de geregenereerde of gerecyclede) voor vullen of bijvullen van bestaande installaties. Dit betekent dat onderhoud aan deze installaties niet meer mogelijk is.

F-gassenverordening 517/2014

Op 20 mei 2014 heeft de EU de nieuwe F-gassenverordening gepubliceerd. De verordening (EU) nr. 517/2014 (referentie nr. 1), treedt op 1 januari 2015 in werking in alle 28 lidstaten.

Het betreft de Europese doelstelling tot reductie van het gebruik van F-gassen aangezien deze stoffen sterk broeikasgas verhogende gevolgen hebben bij lekkage. Het betreft verbod op gebruik van alle synthetische koudemiddelen (HFK, d.w.z. gehalogeneerde fluorkoolwaterstoffen) voor bepaalde toepassingen, verbod op onderhoud op termijn, quota voor beschikbaarheid op de markt in een afbouwend scenario per jaar, eisen aan personen en bedrijven die koeltechnische handelingen verrichten. Ook het onderhoud wijzigt, zoals de frequentie van de lekcontroles. Deze wordt per 1-1-2015 niet meer bepaald door de koudemiddelinhoud in kilogram, maar door de inhoud in CO₂-equivalenten d.w.z. GWP (Global Warming Potential) x kg inhoud installatie. Zie referentie 1. Een praktische handleiding omtrent F-gassen wordt gegeven in referentie 2.

De F-gassenregeling kent een geleidelijke afbouwscenario van het op de markt brengen van HFK's. De volgende sub-paragrafen zijn enkele praktische "highlights" in samenvatting uit de F-gassenregeling.

Afbouwscenario HFK's op de markt

2015	100%
2016-2017	93%
2018-2020	63%
2021-2023	45%
2024-2026	31%
2027-2029	24%
2030	21%

Noot: de voorgevulde koelinstallaties zijn onderdeel van het quotasysteem

Een quotasysteem wordt ingevoerd, waarbij importeurs/fabrikanten quota krijgen toegewezen. HFK koudemiddelen mogen alleen nog maar door gecertificeerde bedrijven ingekocht of aan hen worden verkocht. Hierdoor zijn HFK's niet meer onbeperkt leverbaar. De verwachting is dat dit op den duur (vanaf 2017) leidt tot prijsconsequenties voor deze koudemiddelen.

Frequentie voor lekcontroles F-gassen

Schema op basis van CO₂ equivalenten i.p.v. kg inhoud:

5-50 ton CO ₂ equivalent:	1x per 12 maanden
50-500 ton CO ₂ eq.	1x per 6 maanden
> 500 ton CO ₂ eq.	1x per 6 maanden maar automatische lekdetectie is nu verplicht

Noot: met een automatisch lekdetectiesysteem kan deze frequentie worden gehalveerd.

Tabel 1 geeft de consequenties van de lekcontroles bij de overgang van kg als criterium voor lekcontrole naar CO₂ equivalenten

Versie juni 2014

Refrigerant	Andere naam	GWP	5 ton CO ₂ -eq (kg)	50 ton CO ₂ -eq (kg)	500 ton CO ₂ -eq (kg)
23		14800	0.34	3.37	33.78
32		675	7.41	74.07	740.74
134a		1430	3.50	34.96	349.65
125		3500	1.42	14.28	142.86
245fa		1030	4.85*	48.54	485.44
404A		3922	1.27*	12.75	127.49
407A		2107	2.37*	23.73	237.30
407C		1774	2.82*	28.18	281.85
407D		1627	3.07	30.73	307.31
407F	Performax LT™	1825	2.74*	27.40	273.97
410A		2088	2.39*	23.95	239.46
417A	ISCEON® MO59	2346	2.13*	21.31	213.13
422A	ISCEON® MO79	3143	1.59*	15.91	159.08
422D	ISCEON® MO29	2729	1.83*	18.32	183.22
423A	ISCEON® 39TC™	2280	2.19*	21.93	219.30
424A	RS44	2440	2.02*	20.49	204.92
426A	RS24	1508	3.32	33.16	331.56
427A	FX100	2138	2.34*	23.39	233.86
428A	RS52	3607	1.39*	13.86	138.62
434A	RS45	3245	1.54*	15.41	154.08
437A	ISCEON® MO49plus	1805	2.77*	27.70	277.01
438A	ISCEON® MO99	2265	2.21	22.07	220.75
442A	RS50	1888	2.65	26.48	264.83
449A		1397	3.58	35.79	357.91
507		3985	1.25*	12.55	125.47
508A		13214	0.38*	3.78	37.83
508B	Suva 95	13396	0.37*	3.73	37.32
-	ISCEON® MO89	3805	1.31*	13.14	131.41

* Lekcontroles verplicht vanaf 1 januari 2017 bij inhoud <3 kg.

Tabel 1: de relatie kg en CO₂ equivalenten gericht op frequentie van lekcontroles (bron AREA (ref. 2), NVKL)

Bijzulverbod F-gassen koudemiddel >2500

Er geldt een bijzulverbod voor koudemiddelen met een GWP factor > 2500:

- Per 1 januari 2020 Bijzulverbod installaties met nieuw HFK met GWP>2500
- Tot 1 januari 2030 Bijvullen met geregenereerd of gerecycleerd HFK toegestaan
- Het bijzulverbod geldt niet voor: Installaties met een koudemiddelinhoud < 40 ton CO₂ eq., militaire apparatuur en vriestoepassingen met T<-50°C

Nieuwbouw verbod F-gassen

Er geldt een nieuwbouwverbod voor koeltoepassing in relatie tot GWP waarde voor:

- Huishoudelijke koel-/vriestkasten GWP>150 per 1 jan. 2015
- Hermetisch gesloten commerciële koel-/vriestkasten GWP>2500 per 1 jan. 2020
- Hermetisch gesloten commerciële koel-/vriestkasten GWP>150 per 1 jan. 2022
- Stationaire koelinstallaties en klimaatapparatuur GWP>2500 per 1 jan. 2020
- Centrale koelsystemen voor commerciële koeling met koelvermogen > 40 kW en GWP>150 per 1 jan. 2022 (wel cascade)
- Mobiele hermetisch gesloten airco's GWP>150 per 1 jan. 2020
- Single split airco's met inhoud <3 kg en GWP>750 per 1 jan 2025

Door de druk op het gebruik van de synthetisch koudemiddelen staan de natuurlijke koudemiddelen zoals ammoniak, koolzuur en de koolwaterstoffen weer volop in de belangstelling.

4. Nomenclatuur koudemiddelen

De koudemiddelen hebben een R-aanduiding die officieel wordt uitgegeven door de American Society of Heating, Refrigeration and Airconditioning Engineers (ASHRAE). Zie voor meer details de ASHRAE Standard Nr 34 (referentie 7).

Voor enkelvoudige koudemiddelen geeft deze aanduiding de molecuulstructuur weer.

Zo bestaat bijvoorbeeld R134a (CH_2FCF_3) uit:

1 (+1) 3 (-1) 4

2 koolstof- 2 waterstof- 4 fluor-atomen

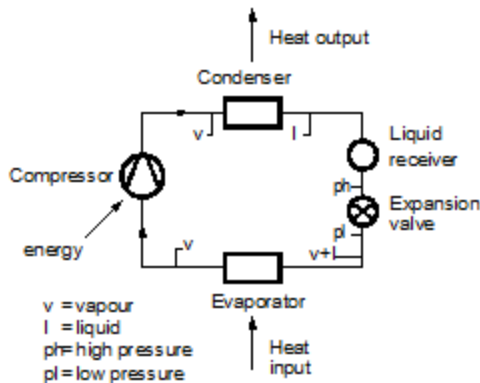
De toevoeging "a" geeft aan dat de isomeer in onbalans is door één atoom, 1,1,1,2-Tetrafluoroethaan

Dit geldt niet voor mengsels (blends ofwel zeotropen). 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 menggasen (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, dus een azeotroop, geselecteerd dienen te worden.

In referentie 6 zijn in een overzicht de beschikbare chloorvrije HFK's en natuurlijke koudemiddelen met hun R – nummers gegeven.

5. 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 (bron KWA)

Omdat de verdampers zich stroomafwaarts van het expansieorgaan en vóór de compressoraanzuiging bevindt, heerst er in de verdampers 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. 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 (COP) of koudefactor. Deze wordt aangegeven als:

$\text{COP} = Q_o / P_e$, waarin:

Q_o = koelvermogen van de koelinstallatie in kW

P_e = opgenomen (elektrisch) vermogen in kW

De totaal naar de omgeving af te voeren energie, via de condensor is: $Q_c = Q_o + P_e$ (in kW).

Zie ook de Best Practice Koudetechniek.

6. Selectiefactoren

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

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

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 zekere giftigheid, 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 (COP) van de koelinstallatie, respectievelijk op de energie-efficiëntie.

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

- 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 $- 40^{\circ}\text{C}$.

7. 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);
- verdampingsdruk bij procestemperatuur boven 1 bar;
- geen of geringe brandbaarheid, explosiviteit, giftigheid;
- eenvoudige lekdetectie.
- geen ozonlaag afbrekend vermogen (ODP).
- geen of laag effect als broeikasgas (GWP).

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.

8. 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 aarde omringende ozonlaag afbreekt, in vergelijking met R11 (een CFK: CClF₃), 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 kg CO₂ 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 kg CO₂-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 CO₂-emissie bij de energieopwekking, dus de efficiëntie van de installatie. Deze waarde wordt uitgedrukt in kg CO₂.

TEWI: Total Equivalent Warming Impact

De TEWI waarde is een methode om milieuaspecten af te wegen. De TEWI waarde, bestaande uit drie factoren, respectievelijk lekkage tijdens bedrijf, lekkage en ontsnappingen tijdens onderhoud of ontmanteling en door emissies ten gevolge van energieverbruik, wordt berekend met de volgende formule:

$$\text{TEWI} = \text{GWP} * \text{L} * \text{n} + \text{GWP} * \text{M} * (1 - \alpha_r) + \text{n} * \text{E} * \text{B} \text{ in kg CO}_2$$

Waarbij:

GWP = Global Warming Potential in kg CO₂ (in 20, 100 of 500 jaar)

L = jaarlijks koudemiddelverlies van een installatie uitgedrukt in kg. Gebruikelijke lekpercentages: 2,5 – 5 – 10% op jaarbasis

n = levensduur van een installatie in jaren

M = koudemiddelinhoud van de installatie

α_r = recuperatiefactor van het koudemiddel bij onderhoud of ontmanteling van de installatie

E = jaarlijks energieverbruik in kWh

B = kg CO₂- emissie per kWh energieverbruik, voor aardgas: 0,55, voor stookolie: 0,85, voor steenkool: 1,16 meestal wordt met een energiemix gerekend, waarbij B = 0,7 of 0,9

De eerste twee termen zijn het directe broeikasgas bijdragen, de 3^e term is de indirecte bijdrage (energieverbruik).

Uit deze formule blijkt dat de indirecte bijdrage (energieverbruik) veel meer invloed heeft op het resultaat dan de directe bijdrage (keuze koudemiddel), vooral als de lekkages tot een minimum beperkt kunnen worden. Omdat de energie-efficiëntie dominant is, is de betekenis van de TEWI waarde niet zo groot. Zie ook referentie 6 voor TEWI berekening en GWP waarden van koudemiddelen.

9. Industriële koudemiddelen

De beschikbare en toegelaten industriële koudemiddelen zijn de natuurlijke koudemiddelen zoals lucht en koolzuur, ammoniak, isobutaan, propaan, propyleen en de synthetische koudemiddelen zoals de HFK's (fluorkoolwaterstoffen). Voor een overzicht van deze koudemiddelen met hun eigenschappen wordt verwezen naar het koudemiddelenrapport van de fabrikant Bitzer dat jaarlijks wordt uitgegeven, zie paragraaf 8 van dit document en referentie 6.

9.1 Synthetische koudemiddelen die vaak worden toegepast

R134a (CH_2FCF_3)

Het meest gebruikte nieuwe koudemiddel is momenteel R134a, vooral bij de luchtbehandeling van gebouwen en voor processen. R134a heeft een hoge Coefficient of Performance (COP) 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 65% 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 temperatuurglide van 4 K. Beide koudemiddelen zijn voor lage temperatuur of vriestoepassingen. De persgastemperatuur is zeer laag waardoor R404A geschikt is voor lage verdampingstemperaturen (vriezen). De COP 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 COP, 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.

Er geldt een nieuwbouwverbod voor deze koudemiddelen volgens de F-gassenverordening per 2020 vanwege hun hoge GWP waarde (>2500). Ook is er een bijvalverbod. Nieuwbouw met deze middelen is niet aantrekkelijk.

R407C (blend van R32/R125/R134a)

Het menggas R407C heeft een temperatuurtraject 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 vriestoepassingen. 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.

9.2 Natuurlijke koudemiddelen

Ammoniak

Ten gevolge van de goede 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-efficiëntie te bereiken. De belangrijkste eigenschappen van een goed koudemiddel zijn reeds in een eerdere paragraaf genoemd en worden voor ammoniak (R717) en enige veel toegepaste moderne koudemiddelen met elkaar vergeleken in *tabel 2* met als referentie een koelmachine met een verdamping bij -10°C en een condensatie bij 35°C .

Eigenschappen van een goed koudemiddel	Voorkeur	Ammoniak	R404A
ODP	Laag	0	0
GWP	Laag	0	3748
Kritische temperatuur in $^{\circ}\text{C}$	Hoog	132,4	82,6
Latente warmte bij -10°C in kJ/kg	Hoog	1296,4	177,9
Volumetrisch koude-effect in kJ/m ³	Hoog	2591,9	2322,6
Isentropische exponent bij 20°C	Laag	1,317	1,294
Specifiek volume vloeistof in kg/m ³	Laag	610,12	2224,8
Warmtegeleidingscoëfficiënt in W/mK	Hoog	0,52	0,666
Specifieke warmte bij 20°C in kJ/kgK	Hoog	4,72	1,573
Dynamische viscositeit mm ² /sec	Laag	154	140,3
Moleculair gewicht in g/mol	Laag	17,03	97,61
Verdampingstemperatuur 1 bar in $^{\circ}\text{C}$	-	-34	-46,1
Condensatiedruk bij 35°C in bar	Laag	13,5	16
Temperatuurtraject (glide) in K	Minimaal	0	4
Beschikbaarheid	Altijd	Altijd	Afbouwscenario
Prijs	Laag	Ja	Prijsverhoging
Giftigheid	Geen	Laag	Geen
Brandbaarheid	Geen	Laag	Geen
Explosiviteit	Geen	Klein	Geen
Geur	Geen	Ja	Geen

Tabel 2 Vergelijking van NH₃ met andere koudemiddelen

Met behulp van deze tabel kunnen ten aanzien van ammoniak de volgende conclusies getrokken worden:

- NH₃ is milieuvriendelijk: ODP = 0, GWP = 0, dus is ook de TEWI gunstig.
- Door het lage moleculair gewicht van NH₃ zijn hoge snelheden toelaatbaar. Dit resulteert in kleinere afmetingen van leidingen, compressoren en afsluiters aan hogedruk zijde. De compressor kan met veel hogere snelheden werken (bij dezelfde drukverliezen) dan bij andere koudemiddelen.
- Ten gevolge van het lage moleculairgewicht zijn ook de latente warmte en de warmteoverdrachtscoëfficiënt hoog.
- De vloeistoffilms in de verdamper en in de condensor zijn dun waardoor de warmteoverdracht zeer goed is, ook door de lage viscositeit en lage specifieke massa.
- Het rendement van de NH₃-kringloop is zeer gunstig door een hoge kritische temperatuur ($132,4^{\circ}\text{C}$) en druk (112,8 bar); hierdoor ligt de condensatiedruk nog ver van het kritische punt.
- Door de hoge kritische druk en temperatuur is NH₃ 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 (grenswaarde TGG 8 uur = 14 mg/m³ of 51 ppm), maar door zijn lage reukgrens (5 ppm) is het vaststellen van een lek in een vroeg stadium mogelijk en er kan dus tijdig ingegrepen worden. NH₃ is lichter dan lucht, in tegenstelling tot de gehalogeneerde koudemiddelen die zwaarder zijn dan lucht.
- Bij eventuele lekkages wordt NH₃ door een waterscherm geabsorbeerd.

- Bij contact met open vuur zal NH₃ 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) en de hoge benodigde ontstekingsenergie is het moeilijk om NH₃ te ontsteken. Door de National Fire Protection Association (NFPA) in America is NH₃ ingedeeld bij categorie 1 (0 is geen risico, 4 is zeer gevaarlijk).
- Buitencondities waarbij een explosief mengsel van lucht en NH₃ 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.

De PGS 13 staat voor Publicatiereeks Gevaarlijke stoffen, waarbij het getal 13 verwijst naar ammoniak als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen. De PGS 13 is een richtlijn voor de brandveilige, arbeidsveilige en milieuveilige toepassing van ammoniak als koudemiddel in koelinstallaties en warmtepompen. Het betreft technische en organisatorische voorzieningen voor deze installaties. Zie referentie 3.

Overige natuurlijke koudemiddelen

Tabel 3 geeft de andere natuurlijke koudemiddelen naast ammoniak:

R50	CH ₄	Methaan
R170	C ₂ H ₆	Ethaan
R290	C ₃ H ₈	Propaan
R600A	C ₄ H ₁₀	Isobutaan
R1270	C ₃ H ₆	Propyleen
R718	H ₂ O	Water
R729		Lucht
R744	CO ₂	Koolzuur

Tabel 3: Overige natuurlijke koudemiddelen

Koolzuur of kooldioxide

Koolzuur (R744) heeft zich als koudemiddel opnieuw gevestigd. In een cascadesysteem met bijvoorbeeld ammoniak in de hoge trap en koolzuur in de lage, is CO₂ een aantrekkelijk koudemiddel bij temperaturen vanaf -50°C. In een dergelijk systeem wordt het hoge temperatuurdeel verzorgd door een compacte unit met ammoniak waarvan de verdampers fungeert als condensor (cascadecondensor) voor de koolzuurcyclus. CO₂ kan op de lage temperatuur (bijvoorbeeld -40°C van een ammoniak koelinstallatie) als koudedragers fungeren in een pompcirculatiesysteem of als lagedruk trap met compressor van een cascadesysteem. Er dient aandacht geschonken te worden aan de ontwerpdruk omdat bij stilstand van de CO₂ installatie de temperatuur tot de omgevingstemperatuur oploopt en de daarbij behorende druk hoog kan zijn: het kritisch punt ligt op 31,1°C bij een druk van 73,8 bar.

De NPR 7601 is gericht op de veiligheid bij toepassing van kooldioxide als koudemiddel of verdampende koudedragers in stationaire koelsystemen en warmtepompen. Bij de toepassing van kooldioxide als koudedragers heeft deze praktijkrichtlijn alleen betrekking op de koudedragers kringloop. Zie referentie 4.

Water

Water of waterdamp is als koudemiddel in een koelinstallatie te gebruiken. Men heeft dan vacuüm condities nodig om gewenste koeltemperaturen te bereiken en een grote volumestroom van de compressor nodig vanwege de lage dampdichtheid. Om deze reden wordt het nauwelijks toegepast.

Water is voorts te vinden als absorptiemedium of absorbent in absorptiekoelmachines (LiBr systemen of in combinatie met ammoniak). Zie ook de bijlage van de Best Practice Koudetechniek.

Er zijn diverse technieken in gebruik die op een zeer effectieve manier gebruik maken van verdampingskoeling (warmte onttrekking door waterverdamming naar de lucht). De toepassing beperkt

zich in de meeste gevallen tot comfortkoeling van fabrieken, werkplaatsen en kantoren. De haalbare inblaasttemperatuur is in warme zomers 21 tot 22 °C bij een buitenconditie van 30°C en een relatieve vochtigheid van 40%.

Eén van de laatste ontwikkelingen is een dauwpuntskoeling 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 verdampte water af naar de omgeving, terwijl het resterende 2/3 deel via een warmtewisselaar tot dichtbij de natte boltemperatuur wordt gekoeld en aan de werkrimte wordt toegevoerd. De ruimtelucht wordt tevens in het warme jaargetijde voor 100% ververs. In vergelijking met een mechanisch gekoelde airconditioning heeft dit systeem een goede energie-efficiëntie.

Propaan

Propaan heeft als koolwaterstof koudemiddel eigenschappen die vergelijkbaar zijn met het bekende koudemiddel R22 (HCFK). Het kan in vergelijkbare koelinstallaties toegepast worden als die van synthetische koudemiddelen. De aandacht voor dit koudemiddel bij de toepassing ligt bij de brandbaarheid en dus veiligheid. De veilige toepassing van dit koudemiddel in koelinstallaties is opgenomen in de NPR 7600:2013 nl voor koolwaterstoffen koelsystemen en warmtepompen De praktijkrichtlijn NPR 7600 heeft betrekking op het primaire, koudemiddelhoudende, systeem en eventueel aanwezige secundaire systemen (gevuld met een circulerende koude- of warmtedrager), inclusief de bijbehorende opstellingsplaats. De praktijkrichtlijn is gericht op de veiligheid en heeft daardoor betrekking op ontwerp, installatie, oplevering, gebruik, onderhoud, inspectie, keuring en ontmanteling.

Brandbaarheid van 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.

De veilige toepassing van natuurlijke koudemiddelen in koelinstallaties is opgenomen in de NPR 7600:2013 nl voor toepassing van koolwaterstoffen als koudemiddel in koelsystemen en warmtepompen en de NPR 7601:2013 is gericht op de toepassing van kooldioxide als koudemiddel of verdampende koudedragers. Zie referentie 4.

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.

10. Aandacht bij vervanging koudemiddel in bestaande installaties

Andere koudemiddelen plaatsen in bestaande installaties kent tal van grenzen en risico's, aandachtspunten zijn:

- Temperatuurgebied moet passend zijn voor verdampen en condenseren in relatie tot het proces.
- Nieuw olie-type is nodig, reinigen installatie is nodig, geschiktheid olie met pakkingen en andere materialen moet gecontroleerd worden of zo nodig onderdelen vervangen.
- Volumetrische koudecapaciteit (dichtheid koudemiddelgas)(aanpassing slagvolume compressor, appendages en leidingen).
- Rendement of COP verandering ten opzichte van het oude koudemiddel
- Geschiktheid van het koudemiddel met pakkingen en andere materialen
- Wel of geen glide bij verdampen en condenseren heeft invloed op de werking en rendement van de warmtewisselaar.
- Vraag advies maar ook garanties van de leveranciers van de koelinstallatie.

Een toegankelijk overzicht van alternatieven voor de synthetisch koudemiddelen met hoge GWP wordt gegeven in het Koudemiddelen rapport dat fabrikant Bitzer jaarlijks uitgeeft. Zie tabel 4 en referentie 6.

HFO koudemiddelen (R1234yf en ze) zijn relatief nieuw op de markt. HFO staat voor **hydrofluoroolefine**. HFO-1234yf is een onverzadigde fluorkoolwaterstof met formule C₃H₂F₄. Deze stoffen hebben een lage GWP en zijn daarmee een alternatief voor HFK's met een hoge GWP. Ze worden voornamelijk gebruikt in de kleinere installaties (airconditioning). Er bestaat echter bezorgdheid over het afbraakproduct Trifluorazijnzuur (TFA) bij grootschalig gebruik [8] (zie ook paragraaf 11).

HFO and HFO/HFC Blends

Current Refrigerants	Alternatives				
	ASHRAE Classification	Trade name	Composition (with blends)	Detailed Information	
R134a	R1234yf ^①	various	–	pages 24...26, 38...41	
	R1234ze(E) ^①	various	–		
	R513A	Opteon® XP10	DuPont		R1234yf/134a
	R450A	Solstice N-13	Honeywell		R1234ze(E)/134a
	–	ARM-42 ^①	Arkema		R1234yf/152a/134a
–	AC5X	Mexichem	R32/1234ze(E)/134a		
R404A/R507A*	R449A	Opteon® XP40	DuPont	R32/125/1234yf/134a	
	R448A	Solstice N-40	Honeywell	R32/125/1234yf/1234ze(E)/134a	
	–	ARM-32b	Arkema	not disclosed	
	–	LTR4X	Mexichem	R32/125/1234ze(E)/134a	
R22/R407C*	–	DR-91	DuPont	not disclosed	
	–	Solstice N-20	Honeywell	R32/125/1234yf/1234ze(E)/134a	
	–	ARM-32c	Arkema	not disclosed	
R410A	R32 ^①	various	–	pages 24...26	
	–	Opteon® XL41 ^①	DuPont		R32/1234yf
	R447A ^①	Solstice L-41 ^①	Honeywell		R32/125/1234ze(E)
	–	ARM-71a ^①	Arkema		not disclosed
	–	HPR1D ^①	Mexichem		R32/1234ze(E)/CO ₂

Tabel 4: HFO koudemiddelen (R1234yf en ze) met lage GWP als alternatief voor HFK met hoge GWP (Bron Bitzer)

11. Koudemiddelen voor nieuwe installaties

Een goed koudemiddel kiezen vraagt een gedegen afweging zoals uit bovenstaande verhandeling blijkt. Koudemiddelen voor de toekomst zullen een hoog rendement moeten opleveren en een lage GWP hebben (bijvoorbeeld < 150) zoals:

- Natuurlijke koudemiddelen zoals: NH₃ (R717), koolwaterstoffen bv. propaan (R270), CO₂ (R744), lucht
- Synthetische koudemiddelen met lage GWP, zoals HFO koudemiddelen met GWP <150 als vervanger van R134a, zijn technisch gezien een vervanger van R134a. HFO's hebben een lage GWP daar zij in korte tijd in de atmosfeer afgebroken worden en Trifluorazijnzuur (TFA) vormen. Dit is een stabiele stof die niet in de natuur hoort en schadelijk is voor levende organismen in waterig milieu. De effecten ten gevolge van grootschalig gebruik van HFO's zijn nog onduidelijk [8]. Het op grote schaal inzetten van deze stof lijkt niet aantrekkelijk.

De koudemiddelinhoud van de installatie dient zo laag mogelijk te zijn, dit kan door:

- Systeemkeuze (directe expansie, decentrale units, kleine vloeistof- en afscheidervaten)
- Platenwarmtewisselaars of microchannel warmtewisselaars toepassen voor verdampers en condensoren
- Koudedragers toepassen (indirect systeem): bv. glycol soorten tot -20°C, organische zouten (Pekasol, Freezium, Temper) tot ca. -30°C, bietensap (Thermera) tot ca. -40°C. Het energieverbruik neemt toe door een extra temperatuur-stap en door pompvermogen. Door goede pompselectie, deellast-regeling en klein temperatuurverschil op de warmtewisselaars kan het extra energieverbruik beperkt blijven.

Het is vanzelfsprekend dat het lekdicht zijn van de installatie en een verantwoorde verwerking van het koudemiddel tot de basiseisen van de koudetechniek behoren.

Ter illustratie wordt in tabel 5 per toepassingsgebied aangegeven welk koudemiddel gebruikt kan worden. Zie ook de tabellen in paragraaf 8 en referentie 6.

Temperatuurgebied	Toepassingsgebied			
	Industrie	Semi-industrie	Luchtbehandeling	Transport
Boven -5°C	Ammoniak R134a, HFO	Ammoniak Koolwaterstoffen Koolzuur	R134a R407C Ammoniak, Propaan, HFO	R134a CO ₂ ,Lucht, HFO
0°C tot -40°C	Ammoniak, CO ₂			
Onder -40°C	CO ₂ , Propaan, Propyleen			

Tabel 5 Koudemiddelen per toepassingsgebied

12. Referenties en links

Dit is een publicatie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl).

In de periode 2000 - 2002 heeft de VNCI een reeks brochures uitgebracht onder de verzamelnaam "Leidraad voor energie-efficiency". In de reeks worden dertig verschillende bestaande praktische toepassingen beschreven van energiebeheer in chemische bedrijven. Deze publicatie, 'Best Practice Koudemiddelen voor Industriële Koeling' is een actualisering van het document 'Leidraad voor energie efficiency, Koudemiddelen voor Industriële Koeling', ee12.

De huidige actualisering van de Best Practice is tot stand gekomen in het kader van meerjarenafspraken energie-efficiëntie MJA3 en MEE. Als onderdeel van de samenwerking met de VNCI is besloten het merendeel van deze Best Practices geactualiseerd opnieuw te publiceren. Deze Best Practice Koudemiddelen voor Industriële Koeling is geactualiseerd met medewerking van KWA Bedrijfsadviseurs www.kwa.nl .

De meerjarenafspraken energie-efficiëntie MJA3 en MEE zijn overeenkomsten tussen de overheid en bedrijven, instellingen en gemeenten. Het ministerie van Economische Zaken (EZ) het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) stimuleren met deze afspraken het effectiever en efficiënter inzetten van energie. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) is verantwoordelijk voor de uitvoering van de meerjarenafspraken.

Waar geen bronvermelding is aangegeven bij de tabellen en figuren is gebruik gemaakt van het oorspronkelijke document.

Er is gebruik gemaakt van algemene documentatie en brochures van leveranciers en fabrikanten. Dit is aangegeven bij de figuren en tabellen. Tabellen zonder vermelding zijn geactualiseerd vanuit van het eerdere document "Leidraad voor energie efficiency, Koudemiddelen" ,ee29, 2001/12

1. <http://www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/stoffen/ozon-gassen/overzicht-wet/>
2. <http://www.area-eur.be>
3. www.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl.nl.

4. <http://www.nen.nl/NEN-Shop/Vakgebieden/Machinebouw-Transport/Actualiteiten-Machinebouw-Transport/NPR-7600-en-NPR-7601-voor-Koelinstallaties-gepubliceerd.htm>
5. <http://www.koudecentraal.nl/documents/handboekkoudetechniek/D%20TEWI%20-%20Totaal%20Equivalent%20Broeikaseneffect%20van%20koelinstallaties.pdf>
6. <https://www.bitzer.de/documentation/a-501-18.pdf>
7. <https://www.ashrae.org/standards-research--technology/standards--guidelines/titles-purposes-and-scopes>
8. http://www.eia-international.org/wp-content/uploads/EIA_FGas_Report_0412_FINAL_MEDRES_v3.pdf

Colofon

Dit is een publicatie van:

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
Prinses Beatrixlaan 2 | 2595 AL Den Haag
Postbus 93144 | 2509 AC Den Haag
T +31 (0) 88 042 42 42
F +31 (0) 88 602 90 23
E info@rvo.nl
www.rvo.nl

Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van Economische Zaken (EZ) het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M)

© Rijksdienst voor Ondernemend Nederland | juli 2015
Publicatienummer: RVO-102-1501/RP-DUZA

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) stimuleert duurzaam, agrarisch, innovatief en internationaal ondernemen. Met subsidies, het vinden van zakenpartners, kennis en het voldoen aan wet- en regelgeving. RVO.nl werkt in opdracht van ministeries en de Europese Unie.

RVO.nl is een onderdeel van het ministerie van Economische Zaken.

Hoewel deze publicatie met de grootst mogelijke zorg is samengesteld kan RVO.nl geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele fouten.