



Best Practice Koudetechniek

1. Inleiding

Met behulp van koelinstallaties is het mogelijk om processen, producten of ruimten te koelen en de daarbij vrijkomende warmte weer aan de omgeving af te staan of als restwarmte te gebruiken. De temperaturen liggen daarbij onder de circa 10°C. Dit vakgebied heet de koudetechniek.

Deze best practice behandelt de ontwerpcondities voor de keuze van een koelinstallatie, vooral met het oog op de energie-efficiëntie. Daarbij komen de gebruikelijke typen koelmachines (compressie en absorptie), de componenten van de koelinstallaties en de wijze waarop de vrijkomende warmte weer afgestaan wordt (water- of luchtkoeling, warmteterugwinning) aan de orde.

Een overzicht voor de keuze van het in de koelmachine circulerende koudemiddel is reeds in de brochure 'Koudemiddelen voor Industriële koeling' beschreven. In de best practice 'Warmtepompen' wordt de toepassing van warmtepompen behandeld.

2. Vuistregels

Hieronder worden enige vuistregels gegeven waarmee u kunt nagaan of de koudetechnische installaties aandacht nodig hebben.

- Reduceer de benodigde [koudevraag](#) voor koelinstallaties; dat wil zeggen pas goede isolatie toe, reduceer deurverliezen, elimineer ontdooiverliezen, vermijd interne warmtebronnen (ventilatoren, pompen, verlichting) in een gekoelde ruimte, maak gebruik van de koudere buitenlucht voor koeling, pas warmte/koude opslag in de bodem toe (13°C).
- Kies voor een efficiënte koelcyclus; het koudemiddel ammoniak is zeer efficiënt, [vloeistofonderkoeling](#) toepassen (b.v. middels een economiser), [tweetrapssystemen](#) bij vriesinstallaties.
- Realiseer een hoge [verdampingstemperatuur](#) en een lage condensatietemperatuur. In het temperatuurgebied tussen de circa -25°C en 40°C stijgt de [COP](#) met circa 2,5 % per graad stijging van de verdampingstemperatuur en stijgt de COP 2,5 % per graad daling van de condensatietemperatuur. Dit effect is enorm op het rendement. Afhankelijk van het ontwerp van de verdampers ligt de verdampingstemperatuur circa 2 K tot 8 K onder de procestemperatuur. Afhankelijk van het ontwerp van de condensor ligt de condensatietemperatuur circa 6 K tot 10 K boven de omgevingstemperatuur. De condensatietemperatuur dient de variaties van de omgevingstemperatuur te volgen.
- Gebruik [efficiënte compressoren](#), motoren, ventilatoren en pompen. Op jaarbasis kunnen ventilatoren en pompen makkelijk 40% van het energieverbruik van de compressoren bedragen.
- Pas een goede [regeling](#) op de installatie toe. De installatie is veelvuldig in deellast, daar is dan ook de meeste energie te besparen. Bij directe expansiesystemen biedt een elektronische expansieventiel een efficiënte regeling.
- Gebruik de [warmte](#) die de koelinstallatie kwijt moet op nuttige wijze. Dit kan door warmte aan de condensor te onttrekken, hetzij door een persgaswarmtewisselaar toe te passen, hetzij door warmte af te voeren uit de oliekoeler van een schroefcompressor. Een koelinstallatie kan ook warmte op een hogere temperatuur leveren maar dat gaat ten koste van de COP. Niettemin is verwarmen met een warmtepomp binnen zekere temperatuurgrenzen energetisch beter dan verwarmen met een directe stook aan fossiele brandstof (zie ook de Best Practice Warmtepompen).

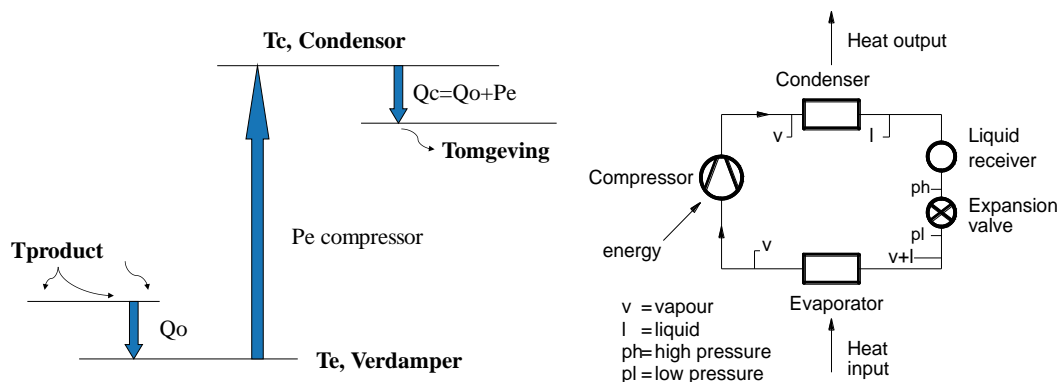
3. Koelsystemen en componenten

Aangezien in de meeste gevallen compressiekoelmachines worden toegepast, is hier alleen dit type beschreven. In bijlage 1 wordt kort ingegaan op de absorptiekoelmachines als alternatief systeem voor koude-opwekking.

Als het doel is om warmte aan een proces of ruimte te onttrekken en daarna aan de omgeving af te staan, dan wordt gesproken van een koelinstallatie. Is het de bedoeling om warmte-energie van een laag temperatuurniveau naar een hoger niveau te brengen en daarna te gebruiken, dan is er sprake van een warmtepomp.

3.1 Compressiekoelmachine

Bij de *compressiekoelmachine* wordt het gasvormig koudemiddel met een compressor op de condensordruk gebracht, vervolgens wordt het hete gas in een condensor vloeibaar gemaakt en na een expansiestap (meestal in de vorm van een expansieventiel) in de verdamper bij lage temperatuur verdampt, zie figuur 1.



Figuur 1: Principeschema compressiekoelmachine, de temperatuurlift en de gesloten koelcyclus (bron KWA)

Als Q_o het koelvermogen van de koelinstallatie is dat de verdamper opneemt en P_e het opgenomen vermogen van de compressormotor, dan zegt de eerste hoofdwet van de thermodynamica:

Het vermogen dat de condensor afstaat: $Q_c = Q_o + P_e$ (kW)

Binnen de chemische industrie, maar ook daar buiten, worden voornamelijk compressiekoelinstallaties gebruikt voor proceskoeling, luchtbehandeling en gekoelde opslag. Daarbij vormen de koudwatermachines of chillers voor water tussen 2 en 6°C, die vooral toegepast worden in luchtbehandelingsinstallaties, de grootste groep. Ze zijn leverbaar als lucht- of watergekoelde standaardapparaten met capaciteiten van 20 tot 7000 kW. Voor de kleinere apparaten (van 20 tot 200 kW koelvermogen) worden zuigercompressoren gebruikt; schroefcompressoren worden toegepast vanaf 200 kW tot 2000 kW koelvermogen. Voor deze watergekoelde chillers is een COP mogelijk van 5 (in deellast tot 7), dat wil zeggen een energieverbruik van 0,2 kW per kW koelvermogen. Met centrifugaal compressoren voor koudwatermachines zijn koelcapaciteiten te realiseren van 1200 kW tot 7000 kW, deze machines halen eveneens een COP van 5,0.

Koelinstallaties voor gebruik in (chemische) processen, waarbij meestal veel lagere temperaturen vereist zijn dan bij koudwatermachines, zijn in het algemeen op specificatie gebouwde apparaten met een aangepaste verdamper en met de mogelijkheid om een optimale koelmachine met hoge energie-efficiëntie te laten ontwerpen en installeren. Enkeltraps zuigercompressoren zijn verkrijgbaar vanaf 200 W (1 cilinder) tot 2000 kW koelvermogen (12 cilinders), de tweetrapsuitvoering tot 500 kW. Enkeltraps schroefcompressormachines zijn beschikbaar met koelcapaciteiten van 40 tot 6000 kW en in tweetrapsuitvoering van 200 kW tot 3000 kW.

De koudefactor of COP

Het energetisch rendement van een compressie koelinstallatie wordt bij voorkeur uitgedrukt als de Coëfficiënt of Performance (COP) of koudefactor.

$COP = Q_o / P_e$, waarin:

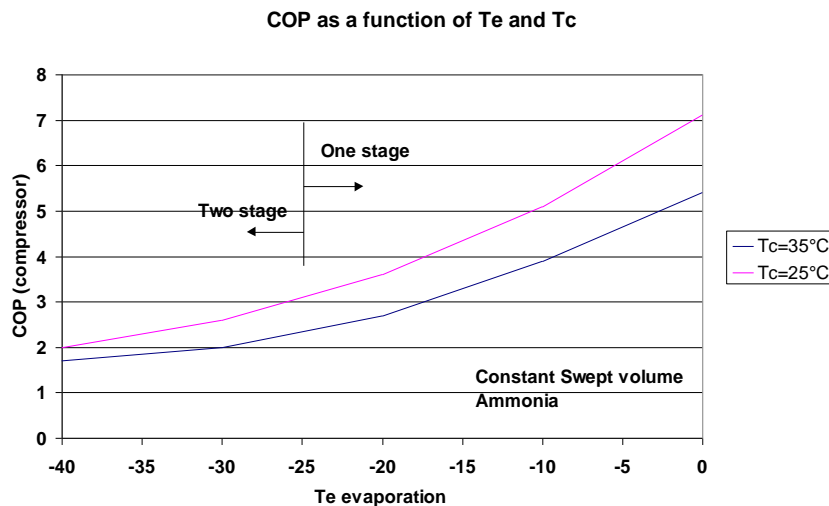
Q_o = koelvermogen van de koelinstallatie in kW.

P_e = opgenomen vermogen in kW

De COP van een complete koelinstallatie (d.w.z. compressoren incl. pompen en ventilatoren) is sterk afhankelijk van:

- de verdampings- en condensatietemperatuur en in het bijzonder het temperatuurverschil (drukverschil);
- het koudemiddel bij compressie-installaties;
- het type compressor en de regeling;
- de energie-efficiëntie van pompen en ventilatoren in het systeem.

De belangrijkste invloed op de COP heeft de keuze van de condensatie- en verdampingstemperatuur van het koelproces. De relatieve invloed van die temperatuurkeuze is in figuur 2 weergegeven.



Figuur 2: Invloed van de keuze van condensatie- (T_c) en verdampingstemperatuur (T_e) op de COP voor een ammoniak zuigercompressor met een vast slagvolume (m^3/h) (bron KWA)

Naast de term COP wordt de EER (energy efficiency ratio) gebruikt. Er zijn stromingen die de EER bij koeling gebruiken en de COP bij verwarming. De COP bij verwarming wijkt af van de hier gedefinieerde COP bij koeling. $COP(warmte) = (Q_o + P_e) / P_e = COP + 1 = EER + 1$. Daarnaast kent men de SEER (seasonal energy efficiency ratio). Dit getal is een maat voor de efficiëntie van een apparaat over een koelseizoen in een bepaald klimaatgebied (rekening houdend met buitenluchttemperatuur, deellast/vollast). Deze cijfers zijn meer voor airconditioning van belang (deellast in koelvraag ontstaat door lagere buitenluchttemperatuur), minder voor industriële installaties (deellast wordt bepaald door het proces en heeft weinig met de buitentemperatuur te maken).

3.2 Werkgebied en Ontwerpcndities

Hoewel er geen scherpe grens te trekken is tussen de diverse werkgebieden van de industriële koudetechniek wordt globaal de volgende indeling gehanteerd:

- comfort luchtbehandeling (airconditioning): van + 15 tot +25°C;
- proceskoeling van +15 tot -10°C;
- proceskoeling van -10 tot -40°C;
- diepkoeling van processen van -40 tot -100°C;
- cryogene processen, zoals vloeibare gasscheiding, lager dan -100°C.

De meeste industriële proceskoeling bevindt zich in het gebied tussen +12 en -40°C, terwijl gekoelde opslag plaats kan vinden tussen +15 en -40°C.

Door de eisen, die het te koelen proces stelt, te optimaliseren is het mogelijk om een koelinstallatie met een hoge energie efficiëntie te ontwerpen. Naast de reeds genoemde factoren die bepalend zijn voor de COP zijn de kritische ontwerpfactoren:

- de verdampings- en condensatietemperatuur;
- de koelbelasting;
- bepalen koelmachinecapaciteit;
- het gekozen ontwerp voor het koelsysteem;
- keuze koudemiddel;
- milieutechnische en veiligheidsaspecten.
- de besturing of regeling van de installatie en de instrumentatie

Op al deze factoren wordt in de nu volgende paragrafen nader ingegaan.

Verdampings- en condensatietemperatuur

De keuze van de procestemperatuur is bepalend voor de *verdampingstemperatuur* van de koelinstallatie en daardoor mede voor de energie-efficiëntie van de koudeopwekking. Elke graad (mogelijke) temperatuurverhoging van het proces levert een energiebesparing van 2 – 3% op het energieverbruik van de compressor. Ook is de toelaatbare tolerantie op die procestemperatuur van belang voor de vorm waarin de proceskoeler moet worden uitgevoerd.

- Als de koudemiddelinhoud van de koelinstallatie en veiligheidsaspecten het toelaten, kan de proceskoeler als *directe verdamper* voor het koudemiddel van de koelmachine uitgevoerd worden (proceskoeler direct met een koudemiddel gekoeld (pompcirculatiesysteem of middels zwaartekrachts circulatie of middels direct expansie). Door zuigdrukregeling is dan een min of meer constante verdampingstemperatuur te handhaven, waarbij de temperatuur circa 2 à 8 K onder de procestemperatuur kan liggen.
- Indien de procestemperatuur een klein temperatuurverschil tussen koelmedium en te koelen product toelaat, kan de proceskoeler via een *koudedrager* als secundair koelmiddel (glycol, pekels of speciale koudedragers) gekoeld worden (zie ook verder). In dat geval is er een temperatuurverloop tussen in- en uitlaatstroom van de koudedrager. De temperatuur van het proces is dan regelbaar door debietregeling van het secundaire koelmiddel. Bij dit systeem is een aanmerkelijke besparing op de koudemiddelinhoud mogelijk met positieve milieueffecten, het transport van de koude-energie vindt immers plaats door een koudedrager en niet door het koudemiddel. Dit systeem is door het pompvermogen en de grotere temperatuurverschillen minder efficiënt dan het directe systeem.

De *condensatietemperatuur* is afhankelijk van het medium waarmee de vrijkomende warmte van de condensor kan worden afgevoerd, meestal is dat medium koelwater of omgevingslucht, soms een stofstroom die gebruik kan maken van deze restwarmte.

In de best practice 'Waterkoeling' en 'Luchtgekoelde warmtewisselaars' wordt nader op deze aspecten ingegaan.

Het verdient aanbeveling de keuze van de condensatietemperatuur goed te evalueren, omdat deze invloed heeft op de volgende factoren:

- de energie-efficiëntie van de koelinstallatie;
- de afmetingen van de condensor;
- de investeringskosten;
- de geluidsemmissie van de (luchtgekoelde) condensor,

Het effect van de procestemperatuur (t_p) en de condensatietemperatuur (t_c) op de COP is voor een schroefcompressor in tabel 1 geïllustreerd. Voor een zuigercompressor zijn deze waarden iets lager.

Elke graad verlaging van de condensatietemperatuur komt overeen met een besparing van 2 tot 3% op het energiegebruik van de compressor.

Conditie	Koudemiddel	Koelvermogen	Opgenomen vermogen	Koudefactor COP
-5 / 30	NH3	1400	255	5,5
-20 / 30	NH3	1400	425	3,3

Tabel 1. Effect van proces- en condensatietemperatuur op de koudefactor bij een schroefcompressor

Koelbelasting

De koelbelasting is de hoeveelheid warmte die uit het proces (of productopslag) afgevoerd dient te worden om de gewenste temperatuur te handhaven. Om de koelbelasting te kunnen vaststellen dient het vereiste koelvermogen gedurende de bedrijfstijd bekend te zijn of zo goed mogelijk te worden geschat. Daarbij dient onderscheid gemaakt te worden in dag-, maand- en jaarbelasting met de te verwachten maxima en minima en de frequentieverdeling daarvan gedurende de bedrijfstijd.

De maximale energie-efficiëntie wordt bereikt wanneer de koelbelasting zo laag mogelijk is in combinatie met de optimale keuze van de koelinstallatie. Van belang zijn hierbij:

- de *procestemperatuur*, door deze zo hoog mogelijk vast te stellen, kan de verdampingstemperatuur van het koudemiddel zo efficiënt mogelijk gekozen worden;
- *procestemperaturen* groeperen, indien er in het proces diverse temperaturniveaus gewenst zijn, is het raadzaam te trachten deze in bijvoorbeeld twee temperatuurgroepen samen te voegen, zodat een tweetrapskoelmachine (c.q. een schroefcompressor met economiser) overwogen kan worden;
- de *piekbelasting*, om het benodigde koelvermogen te optimaliseren kan de piekbelasting (bijvoorbeeld bij batchprocessen) verminderd worden door het toepassen van koudebuffers;
- *energieverliezen minimaliseren*, door een optimale isolatie van de gebruiker(s) en het leidingwerk. Koude-isolatie stelt hoge eisen aan onder andere de dampdichtheid. Meer informatie hierover is te vinden in de brochure 'Isolatie';
- *trapsgewijze koeling*, het procesmedium kan voorgekoeld worden via een minder energie-intensieve methode door een andere processtroom die kouder is. Daarna het procesmedium op de vereiste temperatuur brengen door middel van een koelinstallatie;
- *pompen en ventilatoren* alleen in bedrijf laten indien noodzakelijk (dit vermogen moet de koelmachine ook afvoeren);
- *roterende apparatuur* bij sterk variërende debieten voorzien van een toerenregeling.

Bij een *gekoelde productopslag* in gebouwen is de koelbelasting door het product dat opgeslagen wordt meestal relatief klein, maar kan de totale koelbelasting verlaagd worden door:

- de *warmtebelasting* via wanden, vloer en dak te verminderen, het aandeel hiervan in de koelbelasting is circa 20% waardoor een betere isolatie al spoedig rendabel kan zijn;
- *het aantal luchtwisselingen ten gevolge van het openen en sluiten van de deuren te optimaliseren*, dit vormt 30% van de koelbelasting en deze kan verminderd worden door luchtsluisen of strippengordijnen en door automatische deuren;
- *de belasting door verdamperventilatoren te verminderen*, zij vormen circa 15% van de belasting; dit kan verbeterd worden door toepassing van hoogrendementsventilatoren, of ventilatoren met grotere diameters waardoor lagere toerentallen mogelijk zijn en door aan-/uitschakeling naar behoefte. Evenzo is variabele toerenregeling energiebesparend;
- *de verlichting te optimaliseren*, deze vormt 10% van de koelbelasting en is te verminderen door hoogrendementsverlichting (b.v. LED verlichting) en tijdige uitschakeling;
- *het verbeteren van de ontdooicyclus* als de verdamper in de opslagruimte is geplaatst. Dit kan soms voor 15% van de belasting verantwoordelijk zijn indien, ook nadat al het ijs reeds gesmolten is, het ontdooisysteem niet automatisch afschakelt.

Bij een *gekoelde productopslag* in tanks is met name de warmtebelasting vanuit de omgeving via de wanden, de vloer en het dak relevant.

Bepalen koelmachinecapaciteit

Om te voorkomen dat een koelinstallatie met een te ruim of te krap koelvermogen ontworpen wordt, is het van belang om de belasting/tijd-kromme voor de koudevraag zo nauwkeurig mogelijk vast te stellen, rekening houdend met toekomstverwachtingen. De gewenste koelmachinecapaciteit wordt vaak vastgesteld met een onzekerheidsmarge van 10%.

Indien er relatief grote capaciteitsverschillen te verwachten zijn (o.a. door seizoeninvloed en batchprocessen) kan overwogen worden om een systeem te kiezen met meerdere (parallel geschakelde) compressoren. Door de te verwachten maximum en minimum condities vast te stellen, is dan het aantal compressoren te bepalen.

Om een te grote overdimensionering te vermijden is het raadzaam om:

- uit te gaan van betrouwbare gegevens over de verwachte gebruikswijze van de installatie;
- de koelbelasting te (laten) bepalen aan de hand van vaktechnische handboeken;
- de koelmachinecapaciteit zo dicht mogelijk bij de operationele capaciteit te kiezen;
- apparatuur te specificeren van gecertificeerde leveranciers die koelers en/of condensoren leveren overeenkomstig *Eurovent*, waarmee een genormaliseerde prestatiegarantie gegeven wordt voor geluid en capaciteit.

Ten gevolge van het wijdverbreide gebruik van koelinstallaties is het mogelijk om de vereiste machine te selecteren uit de ter beschikking staande standaardtypen van diverse leveranciers, of om een geheel aan de specifieke wensen aangepaste installatie te laten ontwerpen en bouwen door een koeltechnische apparatenbouwer.

Bij een aangepast ontwerp is het mogelijk om een optimale energie-efficiëntie te bereiken en een zo goed mogelijke integratie in het proces te realiseren. Tevens is dan de plaats van delen van de apparatuur, zoals compressor, condensor en verdamper, min of meer vrij te kiezen.

Een standaardmachine heeft als voordeel dat de investeringskosten lager zijn, maar de energie-efficiëntie is niet altijd optimaal.

3.3 Ontwerp van het koelsysteem

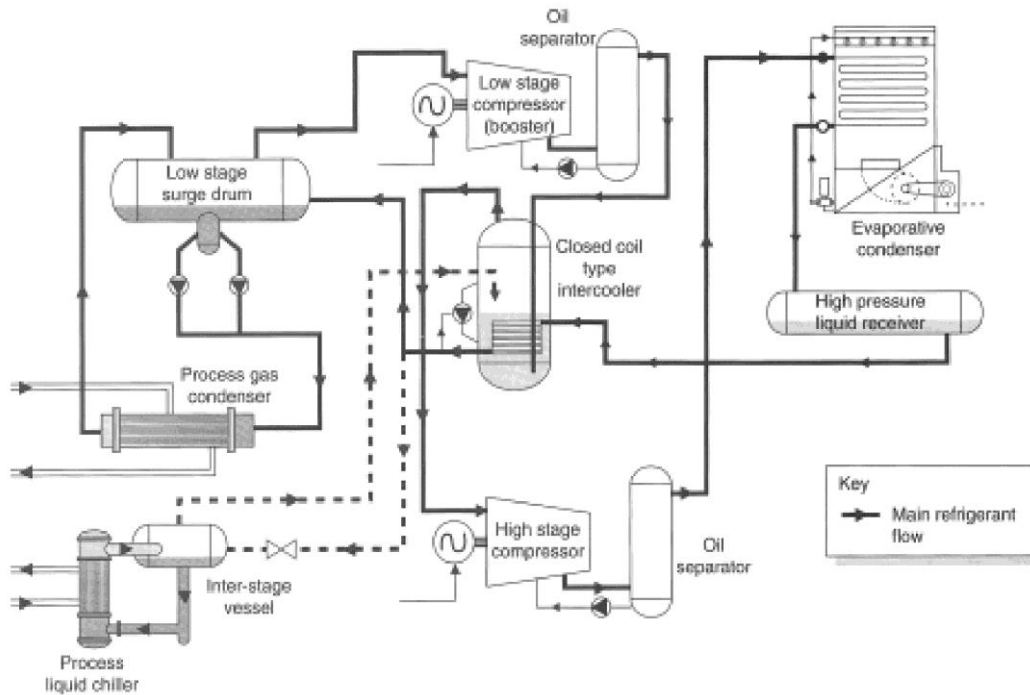
Bij het ontwerpen van een koelsysteem dat met een hoge energie-efficiëntie aan alle eisen van het bedrijfsproces kan voldoen, staat een veelheid aan mogelijkheden ter beschikking, zie paragraaf 10 met referenties. Niet alleen is er de keus tussen compressie- en absorptiemachines, maar ook:

- één- of meertrapscompressie, cascadesysteem;
- onderkoeling na condensatie en oververhitting na verdamping;
- gebruik van de restwarmte uit de installatie.

Één- of meertrapscompressie, cascadesysteem

De keuze van één- of meertrapscompressie, c.q. een cascade-systeem als het koelproces met de beste energie-efficiëntie, hangt meestal af van de drukverhouding tussen de condensatie- en verdampingsdruk. Bij zuigercompressoren bijvoorbeeld is de maximale drukverhouding circa 1:10. Daarboven wordt de compressie zó inefficiënt, en daardoor de compressie eindtemperatuur zó hoog, dat de gebruikelijke smeeroliën instabiel worden.

Een oplossing voor dit probleem vormt dan het tweetrapscompressiesysteem volgens figuur 3. Met dit systeem is op een efficiënte wijze een grotere drukverhouding te bereiken bij normale persgastemperaturen van de compressoren.



Figuur 3: Schema van een tweekompressie-installatie

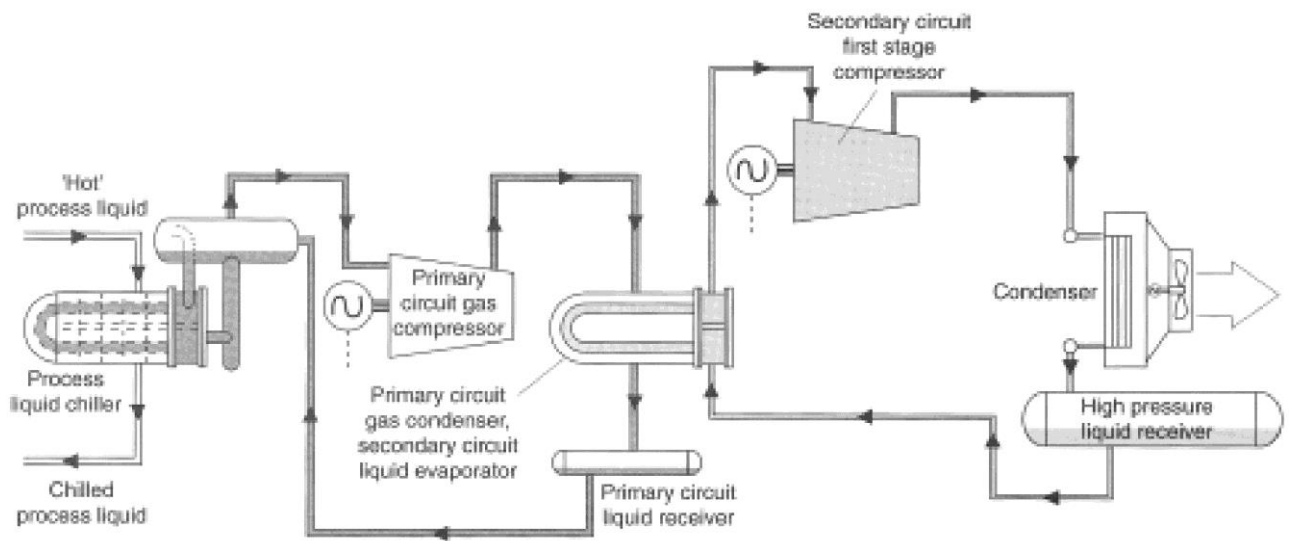
In een tweekompressie-installatie wordt het hete gas afgekoeld tot de verzadigingstemperatuur behorend bij de tussendruk van de twee compressoren, terwijl het in de intercooler een vloeistofbad passeert, dan wel tot dichtbij die verzadigingstemperatuur door vloeistofinjectie. Om de capaciteit van de compressor te verhogen en de COP te verbeteren, wordt vaak in de intercooler (economiser) gelijktijdig het vloeibare koudemiddel van het hoge druk vloeistofvat of de condensor onderkoeld, op weg naar het expansieventiel en de verdamper.

Een schroefcompressor kan met grotere drukverhoudingen omgaan dan een zuigercompressor, omdat er gekoeld wordt door grote hoeveelheden olie in de compressor te injecteren. Het nadeel hiervan is dat er extra koeling voor de olie vereist is. Bij moderne machines wordt de olie op druk gehouden door:

- de persdruk waarmee de olie in de compressor wordt geïnjecteerd; dit is vooral van toepassing bij standaardmachines. De condensatietemperatuur mag hierbij niet onder de 23°C dalen (mede afhankelijk van de verdampingstemperatuur);
- een aparte oliepomp waarmee de olie, die aan de perszijde is afgescheiden aan de zuigzijde, weer in de compressor geïnjecteerd wordt. Dit is gebruikelijk bij industriële machines, waardoor de condensatietemperatuur tot 10°C kan dalen.

De enorme hoeveelheden olie die in het verleden nodig waren, zijn hierdoor in de huidige schroefcompressoren enigszins teruggebracht, maar nog niet tot dezelfde verhoudingen als bij de zuigermachines. Oliekoeling vindt plaats in een gedeelte van de luchtgekoelde condensor of door middel van een platenwarmtewisselaar bij watergekoelde systemen. Ook bij schroefcompressoren is het mogelijk om een hogere energie-efficiëntie te behalen door het gebruik van een economiser systeem met de hiervoor beschreven tussenkoeling.

Voor toepassingen waarbij de verdampingstemperatuur lager is dan -50°C, vormt om vele redenen, waaronder energie-efficiëntie, het cascadesysteem de beste oplossing, zie figuur 4.



Figuur 4: Schema cascade compressiesysteem

In het cascadesysteem is het lagedruk (eerste trap) koudemiddel zó gekozen, dat het gas bij de gewenste verdampingsdruk een redelijke aanzuig dichtheid heeft. De condensor van de eerste trap funktioneert als de verdampers voor de tweede trap, welke een conventioneel koudemiddel in de (gescheiden) kringloop heeft. Dat conventionele koudemiddel (bijvoorbeeld ammoniak) heeft een acceptabele persdruk van de compressor en condenseert bij de normale (omgevings)temperatuur van lucht of koelwater. Een voorbeeld van een typische toepassing van tweetraps cascade koeling is het vloeibaar maken van ethyleen (-170°C).

Onderkoeling na condensatie en oververhitting na verdamping

Onderkoeling van het gecondenseerde koudemiddel is alleen mogelijk bij installaties met vloeistofvat en gebruik gemaakt wordt van een warmtewisselaar in de vloeistofleiding na het vloeistofvat. Door het gecondenseerde koudemiddel bij de condensordruk te koelen tot beneden de verzadigingstemperatuur ontstaat een *onderkoelde vloeistof*. Hierdoor wordt de energie efficiëntie verhoogd en extra koelcapaciteit verkregen zonder dat meer (elektrische) energie verbruikt wordt.

Daarnaast is onderkoeling vooral van belang om het ontstaan van ontspanningsdamp (flashgas) in de vloeistofleiding vóór de expansieventielen te voorkomen.

In een enkeltraps compressiesysteem is onderkoeling te realiseren door middel van:

- de condensor, als de warmteafvoer van het koudemiddel na condensatie in een aparte onderkoelingsbundel voortgezet wordt en is alleen mogelijk indien de condensor voor die bundel een vloeistofvat heeft ingebouwd. In de praktijk voert men dit niet effectief uit;
- het gebruik van een aparte nakoeler na het vloeistofvat;
- de vloeistofleiding tot het expansieventiel, als de ongeïsoleerde leiding daarbij warmte kan afstaan aan de omgeving. Ook kan met een separate warmtewisselaar de gecondenseerde vloeistof onderkoeld worden door het koude gas in de zuigleiding naar de compressor. Dit kan energetisch negatief uitpakken afhankelijk van het type koudemiddel.

Bij een tweetrapscompressiesysteem kan het koudemiddel van de tussentrap gebruikt worden om de vloeistof uit het vloeistofvat te onderkoelen, figuur 4. Bij een warmtewisselaar vindt dan afkoeling plaats tot circa 5 K boven de verzadigingstemperatuur van de tussentrap en bij een koeler met ontspanningsverdamping tot de verzadigingstemperatuur van de tussentrap.

Oververhitting van het zuiggas is de toename van de temperatuur van het koudemiddel boven de verdampingstemperatuur. Het effect op de energie-efficiëntie is hierbij echter afhankelijk van het toegepaste koudemiddel, omdat de opwarming van het zuiggas invloed heeft op de dichtheid en dus op de

massastroom naar de compressor. Hierbij kan de capaciteit van de compressor verminderen terwijl het energieverbruik gelijk blijft. Oververhitting is:

- *rendabel*, als het koudemiddel warmte opneemt en daarbij een bijdrage levert aan de koeling, bijvoorbeeld in een verdamper met droge expansie en een thermostatisch expansieventiel;
- *onrendabel*, als de zuigleiding warmte opneemt uit de omgeving en daardoor het rendement van de compressor verlaagt. In die situaties dient de zuigleiding van de verdamper naar de compressor ter verbetering van de energie-efficiëntie (dampdicht) geïsoleerd te zijn.

Maar er is ook enige oververhitting noodzakelijk om te vermijden dat er vloeistof in de leiding naar de compressor wordt meegezogen. Met de conventionele thermostatische expansieventielen was daarvoor relatief veel oververhitting vereist, maar de introductie van de elektronisch geregelde ventielen heeft geleid tot lagere oververhitting van het gas uit de verdamper, omdat die expansieventielen ook correct werken bij kleine temperatuurverschillen. De elektronisch geregelde expansieventielen kunnen aldus bijdragen aan een systeem met een betere energie-efficiëntie. Ook kan het koelsysteem met een lagere minimum condensatiedruk werken.

Gebruik van restwarmte uit het koelproces

Tot de mogelijkheden om de energie-efficiëntie van het koelproces te verbeteren, behoort het benutten van eventuele restwarmte uit het koelproces. Er zijn drie onderdelen in het koelproces waar restwarmte ter beschikking kan staan.

- De leiding met het oververhitte koudemiddelgas na de compressie, met een temperatuur van 70 tot 90°C (vooral bij ammoniak). Dit gas kan afgekoeld worden met een warmtewisselaar (*desuperheater*) tussen compressor en condensor. Naar verhouding is de hoeveelheid oververhittingswarmte circa 10% tot 14% van het condensorvermogen.
- De *condensor* met een temperatuur van 10 à 20 K boven die van de omgevingslucht of het koelwater. Het beschikbaar vermogen is de som van het koelvermogen en een groot deel van het opgenomen elektrisch vermogen (minus de oliekoelerwarmte bij schroefcompressoren). Door de lage temperatuur (30 tot 50°C) is deze warmte beperkt toepasbaar, bijvoorbeeld als een verwarmingsmedium van 40°C voor gebouwen, indien het gebouwsysteem daarvoor is uitgelegd.
- Men kan ook de persgassen afkoelen en in een tweede trap (hoge druk compressor met 50 bar ontwerpdruk) verder opdrukken naar circa 80°C condensatiedruk. Deze tweede trap is een hoge-temperatuur warmtepomp. Zie Best Practice Warmtepompen.
- De *warmte van koel- en smeerolie* bij schroefcompressoren, met een temperatuur tussen 60 en 80°C. Het warmtevermogen in de smeerolie kan tot 50% van het opgenomen elektrisch vermogen bedragen bij installaties met ammoniak.

Het is van belang om bij ieder project na te gaan of het terugwinnen van de condensorwarmte voor verwarmingsdoeleinden niet een negatieve invloed heeft op het energiegebruik van de koelinstallatie. Dit kan het geval zijn als de condensor continu ten behoeve van die verwarming met een hogere condensatietemperatuur moet functioneren, terwijl er ook een koelend medium voor de condensor met een lage temperatuur ter beschikking staat. In een dergelijk geval zou de besparing aan verwarmingskosten wel eens minder kunnen zijn dan de toegenomen kosten voor de koelinstallatie door de hogere condensatietemperatuur. De warmtevraag (verbruik in de tijd geanalyseerd) moet dus goed in kaart worden gebracht.

De restwarmte van de persgasleiding of de smeerolie (en in mindere mate van de watergekoelde condensor) kan bijvoorbeeld nuttig toegepast worden bij de voorverwarming van koud suppletiewater voor stoomketels, reinigingswater voor productieruimtes, voor douchewater en voor vloerverwarming (grondverwarming) onder een vrieshuis. De warme lucht van luchtgekoelde condensoren kan voor ruimteverwarming gebruikt worden.

Koudemiddelen

Van de beschikbare koudemiddelen zijn er waarschijnlijk meerdere geschikt voor het te ontwerpen koelproces, maar de individuele energie-efficiëntie kan sterk verschillen, zie de best practice 'Koudemiddelen'.

Milieutechnische en veiligheidsaspecten

De milieutechnische en veiligheidsaspecten zijn niet direct bepalend voor de energie-efficiëntie, maar hebben er indirect wel invloed op, bijvoorbeeld bij de keuze van compressoren, koudemiddel, smeermiddel en condensorkoeling. In bijlage 2 wordt hierop verder ingegaan.

4. Componenten van het koelsysteem

Tot de componenten die in dit hoofdstuk nader beschouwd zullen worden met het oog op de energie-efficiëntie behoren:

- compressoren;
- condensors;
- verdamper.

Overige aspecten die in separate hoofdstukken worden behandeld zijn:

- regeling;
- warmteoverdrachtstvloeistoffen als secundaire koudedragers;
- koudebuffers;
- oliewaskolom;
- automatische ontluchter.

4.1 Compressoren

Algemeen

De compressor kan uitgevoerd zijn als een zuiger-, scroll-, schroef- of centrifugaalmachine. De aandrijving daarvan geschiedt meestal met een elektromotor, waarbij de uitvoering van de verbinding tussen motor en compressor op één van de volgende wijzen is uitgevoerd:

- *hermetische compressor*, de speciale motor en de compressor zijn direct gekoppeld en gezamenlijk in één (meestal gelaste) behuizing ondergebracht; de motor wordt gekoeld door het aangezogen (gasvormig) koudemiddel, waardoor de energie-efficiëntie verlaagd wordt. Door de gasdichte behuizing is lekkage van koudemiddel niet te verwachten. Deze uitvoering is gebruikelijk voor zuiger- en scroll compressoren met motorvermogens tot 15 kW;
- *semi-hermetische compressor*, de motor en compressor zijn direct gekoppeld via een flensverbinding, maar de behuizing is gedeeltelijk toegankelijk waardoor eenvoudig onderhoud mogelijk is. Afhankelijk van het fabricaat vindt soms vanaf een motorvermogen van 1 kW, en boven 8 kW altijd, de koeling van de motor plaats met het aangezogen (gasvormig) koudemiddel, hetgeen dus de energie-efficiëntie nadelig beïnvloedt. Omdat ook hier een asafdichting ontbreekt, is er geen kans op lekkage van het koudemiddel via compressor of asverbinding;
- *open compressor*, de normmotor is direct via een koppeling, of indirect met een snaaroverbrenging verbonden met de compressor. De motor is meestal luchtgekoeld wat een gunstig effect heeft op de energie-efficiëntie van de koelinstallatie. Hier is een zeer goede asafdichting van de compressor vereist om lekkage van koudemiddel te voorkomen. Deze uitvoering is in de chemische industrie en voor motorvermogens vanaf 25 kW de meest gebruikelijke.

Het koelen van de elektromotor door het aangezogen gas vanuit de verdamper vermindert het beschikbare koelvermogen van de compressor. Uitwendig gekoelde typen, waarbij het zuiggas dus direct naar de compressor stroomt, hebben circa 8% meer koelvermogen.

Bij de open compressoren is er een vrije keus in het type motor. Daarom is het aan te raden om in die gevallen een hoogrendementsmotor te kiezen, die een circa 3% hoger rendement heeft dan de standaardmotor bij ongeveer gelijke investeringskosten.

Bij het vergelijken van koelcompressoren voor een bepaalde toepassing kan de Europese norm, EN 12900, als basis dienen om de compressoren van diverse typen en fabrikanten met elkaar te kunnen vergelijken.

Zuigercompressoren

Zuigercompressoren worden bij koelinstallaties veelvuldig toegepast, ook bij de grotere vermogens, waarbij gedacht kan worden aan 8 tot 24 cilinders per machine, figuur 5. Het is gebruikelijk om oliegesmeerde cilinders toe te passen, omdat olievrije compressoren zeer kostbaar zijn.



Figuur 5: Zuigercompressor aggregaat (bron Grasso)

Scroll compressoren

Voor de kleinere koelvermogens tot 40 kW staan ook scroll(spiraal-)compressoren ter beschikking. Dit zijn compressoren die een vast en een roterend element hebben, waarbij het koudemiddel in een groef van de rotor in de richting van de as gecomprimeerd wordt. Ze zijn als hermetische compressor uitgevoerd en alleen in standaard koelapparatuur (airconditioning, kleine koel- en vriesinstallaties en in het bijzonder transportkoeling) ingebouwd.

Ten opzichte van de zuigermachines hebben ze minder trillingen en een lagere geluidsbelasting. Bij toepassingen boven 0°C is de energie-efficiëntie hoger dan die van de zuigercompressoren; beneden 0°C is de zuigercompressor te prefereren, al nemen de toepassingsmogelijkheden en het rendement van de scroll compressoren sterk toe.

Schroefcompressoren

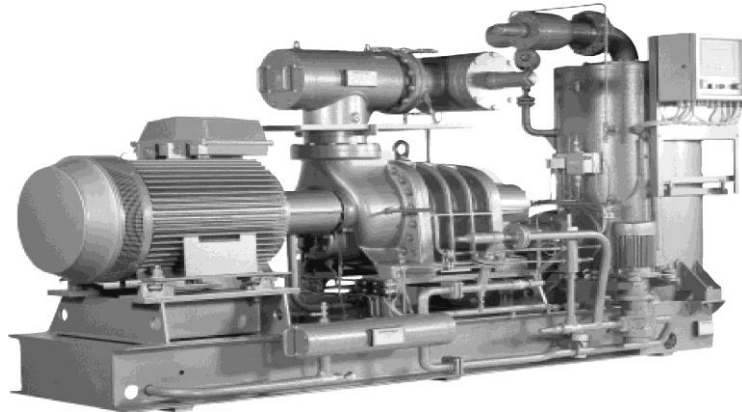
Het gebruik van schroefcompressoren in de koudetechniek is alom ingeburgerd. De meest toegepaste zijn de oliegesmeerde dubbelschroefcompressor en de enkelschroefcompressor (monoschroef), al of niet met een booster of economiser voor lagere verdampingstemperaturen, figuur 6. Bij de dubbelschroef is één rotor aangedreven, de andere wordt meegenomen op het rotorcontactvlak. Goede smering is dus van groot belang. Dit geldt ook voor de rotor en planeetwielen van de monoschroef.

De schroefcompressor kan met een grotere drukverhouding opereren dan de zuigercompressor. In tegenstelling tot de zuigercompressor heeft de schroefcompressor een vaste volumeverhouding (de verhouding tussen het volume in de aanzuigfase en het uitgedreven volume: V_i). Dat is een nadeel want een schroefcompressor kan daardoor over- en onder-comprimeren, mede afhankelijk van de condensatiedruk. Er zijn schroefcompressoren met de mogelijkheid om de inwendige geometrie aan te passen aan de variërende drukverhouding tussen de verdamper- en de condensordruk. Dit is een compressor met een variabele volumeverhouding (V_i).

De compressiewarmte wordt voor een groot gedeelte opgenomen door de smeeroilie die in de compressor geïnjecteerd wordt, waarbij de olie tevens de afdichting bij de rotoren verzorgt.

Een mogelijkheid om de energie-efficiëntie te verbeteren, is gebruikmaking van een economiser bij compressoren: de drukverlaging van condensor- naar verdamperdruk vindt dan in twee trappen plaats, waarbij het flashgas na de eerste drukverlaging direct tussen de eerste en de tweede trap van de compressor wordt ingebracht via de economiser poort. Door de economiser neemt de koelcapaciteit bij

vriescondities circa 10% tot 15% toe. De energie-efficiëntie stijgt met ongeveer hetzelfde percentage. Onder 80% deellast is het effect van de economiser verdwenen.



Figuur 6: Enkeltraps schroefcompressor (bron Grasso)

Centrifugaalcompressoren

Daar waar grote volumestromen koudemiddel gecomprimeerd moeten worden, kan de centrifugaalcompressor toegepast worden, bijvoorbeeld bij grote water- of pekelkoelmachines. De centrifugaalmachines zijn in het algemeen geselecteerd, passend bij de verdampers en condensoren van de leverancier, en worden dan als standaardpakket geleverd, meestal met het koudemiddel R-134a. Voor grote capaciteiten en bijzondere omstandigheden kunnen centrifugaalkoelmachines ook volgens specificatie van de gebruiker geleverd worden. Deze hebben een hoge energie-efficiëntie bij een langdurig bedrijf met een redelijk constante belasting.

Indien langdurig deellast wordt plaatsvindt, kan de fabrikant speciale voorzieningen treffen om de energieverliezen te beperken. Er zijn centrifugaalcompressoren met R-134a waarbij het expansieventiel is vervangen door een expansieturbine waardoor de energie-efficiëntie met circa 10% wordt verbeterd. Voor het Noord Europese klimaat is dat minder efficiënt. Het energieverbruik is circa 0,16 kW per kW koelvermogen, dus een COP van 6,2.

Centrifugaalmachines worden bij voorkeur toegepast bij langdurige belasting en grote capaciteiten.

4.2 Condensoren

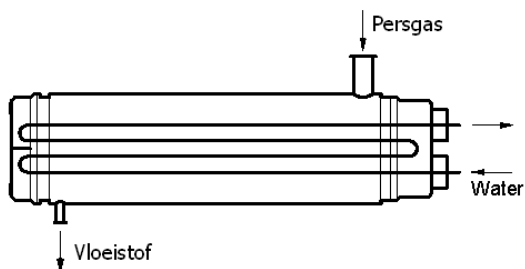
Het oververhitte gasvormig koudemiddel wordt in de condensor achtereenvolgens gekoeld tot de condensatietemperatuur en gecondenseerd. De condensor kan de opgenomen warmte uit het koudemiddel afvoeren naar een koelmiddel (lucht, water), als tussen beide media een temperatuurverschil is dat groot genoeg is om de vereiste capaciteit te realiseren en klein genoeg om de systeemtemperatuur zo laag mogelijk te houden. Het selecteren van een grotere condensor leidt tot lagere condensatietemperaturen en dus tot lagere operationele kosten. Een evaluatie van enige varianten is meestal nodig om te komen tot een economisch haalbare en energie-efficiënte oplossing.

De meest toegepaste typen condensor zijn:

Watergekoelde condensor

De warmtewisselaar kan de vorm hebben van een pijpenbundelwarmtewisselaar, waarbij het koelwater door de pijpen stroomt (zie figuur 7). Ter beperking van het koudemiddelvolume kan echter ook een (gedeeltelijk gelaste of hardgesoldeerde) platenwarmtewisselaar toegepast worden. De haalbare condensatietemperatuur is voor Nederland in het warme jaargetijde:

- bij doorstroomsystemen met bronwater, circa 20 tot 25°C;
- bij doorstroomsystemen met oppervlaktewater, circa 25 tot 35°C;
- bij circulatiesystemen met koeltorenwater, circa 25 tot 35°C. Dit systeem heeft vrijwel dezelfde energie-efficiëntie als de verdampingscondensor (zie verder).



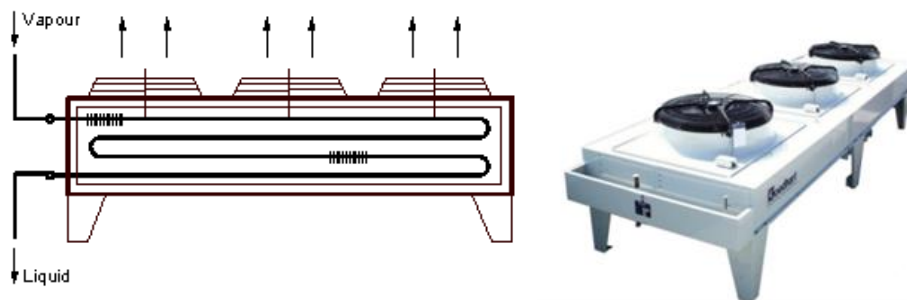
Figuur 7: Watergekoelde condensor (bron KWA)

De condensatietemperatuur wordt in het algemeen geregeld door variatie van de hoeveelheid circulerend koelwater.

Een best practice ontwerpwaarde tussen condensatietemperatuur en watertemperatuur is 8 K.

Luchtgekoelde condensor

Deze bestaat meestal uit een rechthoekig blok, opgebouwd uit pijpen (koudemiddel door de pijpen). Zie figuur 8. De pijpen zijn uitwendig voorzien van opgeperste lamellen ter verbetering van de luchtzijdige warmteoverdracht. De af te voeren warmte wordt opgenomen door langs en door het blok stromende buitenlucht. Daartoe is iedere luchtgekoelde condensor voorzien van één of meerdere ventilatoren. Afhankelijk van de toepassing wordt gebruik gemaakt van koperen pijpen met aluminium lamellen (niet geschikt voor ammoniak), volbad-verzinkte stalen pijpen en lamellen, volledig uit roestvast-staal vervaardigde condensorblokken en volledig uit aluminium vervaardigde condensorblokken. In een zoute en corrosieve omgeving kunnen koperen vinnen toegepast worden, maar wordt meestal een beschermlaag (coating) op het warmtewisselend oppervlak aangebracht



Figuur 8: Luchtgekoelde condensor (bron KWA, Goedhart)

De condensatietemperatuur is afhankelijk van de temperatuur van de aangezogen buitenlucht. In de zomer kan de condensatietemperatuur daarbij oplopen tot 45 à 50°C. Omdat onder winterse omstandigheden de condensatiedruk zodanig laag kan worden dat onvoldoende drukval (tussen condensatiedruk en verdampingsdruk) over het expansieventiel wordt gecreëerd, wordt te weinig vloeibaar koudemiddel ingespoten, met als gevolg dat de verdampingsdruk en -temperatuur gaan dalen. Door bijvoorbeeld één of meerdere ventilatoren uit te schakelen, of van een toerenregeling te voorzien, kan de condensatiedruk kunstmatig voldoende hoog worden gehouden (minder lucht betekent minder afvoer van warmte). Ook kan de olie insputting van de schroefcompressor tot de eis van een minimale condensatiedruk leiden. Zo heeft elke koelinstallatie een minimale condensatiedruk waarop deze is ontworpen. De instelling van deze regeling bepaalt voor een deel de efficiëntie van een installatie.

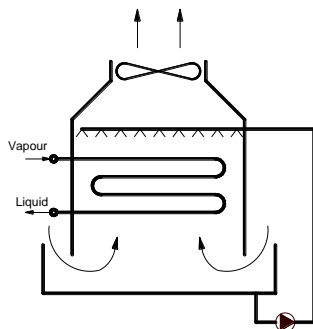
Een goede ontwerpwaarde van het fanvermogen is 14W/kW (fanvermogen per kW afgevoerde warmte).

Een best practice ontwerpwaarde tussen condensatietemperatuur en luchttemperatuur is 10 K.

Verdampingscondensator

Dit is een bevoelide luchtgekoelde condensator (zie figuur 9). De bouw en werkwijze zijn grotendeels anders dan die van de luchtgekoelde condensator. Er wordt een pijpenbundel met gladde condensatorpijpen toegepast die uitwendig besproeid worden met water. Door die bevoeiing is de temperatuur van de buitenzijde van de condensatorpijpen gelijk aan de heersende natte boltemperatuur van de omgevingslucht. Daardoor is de haalbare condensatietemperatuur in de zomer bij dit systeem circa 30 à 35°C. Deze is lager dan bij de luchtgekoelde condensator maar is energetisch niet altijd maatgevend omdat gemiddeld over het jaar een luchtgekoelde condensator een lagere condensatietemperatuur kan hebben. De consequenties van een verdampingscondensator zijn:

- een watercirculatiesysteem met verdamping en suppletie, dus bijkomend water- en energieverbruik;
- chemische waterbehandeling (hardheid, biocides, legionella);
- kans op uitwendige vervuiling van de condensatorpijpen;
- kosten voor water en waterbehandeling zijn hoog;
- de verdampingscondensator heeft minder vloeroppervlak nodig en minder aansluitend leidingwerk;
- de keuze hangt ook af van het af te voeren vermogen en de bedrijfstijden.



Figuur 9: Verdampingscondensator (bron KWA)

Uit het eerder vermelde blijkt dat de keuze van de methode om de condensatorwarmte af te voeren een sterke invloed heeft op de condensatietemperatuur en dus op de energie-efficiëntie.

Het energieverbruik van de genoemde drie typen condensators ontloopt elkaar weinig:

- de watergekoelde condensator gebruikt energie voor de pomp en voor de koeltoren;
- de luchtgekoelde condensator gebruikt energie voor de ventilatoren;
- de verdampingscondensator gebruikt energie voor de sproeiomp en de ventilatoren.

Een goede ontwerpwaarde van het fanvermogen is 14W/kW (fanvermogen per kW afgevoerde warmte). Een best practice ontwerpwaarde tussen condensatietemperatuur en natte bol luchttemperatuur is 10 K.

4.3 Verdampers

De uitvoering van de verdampers wordt, in tegenstelling tot die van de condensators, veelal bepaald door het doel waarvoor de verdampingsenergie gebruikt wordt:

- het koelen van lucht (of het direct koelen van een koel- of vriesruimte);
- het koelen van een vloeistof (water, pekkel of een andere koudedragers);
- het koelen van een emulsie;
- het koelen van een vaste stof;
- het koelen van een procesreactor.

Daarnaast wordt de uitvoering bepaald door de manier waarop het koudemiddel wordt ingespoten. Bij kleine systemen gebeurt dit meestal via directe expansie. Bij grote systemen (met bijvoorbeeld ammoniak) gebruikt men vaak badverdampers, zogenaamde natte verdampers of 'flooded' systemen.

De bekendste typen verdampers die voor de genoemde toepassingen in aanmerking komen, zijn:

- directe expansie lamellenblokken;
- verdampers met vloeistofafscheider en pompcirculatie of zwaartekrachts-circulatie;

- badverdamper;
- directe expansie pijpenwarmtewisselaars;
- platenwarmtewisselaars in diverse uitvoeringen;
- falling film verdamper met pijpen of verdamperplaten;
- dompelspiralen;
- geschraapte warmtewisselaars.

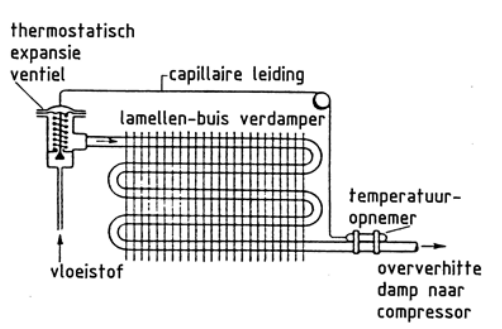
In de volgende paragrafen worden enige toepassingen hiervan behandeld.

Luchtkoelers

Bij het koelen van lucht ten behoeve van airconditioning of koel- en vriescellen wordt bij kleine systemen meestal directe expansie in *lamellenblokken of spiralen* toegepast (figuur 10), waarbij de lucht geforceerd door het blok of langs de spiraal of serpentijn gevoerd wordt. Een lamellenblok bestaat uit een aantal gevinde pijpen die in een blokvorm is samengebouwd. Bij uittrede uit de verdamper dient alle vloeistof verdampt te zijn om te voorkomen dat de compressor vloeistof kan aanzuigen. Daartoe handhaaft de regeling meestal een lichte oververhitting van 6 – 10 K bij uittrede. Het gevolg hiervan is dat circa 25% van het koeloppervlak nodig is voor oververhitting.

Bij toepassingen waarbij de temperatuur van het koeloppervlak lager is dan -4°C , vriezen de lamellen aan ten gevolge van vocht in de lucht, zodat er regelmatig ontdooid moet worden. Door de vermindering van de warmteoverdracht naar de lucht continu te meten, kan het ontdooiproces tijdig gestart worden. Als het ijs op de lamellen ontdooid is, wordt automatisch het ontdooien gestopt. Op deze wijze wordt ontdooid met een aanzienlijk hogere energie-efficiëntie dan bij een op tijd gebaseerde schakeling.

De lamelafstand is bij luchtbehandeling circa 4,0 mm, voor koeling 4 tot 6 mm en bij vriestoeepassingen 7 tot 12 mm.



Figuur 10: Luchtkoelercircuit met thermostatisch expansieventiel (directe expansie) (bron KWA)

Bij grotere systemen wordt bij voorkeur pompcirculatie of zwaartekrachtcirculatie toegepast. Daarbij wordt vanuit een vloeistofvat met afscheider vloeibaar koudemiddel door de luchtkoelers gepompt.

Vloeistofkoelers

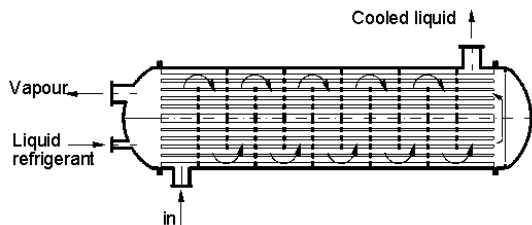
Om vloeistoffen te koelen staan diverse uitvoeringen van warmtewisselaars ter beschikking, afhankelijk van de thermodynamische eigenschappen van koudemiddel en te koelen vloeistof.

Pijpenbundelwarmtewisselaar (shell and tube)

Bij droge verdamping door middel van directe expansie zal het koudemiddel door de pijpen vloeien en de te koelen vloeistof door de romp (figuur 11). De romp is voorzien van keerschotten om een kruisstroom met het koudemiddel te realiseren. In de pijpen bevindt zich een verdampende vloeistof.

Bij meerdere, verspreid staande reactorvaten kan ook gebruik gemaakt worden van natte verdamping met een pompcirculatiesysteem dat de vloeistof vanuit een centraal geplaatste afscheider transporteert naar de verbruikers. Ten opzichte van de directe expansiemethode is bij de circulatiesystemen de binnenwand van de pijpen geheel bevoeid waardoor warmteoverdracht en capaciteit toenemen. Er kan ook een iets hogere verdampingstemperatuur gehandhaafd worden, omdat er geen oververhitting aan het eind van de

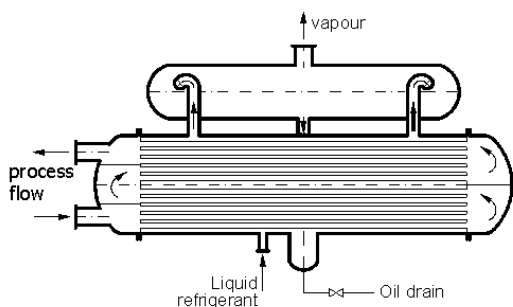
verdampers vereist is om vloeistofslag in de compressor te voorkomen. De energie-efficiëntie van de natte verdamping is hoger dan die van de droge met directe expansie.



Figuur 11: Pijpenbundelwarmtewisselaar met koudemiddel in de pijpen (bron KWA)

Badverdampers

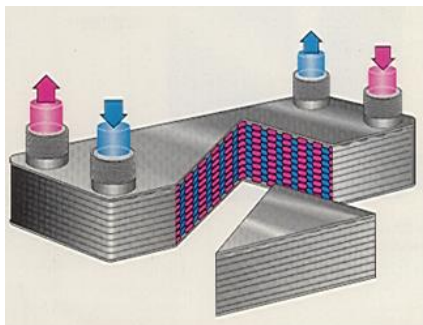
De badverdampers (figuur 12) is een warmtewisselaar met een grote capaciteit. Deze verdampers is uitgevoerd als een liggende pijpenbundelwarmtewisselaar, waarbij de te koelen vloeistof door de pijpbundel stroomt en het koudemiddel in de romp verdampt. Het koudemiddelniveau in de romp wordt zodanig geregeld, dat de bovenste pijpen nog onder het vloeistofoppervlak blijven om een perfecte warmteoverdracht tussen vloeistof en verdampend koudemiddel te handhaven. In de ruimte aan de bovenzijde van de romp vindt de afscheiding van vloeistof en gasvormig koudemiddel plaats. In plaats van in de romp kan de afscheiding ook gerealiseerd worden in een apart vat, geplaatst boven de warmtewisselaar. Het nadeel van de badverdampers is de grote koudemiddelinhoud.



Figuur 12: Badverdampers (bron KWA)

Platenwarmtewisselaars

In een platenwarmtewisselaar stromen het koudemiddel en de te koelen vloeistof door afzonderlijke kanalen die gevormd worden door de ruimten tussen de tegen elkaar aangebrachte platen. Om lekkages te voorkomen worden de naden aan de koudemiddelenzijde hardgesoldeerd (figuur 13) of gelast. Platenwarmtewisselaars kunnen worden uitgevoerd als natte (bevoeide) of als droge (directe expansie) verdampers. Bij het natte type wordt een afscheider boven de warmtewisselaar geplaatst.

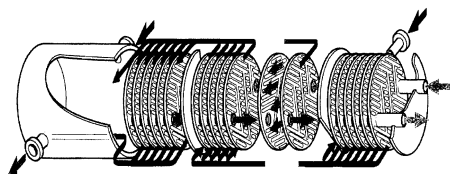


Figuur 13: Gesoldeerde platenwarmtewisselaar (bron internet afbeelding)

De voordelen van de platen- boven de pijpenwarmtewisselaar zijn:

- hoge warmteoverdrachtscoëfficiënt;
- een kleiner temperatuurverschil tussen koudemiddel en procesvloeistof, waardoor de verdampingstemperatuur van het koudemiddel hoger kan zijn;
- zeer compacte bouwvorm;
- kleinere koudemiddelinhoud van het systeem;
- de (niet-gelaste) proceszijde is te reinigen, maar net zo moeilijk als de pijpenbundelwarmtewisselaar.

Een ander type platenwarmtewisselaar is de 'plate in shell' uitvoering, die als verdamper of condensor is ontworpen met het doel om het volume koudemiddel in een circuit zoveel mogelijk te beperken en tegemoet te komen aan de vraag naar warmtewisselaars voor indirecte systemen, met behoud van de prestaties van een pijpenwarmtewisselaar. De constructie is in wezen een platenwarmtewisselaar in een mantel, figuur 14.



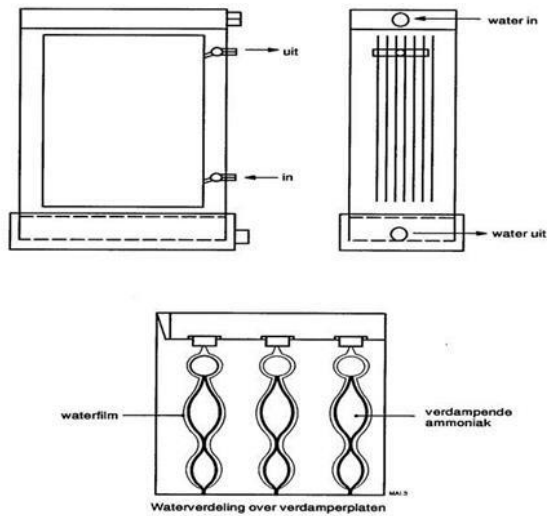
Figuur 14: Opbouw van een plate in shell (Q-plate) warmtewisselaar (bron Vahterus)

Indien de eigenschappen van de plate in shell worden vergeleken met de normale pijpenbundel warmtewisselaar, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- het drukverlies en de koudemiddelinhoud zijn veel lager dan bij pijpenwarmtewisselaars;
- de warmteoverdrachtsprestaties per m^2 oppervlak van de plate in shell -warmtewisselaar als condensor zijn vergelijkbaar met die van de pijpenbundel, maar als verdamper slechts de helft ten gevolge van een minder goede verdeling van het koudemiddel. Om hieraan tegemoet te komen is bij directe verdamping de plate in shell als twee-pass verdamper uitgevoerd;
- de warmteoverdrachtsprestaties per m^2 oppervlak plate in shell -warmtewisselaar zijn minder gevoelig voor debietvariaties dan bij pijpenwarmtewisselaars;
- de plate in shell -warmtewisselaar is in het algemeen twee maal compacter dan de pijpenwarmtewisselaar. Het gewicht is slechts 25% van dat van een pijpenbundel;
- een nadeel is dat de plate in shell -warmtewisselaar niet toegankelijk is en alleen met spoelvloeistoffen is te reinigen;
- de warmteoverdrachtsprestaties per m^2 oppervlak plate in shell-warmtewisselaar zijn voor de gebruikelijke koudemiddelen vergelijkbaar.

Falling film verdamper

De 'falling film' verdamper is opgebouwd uit een aantal verticaal opgestelde roestvrijstalen verdamperplaten (zie figuur 15). Twee platen zijn als paar op de randen dichtgelast. Er zijn puntlassen geplaatst verdeeld over het oppervlak. Vervolgens is in de fabricage de plaat als het ware opgeblazen. Er ontstaan zo spleten van 3 mm waar uiteindelijk het koudemiddel door de verdamper-platen stroomt. Het te koelen water stroomt als een dunne film langs het oppervlak van de platen en valt als ijswater van 1°C in een er onder geplaatste opvangbak. Het voordeel van dit type is dat de warmtewisselaar niet kan dichtvriezen terwijl je dicht bij het vriespunt zit. Dit is de enige warmtewisselaar die 1°C water kan maken. Een ander voordeel is de grote capaciteit per m^2 verdamperoppervlak en dat met hetzelfde rendement als de badverdamer, minder koudemiddel volume gerealiseerd wordt.



Figuur 15: Vallende film verdamper (Omega Thermo Products)

Het koelen van emulsies

Om emulsies te koelen wordt in het algemeen de *geschraapte warmtewisselaar* toegepast. De te koelen emulsie stroomt hierbij over de verdamperplaten of een cilinder met verdampend koudemiddel, terwijl de gekoelde emulsie van de wanden geschraapt wordt.

Het koelen van vaste stoffen

Het koelen van vaste stoffen komt veel voor in de voedselindustrie, waar producten snel ingevroren dienen te worden. De gebruikelijke methode is daarbij om het product tussen twee platen ('plate freezers' als contact vriezers) te leiden, waarin het koudemiddel verdampt.

Het koelen van een procesreactor

In de industrie wordt veelvuldig gebruik gemaakt van *directe expansie* op een reactorvat. De verdamping van het koudemiddel geschiedt dan in een spiraalvormige warmtewisselaar op de wand van het reactorvat, in het vat, of door een in de wand geïntegreerde platenwarmtewisselaar.

Indien er koeling op meerdere procesreactoren vereist is waarbij het temperatuurniveau ongeveer gelijk is, wordt in het algemeen *natte verdamping* via pompcirculatie toegepast. De verdamper is ook hier meestal uitgevoerd als uitwendige spiraal op de wand of als inwendige dompelspiraal.

5. Regeling

In elk koelsysteem worden twee regelkringen onderscheiden:

- *hoofdregelkring*. Deze draagt zorg voor de afstemming van de koudevraag (de belasting) op het koude aanbod van de koelinstallatie. Deze regelkring regelt de verdampingstemperatuur, het koudemiddeldebiet van de compressor en de afstemming van beide grootheden;
- *interne regelkring*. De interne regelkring regelt de onderlinge afstemming van de apparatuur van de koelinstallatie. Deze is afhankelijk van het type koudemiddel en geschiedt onder meer door het drukverschil tussen verdampers en condensoren te handhaven en het debiet van de koelkringloop door het expansieventiel te regelen.

Voor de compressorregeling kan de best practice, 'Capaciteitsregeling roterende apparatuur' aanvullende informatie verschaffen.

De hoofdregeling omvat de capaciteitsregeling van de koelcompressoren enerzijds en de temperatuurregeling van het te koelen object anderzijds.

5.1 Capaciteitsregeling compressoren

De regeling van de capaciteit van zuigercompressoren, boven 7,5 kW motorvermogen, geschiedt op één van de volgende manieren:

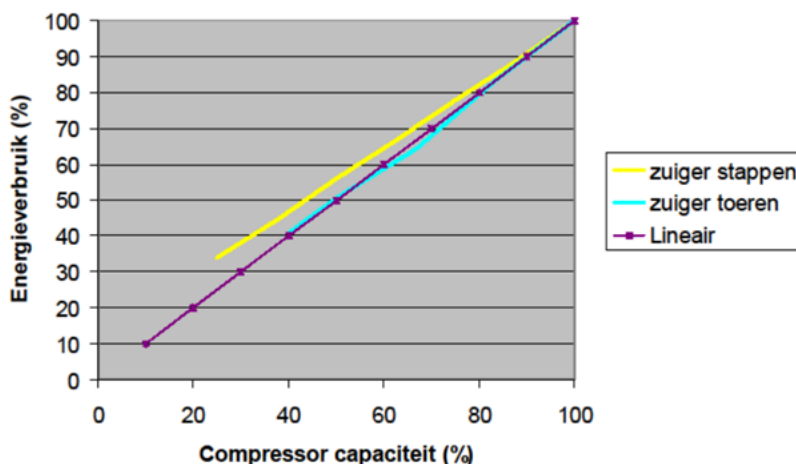
- *kleplichting*, door de zuigklep(pen) te lichten wordt het aangezogen gas gedeeltelijk weer teruggedrukt tijdens de compressieslag naar de zuigleiding;
- *toerenregeling*, de regeling van het toerental is mogelijk tot het punt dat de pulsaties van de zuigerbeweging het proces gaan storen en is niet mogelijk beneden een, door de compressorfabrikant opgegeven, minimum toelaatbaar toerental waarbij een goede smering nog kan worden gegarandeerd;
- *persgasrecirculatie*, dit is een omloopregeling tussen uitlaat en inlaat, waarbij het debiet in de koudecyclus wordt geregeld, maar niet het verplaatste compressorvolume. Dit is ongewenst daar dit veel energie kost.

Bij de methoden met kleplichting en toerenregeling is het opgenomen vermogen (bij deellast tot 50%) ongeveer evenredig met de capaciteitsvermindering.

Bij *zuigercompressoren* wordt de capaciteit gewijzigd door kleplichting of toerenregeling. Bij halvering van het compressordebiet zal bij de kleplichting het opgenomen vermogen met 40 tot 45% dalen. Bij toerenregeling neemt het opgenomen vermogen zelfs meer dan evenredig af.

Bij grote variaties van de capaciteit is het schakelen van meerdere, parallel draaiende, compressoren een energie-efficiënte methode.

Een toerengeregelde zuigercompressor is de meest efficiënte regeling in deellast, zie figuur 16.

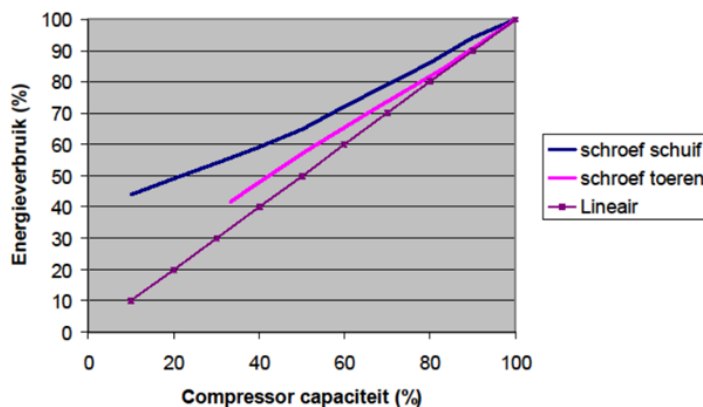


Figuur 16: Toerenregeling zuigercompressor, stappen regeling versus toerenregeling (bron GEA)

Voor de capaciteitsregeling van schroefcompressoren zijn twee methoden beschikbaar:

- *regeling compressievolume*, een schuif regelt de lengte van het actieve deel van de rotor, waardoor bij deellast slechts een deel van de rotoren het koudemiddel comprimeert. Bij nullast wordt dan circa 50% van het maximum vermogen opgenomen. Het is daarom niet efficiënt om deze compressoren beneden 60% te belasten, hoewel de regeling de belasting tot 10% kan terugregelen;
- *toerenregeling*, door een betere fabricage en smeertechniek is het nu mogelijk om ook schroefcompressoren te regelen door variatie van het toerental. Hierbij wordt de hoogste energie-efficiëntie behaald.

De capaciteit van *schroefcompressoren* wordt aangepast door de effectieve schroeflengte te wijzigen of door toerenregeling. Bij halvering van het compressordebiet door vermindering van de schroeflengte neemt het opgenomen vermogen met slechts 30% af. Bij toerenregeling van de schroefcompressor is het opgenomen vermogen rechtevenredig met het toerental (figuur 17).



Figuur 17: Schroefcompressor regeling, toerenregeling versus regelschuif (bron GEA)

De capaciteitsregeling van centrifugaalcompressoren kan geschieden door:

- *regeling met inlaatschoepenregeling*, geeft weinig energieverlies;
- *persgasrecirculatie (hotgas bypass)*, dit geeft geen energiebesparing;
- *toerenregeling*, komt zelden voor bij centrifugaalmachines, maar is efficiënt mogelijk tot een deellast van 70%.

Indien een centrifugaal koelmachine gedurende een groot deel van het jaar op deellast moet draaien, is het aan te raden om daarvoor speciale voorzieningen aan te laten brengen zodat er met een zo goed mogelijke energie-efficiëntie geopereerd kan worden. Als alternatief kan in een dergelijke situatie het gebruik van twee of meerdere schroefcompressoren overwogen worden.

5.2 Temperatuurregeling

Deze regeling verzorgt het handhaven van de gewenste temperatuur van het product of de gekoelde ruimte. Vaak is er sprake van meerdere verbruikers, aangesloten op hetzelfde koelcircuit. De temperatuurregeling is dan een samenspel van meerdere verbruikers met de koelmachine. De in aanmerking komende regelmethode zijn:

- aan/uit regeling;
- zuigdrukregeling;
- zuigdrukregeling en compressor vollastbedrijf.

5.3 Aan/uit regeling

Deze regeling wordt meestal toegepast als er slechts één verbruiker is aangesloten op de koelinstallatie. Bij overschrijden van de ingestelde temperatuurband wordt de compressor gestart en bij onderschrijden weer gestopt. Hierbij wordt de verdampersdruk niet geregeld omdat die afhankelijk is van de belasting op de verdampers en van het door de compressor verplaatste koudemiddelvolume.

Het is een eenvoudig systeem met als nadelen de grove regeling en het frequent schakelen van de compressor. Bij schroefcompressoren wordt de compressor na iedere uitschakeling pas na 10 minuten stilstand weer ingeschakeld (olie moet weglopen). Door de grove regeling is de verdampertemperatuur lager ingesteld dan nodig is bij een fijnere regeling. Hierdoor wordt de energie-efficiëntie verlaagd.

5.4 Zuigdrukregeling

De zuigdrukregeling wordt toegepast indien er meerdere verbruikers zijn, eventueel in combinatie met meerdere compressoren.

Als de ingestelde temperatuur van een verbruiker wordt overschreden, zal de thermostaat de koeling in werking stellen door de koudemiddeltoevoer naar de betreffende verdamper te openen.

Bij de zuigdrukregeling wordt getracht de zuigdruk binnen een zekere bandbreedte te handhaven. Indien dan de zuigdruk in het systeem wijzigt, zal compressorcapaciteit worden bij- of afgeschakeld.

Het belangrijkste nadeel van de regeling op zuigdruk is dat de verbruiker met de laagste temperatuur de verdampingstemperatuur bepaalt, die dan tevens geldt voor de andere verbruikers. Dit heeft tot gevolg dat de andere verbruikers met een lagere COP werken. Per verbruiker kan de individuele verdampingstemperatuur, door het gebruik van een tussen de verdamper(s) en de compressor(en) gemonteerde zuigdrukregelaar, worden ingesteld op de verlangde zuigdruk.

Door de bandbreedte van de zuigdrukregeling te vergroten, kunnen de perioden dat de compressoren op vollast draaien, worden verlengd en het aantal schakelingen worden verminderd. Dit verbetert de energie-efficiëntie ten opzichte van de situatie met frequent schakelende en op deellast werkende compressoren. Indien het mogelijk is om een zodanige coördinatie tussen de verbruikers te realiseren dat de compressoren van een centrale koel-/vriesinstallatie ofwel volbelast draaien of uitgeschakeld zijn, is het mogelijk om een grotere zuigdrukdifferentie in te stellen. Een specifieke uitvoering van deze regeling wordt de '*mogen/moeten regeling*' genoemd die, gecombineerd met de balansregeling, de volgende kenmerken heeft:

- de compressoren werken volbelast of zijn uitgeschakeld. Het nadeel is dat mogelijk de verdampingstemperatuur gemiddeld lager is dan nodig;
- verbruikers met dezelfde verdampingstemperatuur worden beurtelings gekoeld zodat met een relatief kleine koelinstallatie kunnen toch meerdere koelcellen worden gekoeld.

Door de groepsgewijze indeling is het mogelijk om de verbruikers met lage verdampingstemperaturen te koelen als de verbruikers met een hoge verdampingstemperatuur zijn uitgeschakeld en omgekeerd.

5.5 Condensordrukregeling

De condensordruk wordt geregeld met de ventilatoren van de condensors (zowel luchtgekoelde of verdampingscondensors of koeltoren). De ventilatoren kunnen aan/uit worden geschakeld of naar halve toerental of geheel variabel in toeren. Bij watergekoelde condensors kan men het waterdebiet variëren. Bij meerdere condensors parallel kan men condensors geheel uitschakelen. Het resultaat is dat men de hoeveelheid gas uit de compressoren kan balanceren met de hoeveelheid die wordt gecondenseerd. In die balans ontstaat een condensatiedruk. Door meer condenserend oppervlak te activeren (ventilator in bedrijf) daalt de condensatiedruk. Voor elke installatie wordt een minimum condensatiedruk ingesteld. Een best practice is een weersafhankelijke regeling van de condensatiedruk tot 13°C buitenluchttemperatuur.

5.6 Regelen van verdamperen

Bij het droge of directe expansiesysteem is het expansieorgaan geplaatst in de vloeistofleiding vóór de intrede van de verdamper, dus tussen het gedeelte met de (hoge) condensatiedruk en de (lage) verdampingsdruk. Het hoofddoel van het expansieventiel is het regelen van de koudemiddelstroom naar de verdamper en deze zo goed mogelijk gevuld houden. De regeling van die stroom is zodanig afgesteld dat geen vloeistof door de compressor kan worden aangezogen.

Vanaf 100 kW koelvermogen komt natte verdamping in aanmerking. Bij ammoniakinstallaties wordt meestal voor natte verdamping gekozen.

Thermostatisch expansieventiel

Het thermostatische expansieventiel wordt algemeen toegepast voor directe expansiesystemen (zie figuur 10).

Een temperatuuropnemer op de verdamperuitrede regelt door middel van een mechanische verbinding de doorlaat van het ventiel dat vóór de verdamper is geplaatst. De opnemer bepaalt de oververhitting van het uitredende gas. Bij teveel oververhitting opent het ventiel.

Het debiet van het koudemiddel door het ventiel is afhankelijk van de doorlaatopening, maar ook van het drukverschil tussen condensor en verdamper. Het drukverschil neemt af door verhoging van de verdamperdruk of verlaging van de condensordruk.

Een te klein drukverschil leidt tot minder inspuiting van vloeibaar koudemiddel en daarmee tot een kleinere koelcapaciteit. De ingestelde oververhitting is 6 tot 10 K.

Een niet goed ingesteld expansieventiel kan leiden tot ernstige compressorschade. Zo kan een te veel aan ingespoten koudemiddel (te kleine overhitting), vloeistofslag ten gevolge hebben en kan een te grote overhitting soms tot oververhitting van de compressor leiden.

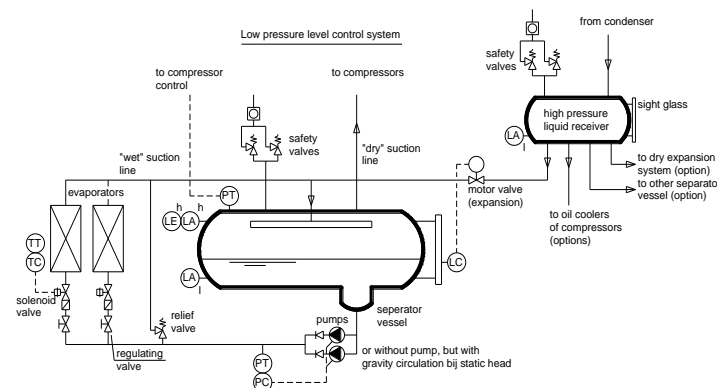
Elektronisch expansieventiel

Bij een elektronisch expansieventiel stuurt een regelaar een klepmotor aan, die de doorlaatopening van het expansieventiel instelt.

Elektronische expansieventielen kunnen een gunstige kleine oververhitting van 4 tot 5 K realiseren. Deze koeler wordt daardoor zo veel mogelijk gevuld en heeft daardoor maximaal warmte-overdragend oppervlak actief. Deze expansieventielen hebben een groter regelbereik dan de mechanische thermostatische expansieventielen: van 10 tot 100%. Dit houdt in dat de condensatietemperatuur tot +15°C in de koudere jaargetijden terug-geregeld kan worden, waardoor de energiebesparing kan oplopen tot 15 à 20%.

Natte verdamping

Bij natte (flooded) verdamping door pompcirculatie of zwaartekrachts-circulatie, circuleert het koudemiddel in een overmaat, met behulp van een pomp (of door hoogteverschil) vanuit een lagedruk vloeistofvat naar één of meerdere verdamperen. Nadat het koudemiddel gedeeltelijk verdampt is, stroomt het vloeistof-/dampmengsel terug naar de vloeistofafscheider. Het opvallende verschil met de droge expansie is, dat bij het natte systeem het debiet van het koudemiddel door het expansieorgaan niet afhankelijk is van de koudemiddelstroom door de verdamperen. Een vlotter regelt de vloeistofstroom naar de afscheider van het koelsysteem door het vloeistofniveau in de afscheider te meten met behulp van een niveausensor. Het niveau in het vloeistofvat wordt door de regeling constant gehouden onder alle belastingen, zie figuur 18.



Figuur 18: Schema van een lagedruk-niveauregeling met pompcirculatie (bron KWA)

6. Secundaire koudedragers

6.1 Algemeen

Secundaire koudedragers zijn warmteoverdrachtsvloeistoffen die in de verdampers gekoeld worden door het koudemiddel en via pompcirculatie warmte opnemen van diverse verbruikers. Vrijwel alle secundaire koudedragers nemen alleen voelbare warmte op en geen latente. De uitzonderingen zijn kooldioxide en ijsslurrie, die een faseovergang hebben van vloeibaar naar gas, respectievelijk van vast naar vloeibaar. De voordelen van het gebruik van een secundaire koudedrager zijn velerlei:

- de koudemiddelinhoud is minder, waardoor de lekkage-kans kleiner is. Het koudemiddel is alleen aanwezig in de compressor- en pompruimte; lekdetectie is eenvoudiger evenals een eventuele reparatie;
- het maakt de toepassing van milieuvriendelijke, maar giftige of brandbare koudemiddelen mogelijk zoals de natuurlijke koudemiddelen (propaan, ammoniak) en koolwaterstoffen.

Het nadeel bij gebruik van een secundaire koudedrager is, dat er extra pompenergie nodig is die weggekoeld dient te worden en dat er een extra temperatuursprong in warmteoverdracht plaatsvindt met energieverlies. Dit verlies resulteert in een groter verschil tussen verdampings- en condensatietemperatuur. Bij een goed ontwerp (hoog rendement warmtewisselaars, pompen en regelingen) en bij toepassing van een natuurlijk koudemiddel zoals ammoniak, wordt dit nadeel teniet gedaan.

6.2 Typen koudedrager

De ter beschikking staande koudedragers zonder faseovergang zijn, onder andere, calciumchloride, d-Limone, ethanol, ethyleenglycol, kaliumacetaat, kaliumformiaat en polypropyleenglycol en met faseovergang kooldioxide en water-ethanol ijsslurrie (flow-ice).

Voor het selecteren van een koudedrager zijn de volgende aspecten van belang:

- transport eigenschappen (viscositeit);
- thermodynamische eigenschappen;
- giftigheid en brandbaarheid;
- corrosie eigenschappen (materiaalkeuze leidingen en warmtewisselaars);
- kostprijs.

Omdat het vriespunt van de koudedrager onder de toepassingstemperatuur van die koudedrager moet liggen, wordt geadviseerd om altijd een koudedrager te selecteren met een vriespunt dat minstens 5 K lager is dan de laagste temperatuur in het systeem. Een lagere vriespuntbescherming leidt tot een meer viskeuze stof met slechtere warmteoverdracht en meer benodigd pompvermogen.

In vergelijking met de directe systemen voor warmteoverdracht, zijn de meeste indirecte systemen niet beter als het gaat om investeringskosten en energiegebruik. Een uitzondering vormen de tweefasen koudedragers, zoals koolzuur en water-ethanol ijsslurries, die op beide punten gunstig presteren.

7. Koudebuffers

Koudebuffers bieden de mogelijkheid koude op te slaan. Het voordeel is: men kan een kleinere koelinstallatie grote pieken in de koudevraag opvangen, men kan koude aanmaken in de avond bij lagere condensatiedruk en bij gunstiger energietarief. Het koudebuffers systeem moet aansluiten op de procesvoering (continu, batchproces, gebouwkoeling, etc.).

Om koude-energie te kunnen opslaan, staan twee verschillende methoden ter beschikking:

Het voelbare warmtesysteem; door sterke afkoeling van een vaste of vloeibare stof wordt energie opgeslagen. Die energie komt weer vrij door de massa te verwarmen. In de meeste gevallen komt water als buffermedium in aanmerking, omdat water in ruime mate aanwezig is en eenvoudig in een vat is op te slaan, maar vooral omdat water een goede warmteoverdrachtscoëfficiënt en een hoge soortelijke warmte heeft. Dit systeem kan maar beperkt worden toegepast, omdat de buffer relatief veel ruimte vereist.

Het latente warmtesysteem; door gebruik te maken van de latente smeltwarmte van de thermische faseovergang bij voldoende lage temperatuur. De stoffen die daarvoor in aanmerking komen zijn water (ijsbufferen), eutectische zoutoplossingen, PCM materialen (phase change materials), CO₂ hydraat slurries,

alcohol/water slurries . Deze stoffen hebben bij het smelt- of stolpunt de eigenschap dat energie bij constante temperatuur wordt afgestaan of opgenomen. De smelttemperaturen zijn te kiezen door stofsamenstelling. De voordelen van deze methode zijn een hoge opslagdichtheid en een eenvoudige energieregeling, omdat de temperatuur tijdens de energietransformatie constant is. In bijlage 3 wordt nader op koudebuffers ingegaan.

8. Aandachtspunten bij bestaande installaties

Naast de opties genoemd in de vorige paragrafen, zijn overige maatregelen ter verbetering van de energie-efficiëntie bij bestaande installaties:

Maatregelen om zuigdruk te verhogen

Dit zijn onder andere (2,5% elektriciteitsbesparing compressor per graad toename van de verdampingstemperatuur of zuigdruk):

- stel het setpoint van de verdamperregeling in op een hogere waarde (al naar behoefte);
- correct ontdooien, dunne en gelijkmatige rijplaat;
- voldoende luchtcirculatie;
- goede luchtverdeling en productstapeling in de gekoelde opslag;
- correcte fan selectie (fan efficiëntie);
- olievrije installatie, olie afvoeren NH₃, olie rectificatie (bij oplosbaarheid en koudemiddel bij pomp circulatie);
- koelen in batches geeft gemiddeld een hogere zuigdruk (betere COP);
- plaats meer verdamper (meer warmte overdragend oppervlak);
- installatie van elektronische expansie ventielen (levert meer warmte overdragend oppervlak);
- voorkom vochtneerslag (rijpvorming) op de verdamper.

Maatregelen om condensatiedruk te verlagen

Dit zijn onder andere (2,5% elektriciteitsbesparing compressor per graad reductie condensatietemperatuur of persdruk):

- lager instellen condensatiedrukregeling;
- reinigen condensor;
- lucht uit de (vries)installatie (automatisch) verwijderen (ontluchter of air purger);
- controleer luchtdebiet over de condensor;
- aanpassen kleppen lagedrukexpansie;
- vergroten aantal condensors (nieuwe condensor of persgaswarmtewisselaar voor aanmaken van warm water);
- reduceer olietransport van compressor naar installatie (m.n. bij ammoniak)
- verbeter condensaatafvoer uit condensor.

Hierna wordt nader ingegaan op het effect van de smeeroilie in een koelkringloop en van de ontluchting van het systeem om een optimale warmtewisseling te handhaven.

Smeeroilie

De oliehuishouding van een koelinstallatie is van veel belang voor een goede werking. Zowel te weinig als te veel circulerende olie leidt tot storingen. Smeeroilie in een koelinstallatie is nodig voor de smering en koeling van de draaiende delen van de compressor. Daarbij is belangrijk dat de in het koudemiddel aanwezige olie (na de compressie) wordt afgescheiden en wordt teruggevoerd naar het compressorcarter. Niet alle olie kan worden afgescheiden, waardoor een deel (5 à 10%) met het koudemiddel mee door het koelsysteem zal circuleren.

Daarom dient voor een storingsvrije werking bij het ontwerp van een installatie extra aandacht besteed te worden aan de leidingloop, de plaatsing van eventuele olieafscheider(s), de juiste snelheden in de verdamper(s) en zuigleidingen en de olienivellering bij meerdere compressoren.

Olie in combinatie met de moderne fluorkoolwaterstoffen (HFK's) is synthetisch van aard. Dit vraagt aandacht bij opslag vanwege hygroscopisch gedrag. Olie lost niet in ammoniak op. Om problemen met

warmteoverdracht in de koel-/vriesinstallatie te voorkomen of als de olie achterblijft in leidingen of verdamper moet regelmatig (automatisch) worden afgetapt.

Olieafscheiders na de compressoren zorgen er voor dat veel olie wordt afgescheiden. Maar er is nog altijd oliedamp die de installatie intreedt. Door afkoeling van de persgassen door een persgaskoeler (met oliedrainage) of toepassing van een oliewaskolom of toepassing van olie met een lage dampspanning, kan het restoliegehalte tot minder dan 1 ppm gereduceerd worden.

Ontluchten

Bij het ontluchten worden eventueel aanwezige niet-condenseerbare gassen afgevoerd. De niet-condenseerbare gassen bestaan over het algemeen uit lucht ten gevolge van onjuist vacumeren van de installatie bij nieuwbouw of reparaties; door vullen met onzuiver koudemiddel, ten gevolge van gassen ontstaan bij uiteenvallen van smeerolie of koudemiddel of doordat de installatie onder-atmosferisch werkt (vriesinstallaties) door infiltratie door pakkingen etc. Deze niet condenseerbare gassen verhogen de condensatiedruk en beïnvloeden daarmee het energiegebruik nadelig. De aanwezige lucht (met vocht) bevordert bovendien het uiteenvallen van de olie en daarmee de vorming van sludge in het systeem. De aanwezigheid van niet-condenseerbare gassen is te constateren door te controleren of de verzadigingstemperatuur van de vloeistof na de condensor overeenstemt met de heersende vloeistofdruk. Niet-condenseerbare gassen zijn aanwezig als de gemeten temperatuur na de condensor lager is dan de druk behorend bij de verzadigingstemperatuur.

De automatische ontluchter (of purger) is een kleine koelinstallatie die gewoonlijk ééns per 24 uur in bedrijf komt en die het koudemiddel laat condenseren op een verdamperoppervlak en daardoor een scheiding teweeg brengt tussen koudemiddel en niet-condenseerbare gassen, zodat die gassen via een vlottergestuurde afsluiter naar de atmosfeer afgevoerd kunnen worden. Het restgehalte niet-condenseerbare gassen wordt hiermee onder de 2% gehouden.

9. Aandachtspunten nieuwbouw installaties

Voor nieuwe installaties zijn er meer vrijheden om een energiezuinige en duurzame installatie met lage Total Costs of Ownership te ontwerpen en aan te schaffen.

Onderwerpen van aandacht zijn:

- Reduceer de vraag naar koeling (reductie instraling, isolatie, eliminatie warmtebronnen, etc.) en pas zoveel mogelijk natuurlijke koude toe (buitenlucht, grondwater) en hernieuwbare energie (zon, wind).
- Keuze koudemiddelen: natuurlijke koudemiddelen zijn energetisch gunstig en bieden een lange termijnoplossing voor gebruik.
- Voor koel- en vriesinstallaties met natuurlijke koudemiddelen is een fiscale aftrek mogelijk in de winstbelasting. Dit is de Energie Investeringsaftrek (EIA). Let op de technische eisen die aan dit bedrijfsmiddel worden gesteld.
- Koelinstallaties kunnen complexe installaties worden, waar niemand meer iets van begrijpt of de werking slecht kan worden beoordeeld. Eenvoud in het ontwerp wordt aangeraden om de kosten in de bedrijfssituatie te beheersen.
- Er dient te worden gestreefd naar een lage inhoud koudemiddel ten opzichte van het koelvermogen.
- In dit best practice document, inzake Systeem en Ontwerp worden veel zaken behandeld die tot energiebesparing leiden. Evenzo bevatten de 'tips' diverse aandachtspunten om energie te besparen. Zie verder ook: Aandachtspunten bij bestaande installaties.
- Goede regelingen van procesonderdelen en het koelproces als totaal bepalen de kwaliteit van de koude levering en de energiebesparing. Ook de afstemming, of de integratie van regeling met de andere processen zoals het productieproces bepaalt de efficiëntie.
- Kies de juiste procesgrootheden (o.a. temperatuur, druk, flow, capaciteit van componenten) en maak deze onderdeel van de instrumentatie ten behoeve van monitoring en beoordeling.

- Analyseer de warmtevraag van de productieprocessen of gebouwen/productiehallen om de warmte uit de koelinstallatie nuttig in te zetten. De inzet van deze restwarmte verhoogt de energie-efficiëntie van de installatie met 8% tot 15%, afhankelijk van vermogen en bedrijfstijd.

Ontwikkelingen

In de industrie worden steeds meer natuurlijke koudemiddelen zoals ammoniak, al of niet in combinatie met kooldioxide toegepast evenals het gebruik van koolwaterstoffen (mengsels van propaan en butaan) en water en/of lucht. Kooldioxide in installaties voor supermarkten zijn reeds ingevoerd waarbij koude- en warmtelevering zijn gecombineerd in de CO2 installatie.

De nadruk komt in het ontwerp te liggen op installaties met een laag energieverbruik en een kleine koudemiddelinhoud vanwege het milieu en veiligheid. Het gebruik van indirecte koelsystemen in combinatie met natuurlijke koudemiddelen zal daarom toenemen. Daarnaast is een trend naar het toepassen van micro channel warmtewisselaars als verdamper of condensor. Door de kleinere buisdiameters wordt de hoeveelheid koudemiddel verlaagd.

Een techniek die als koelinstallatie en warmtepomp in ontwikkeling is thermo-akoestische koeling. Bij deze technologie wordt warmte-energie omgezet in akoestische energie die op haar beurt als 'compressor' in een koudecyclus fungeert. Bij deze koelmachine komen dus in het geheel geen bewegende delen voor. Als warmtepomp is de hoge temperatuurlift van meer dan 50 K interessant. Er worden systemen met steeds grotere koelvermogens ontwikkeld. Momenteel mikt men op een akoestisch vermogen van circa 40 kW.

10. Referenties

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 Koude techniek' is een actualisering van het document 'Leidraad voor energie efficiency, Koeltechniek' 2002/29.

De huidige actualisering van de Best Practice is tot stand gekomen in het kader van meerjarenaafspraken 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 Koudetechniek is geactualiseerd met medewerking van KWA Bedrijfsadviseurs www.kwa.nl.

De meerjarenaafspraken 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 meerjarenaafspraken.

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

Er is gebruik gemaakt van de volgende publicaties:

GPG 280, Good Practice Guide, Energy efficient refrigeration technology, ETSU 2000

GPG 283, Good Practice Guide, Designing energy efficient refrigeration plant, ETSU 2000

GPG 2, Good Practice Guide, Energy savings with electric motors and drives, ETSU 2000

EN 12900, Refrigerant compressors. Rating conditions, tolerances and presentation of manufacturers performance data, 1999

Daarnaast is gebruik gemaakt van algemene documentatie en brochures van leveranciers en fabrikanten. Dit is aangegeven bij de figuren met een korte verwijzing naar de bedrijfsnaam. Niet alle figuren zijn te herleiden tot een eenduidige bron.

Andere referenties naar openbare documenten zijn:

Nederlandse Praktijk Richtlijn

NPR 7600:2013 nl voor toepassing van koolwaterstoffen als koudemiddel in koelsystemen en warmtepompen

NPR 7601:2013 is gericht op de toepassing van kooldioxide als koudemiddel of verdampende koudedragers.

www.nen.nl

F-gassen verordening

www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/stoffen/ozon-gassen/nieuws/nieuw-hulpmiddel

Maatregelenlijsten Agentschap NL, RVO

www.rvo.nl/subsidies-regelingen/maatregelenlijsten-mja3

PGS 13

www.publicatiereeksgevaarlijkstoffenn.nl.

NEN-en 378-1, -2, -3 en -4, Koelsystemen en warmtepompen, veiligheids- en milieueisen

De Richtlijn Drukapparatuur (PED)(97/23/EG)

www.nen.nl

NEN-EN 12900:2013 en

Compressoren voor koelvloeistoffen, indelingsvoorwaarden, toleranties en weergave van prestatiegegevens

www.nen.nl

EIA: Energie Investeringsaftrek

www.rvo.nl/subsidies-regelingen/energie-investeringsaftrek-eia

Afstandentabel ammoniak uit het BEVI REVI

www.infomil.nl

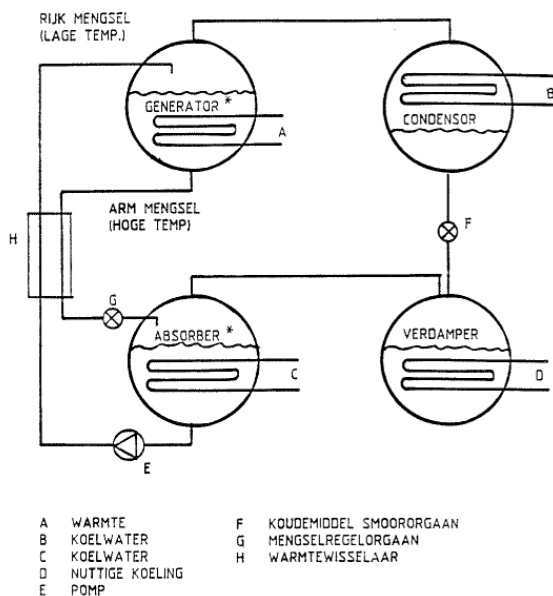
Bijlage 1

De absorptiekoelinstallatie

In een *absorptiekoelinstallatie* wordt energie direct in de vorm van warmte aan de koudecyclus toegevoerd.

Het energetisch rendement van een absorptiemachine is lager dan dat van een compressie-installatie. Bij vriestoeepassingen (temperatuur $< -40^{\circ}\text{C}$) komen deze echter bij elkaar in de buurt.

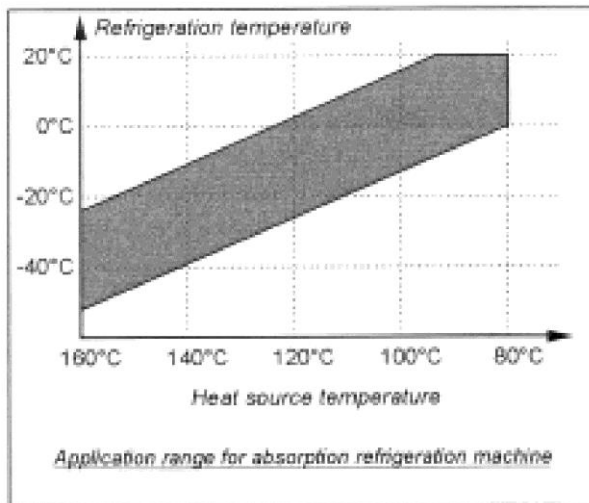
De geluidsemissie van een absorptie-installatie is aanmerkelijk lager dan die van een compressiemachine. De absorptiekoelmachine maakt gebruik van een cyclus, waarin de componenten van een binair systeem bestaande uit een koudemiddel en een oplosmiddel, beurtelings worden gescheiden en weer samengevoegd, zie figuur a. Een voorwaarde is dat het koudemiddel volkomen door het oplosmiddel opgenomen wordt. Hieraan voldoen bijvoorbeeld de stofparen ammoniak met water (voor procestemperaturen onder 0°C) en water met lithiumbromide (voor koudwatermachines bij toepassing in air-conditioning).



Figuur a: Principeschema absorptiekoelmachine (bron KWA)

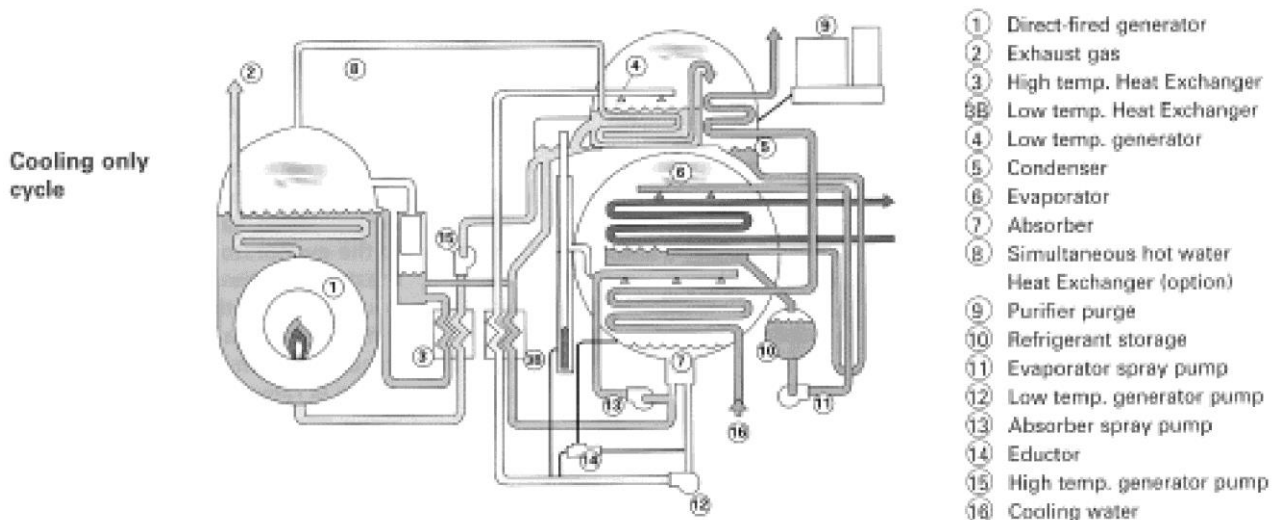
De combinatie van absorber, circulatiepomp en generator (uitdrijver) wordt ook wel de thermische compressor genoemd, analoog met de mechanische compressor bij de compressiecyclus. De absorber is dan te vergelijken met de zuigslag van een zuigercompressor. De generator met de persslag.

De warmtebron voor de absorptiemachine kan restwarmte zijn in de vorm van stoom, heet water of een ander medium. De vereiste minimumtemperatuur is afhankelijk van de gewenste koeltemperatuur, zie figuur b.



Figuur b: Verband tussen temperatuur restwarmtebron en koeltemperatuur

Bij de praktische uitvoering van de absorptie-koudwatermachine kunnen procesonderdelen met dezelfde procesdruk binnen één hermetisch gesloten drukvat gecombineerd worden, zoals condensor en generator enerzijds en absorber en verdampers anderzijds. Daarnaast is het mogelijk om de scheiding van koudemiddel en oplosmiddel te verbeteren door een tweetrapsuitvoering van de uitdrijver, waardoor een verbetering van de energie-efficiëntie met 50% is te bereiken, zie figuur c.



Figuur c: Tweetraps LiBr-water absorptie-installatie, aardgas gestookt

Er zijn standaard uitvoeringen van absorptiekoudwatermachines (chillers) vanaf een koelvermogen van 200 kW tot capaciteiten van 6000 kW.

Het energetisch rendement van een absorptiekoelinstallatie wordt gegeven door:

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

Q_o = koelvermogen van de koelinstallatie in kW.

Q_g = toegevoerd warmtevermogen aan de generator in kW

De te behalen COP is voor een enkeltraps koudwatermachine circa 0,70 (temperatuur warmtebron 95 tot 130°C), voor een tweetrapsmachine 1,20 (temperatuur warmtebron 140 tot 175°C) en voor een direct gestookte tweetraps 1,00 (brandstof aardgas of lichte olie).

Bij vriestemperaturen benadert de efficiëntie van een absorptiekoelmachine die van de compressiekoelmachine. Men dient rekening te houden dat een COP van een compressiekoelmachine op elektriciteit is gebaseerd en die van een absorptiekoelmachine op warmte.

Een absorptiekoelmachine is rendabel als er sprake is van restwarmte waar men geen toepassing voor heeft. Soms kan een absorptiekoelmachine een voordeel bieden in combinatie met een warmtekrachtinstallatie.

Het stoomverbruik van een enkeltraps absorptiekoudwatermachine is circa 2,3 ton/h (lage druk 2 à 3 bar) voor een capaciteit van 1000 kW bij 6°C koudwatertemperatuur.

Een tweetrapsmachine heeft voor dezelfde koudwatertemperatuur een stoomverbruik van 1,3 ton/h (max 9 bar).

Ammoniak-/waterabsorptiemachines vinden meestal toepassing als industriële installaties met een koeltemperatuur tussen 0 en -20°C, waarbij als warmteoverdrachtsmedium (koudedragers) oplossingen van calciumchloride, kaliumformiaat, ethanol of ethyleenglycol in aanmerking komen.

Bijlage 2

Milieutechnische en veiligheidsaspecten

De milieutechnische en veiligheidsaspecten zijn niet direct bepalend voor de energie-efficiëntie, maar hebben er indirect wel invloed op, bijvoorbeeld bij de keuze van compressoren, koudemiddel, smeermiddel en condensorkoeling.

Op het gebied van veiligheid en milieu kunnen verschillende besluiten en richtlijnen van toepassing zijn. Voor koelinstallaties zijn dit; de PGS 13 (de toepassing van Ammoniak als koudemiddel), NPR 7600 (Nationale Praktijk Richtlijn), de PED (het Besluit Drukapparatuur) en de NEN-EN 378 (Koelsystemen en Warmtepompen – Veiligheids- en Milieueisen) en de F-gassen verordening.

PGS 13

De PGS 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 www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl.

Deze richtlijn is bedoeld voor de hele bedrijfskolom: het bevoegd gezag, inspecteurs, ontwerpers, installateurs, onderhoudspersoneel, operators en eigenaren/beheerders. De voorschriften in de richtlijn vormen een nadere invulling van de bepalingen van de Wet milieubeheer, de arbeidsomstandighedenwet- en regelgeving en het Bouwbesluit. Het bevoegd gezag voor de Wet milieubeheer kan de richtlijn toepassen bij vergunningverlening en het houden van toezicht op grond van de Wet milieubeheer. De Arbeidsinspectie gebruikt de richtlijn voor het toezicht op de naleving van arbeidsomstandighedenwet- en regelgeving en de daarmee samenhangende beleidsregels. De overheidsbrandweer kan de richtlijn gebruiken, onder meer ten behoeve van haar adviserende taken in het kader van de Wet milieubeheer. Voor overige doelgroepen biedt deze richtlijn een naslag voor alle veiligheidsaspecten die een rol spelen bij het opstellen, bedrijven, onderhouden, repareren en afbreken van installaties die werken met ammoniak als koudemiddel.

Voor installaties ontworpen met ammoniak boven een zekere installatie-inhoud zal voor het verkrijgen van de benodigde milieuvergunning, het bevoegd gezag (gemeente of provincie) verlangen dat de installatie voldoet aan de PGS 13.

De PGS 13 wordt in relatie gebracht met het BEVI/REVI. Sinds 2004 is het Besluit externe veiligheid inrichtingen van toepassing. Hiermee zijn de risiconormen voor externe veiligheid tot bedrijven met gevaarlijke stoffen vastgelegd. De uitvoeringsvorm hiervan is de REVI (Regeling externe veiligheid inrichtingen). In dit kader is voor ammoniak een afstandentabel ontwikkeld die in acht dient te worden genomen bij het bepalen van de afstand van de installatie (naar type, toepassing en inhoud) tot kwetsbare objecten (individueel, groepen). Zie www.infomil.nl

NPR 7600 (Nederlandse praktijk richtlijn)

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. 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. De NPR 7601 is gericht op de toepassing van kooldioxide als koudemiddel of verdampende koudedragers (in het vervolg koudemiddel genoemd) in stationaire koelsystemen en warmtepompen. Bij de toepassing van kooldioxide als koudedrager heeft deze praktijkrichtlijn alleen betrekking op de koudedrager kringloop. Bij toepassing van andere koudemiddelen (zoals bij cascadesystemen) gelden ook de normen en richtlijnen voor deze koudemiddelen.

PED (Pressure Equipment Directive)

Het Besluit Drukapparatuur, geldend voor bijna alle koel-technische apparatuur, is van kracht sinds 29 mei 2002. Daarin staat onder meer omschreven:

Wanneer de gebruiker een koelinstallatie in gebruik wil nemen en in werking wil houden die valt onder het besluit Drukapparatuur (afhankelijk van inhoud/druk/leidingdiameters en koudemiddel), moet er gekeurd worden om veilig gebruik en goed onderhoud zeker te stellen.

De keuring omvat de verificatie van de drukapparatuur, controle van de uitwendige toestand, de werking van de veiligheidsappendages en de opstelling, door of in overleg met een notified body (NOBO).

De gebruiker moet formeel de keuring aanvragen en wel bij nieuwbouw en bij her-locatie.

Naast een keuring voor ingebruikname is een keuring voor de gebruikersfase van toepassing. Hier geldt een keuringstermijn.

NEN-EN 378

Binnen de Europese Unie is nu voor koelsystemen en warmtepompen de EN 378 van kracht. De Nederlandse vertaling is verschenen als NEN-EN 378, Koelsystemen en Warmtepompen – Veiligheids- en Milieueisen.

Deze norm bestaat uit vier delen:

deel 1: basiseisen, definities, classificatie en selectie criteria;

deel 2: ontwerp, constructie, beproevingen, merken en documentatie;

deel 3: installatieplaats en persoonlijke bescherming;

deel 4: bediening, onderhoud, reparatie en hergebruik.

F-gassenverordening 517/2014

Op 20 mei 2014 heeft de EU de nieuwe F-gassenverordening gepubliceerd. De verordening (EU) nr. 517/2014, 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 synthetische stoffen sterk broeikasgas verhogende gevolgen hebben bij lekkage. Het betreft verbod op gebruik van deze koudemiddelen 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.

www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/stoffen/ozon-gassen/nieuws/nieuw-hulpmiddel

Naast deze verordening geldt vanaf 1-1-2015 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 bestaande installaties niet meer mogelijk is.

Koelwater

Het gebruik van bronwater voor koeldoeleinden wordt door de overheid beperkt toegestaan.

Geluidsemissie

Bij een koelinstallatie vormen de compressoren en de verdampings- en luchtgekoelde condensoren belangrijke geluidsbronnen, maar ook de voortplanting van het compressorgeluid via het leidingwerk kan een belangrijke bijdrage leveren aan de geluidsbelasting. Door een optimaal ontwerp van de apparatuur en een accurate uitvoering van isolerende maatregelen kan aan de geluidsemissienormen voldaan worden.

Bijlage 3

Koudebuffers

Een koudebuffer is een vat met vloeistof die, door warmte af te staan aan een verdampend koudemiddel, kristalliseert en op momenten dat het proces dit vereist het opgeslagen koelvermogen door smelten weer afstaat. Om de buffer te laden is een koelinstallatie nodig die energie levert op een lager temperatuurniveau dan eigenlijk nodig is voor het proces. Daardoor wordt de energie-efficiëntie van het gehele koelsysteem verminderd.

Een koudebuffer als onderdeel van een koelsysteem dient er voor om grote variaties en pieken in het gevraagd koelvermogen op te vangen en te egaliseren.

De koudebuffer vindt ook toepassing als noodkoeling ingeval van stroomuitval en om de variërende productie van zon en windenergie eventueel in de vorm van koude op te slaan. Kleine koudebuffers in de vorm van losse pakketten kunnen dienen om producten in containers of vaten te koelen gedurende in- of extern transport.

Het belangrijkste doel van een koudebuffer is echter het verminderen van de energiekosten van de koelmachine, want de koellast van het te koelen proces wordt er niet door gewijzigd. Door de piekverbruiken op te vangen is het mogelijk om een koelinstallatie te ontwerpen waarvan de capaciteit dicht bij de gebruikscapaciteit ligt. De installatie is dan in staat om langdurig met het beste rendement te functioneren. Omdat de buffering van koude-energie op een lager temperatuurniveau plaatsvindt dan eigenlijk voor het proces nodig is, is er meer compressie-energie vereist. Maar de besparingen liggen bij koudebuffers op het terrein van de investeringen en de operationele kosten en kunnen in vele gevallen ruimschoots opwegen tegen de vermindering van de energie-efficiëntie.

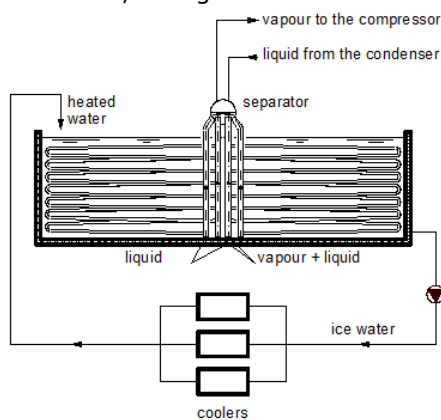
IJsbuffers

Bij ijsbuffers komt de energie vrij bij 0°C, dat wil zeggen dat het procesmedium met 1 à 2°C ter beschikking staat, afhankelijk van het type ijsbuffer. De stollings- of smeltwarmte is 333 kJ/kg bij 0°C. Om de buffer te bevriezen is een koelinstallatie nodig die bij -8 tot -10°C energie levert.

Er zijn meerdere typen ijsbuffers.

IJsbuffers met uitwendige afsmelting of direct systeem

Bij dit type, meestal ijsbank genaamd, is er direct contact van het te koelen water met het ijs. Het ijs wordt daarbij opgebouwd op verdamperspijpen of -platen die op hun beurt staan opgesteld in een met water gevulde buffertank. Het te koelen water doorstroomt deze buffertank en koelt af doordat ijs wordt afgesmolten dat door een koelinstallatie op de pijpen wordt aangevroren. De ijsdikte neemt daarbij toe of af, afhankelijk van enerzijds de waterflow en retourtemperatuur en anderzijds de capaciteit en bedrijfstijd van de koelinstallatie, zie figuur d.



Figuur d: Ijsbank met uitwendig afsmeltsysteem (bron KWA)

Bij het ontwerp van een ijsbank geldt een aantal criteria:

- een regelmatige ijsopbouw; vooral bij directe verdamping moet rekening worden gehouden met het over-verhittingsgebied;
- de plaats van de ijsdiktevoeler is kritisch; onder alle omstandigheden moet worden voorkomen dat de ijslagen op pijpen of platen aan elkaar groeien (ijs-brugvorming);
- een gegarandeerde uitgaande watertemperatuur van 1 à 2°C vraagt extra aandacht voor de plaats waar het opgewarmde retourwater in de buffertank wordt teruggevoerd.

Om een goede en gelijkmatige afsmelting van het ijs op de pijpen te waarborgen, dient het water in de bak voldoende te circuleren. Dit kan gerealiseerd worden door een roerwerk of door luchtagitatie. In het algemeen geeft men de voorkeur aan roerwerken, omdat bij gebruik van luchtagitatie er veel kans is dat de lucht een hogere temperatuur heeft dan het ijswater en er meer kans op corrosie is (bij voorkeur koperen, roestvaststalen of kunststofleidingen toepassen).

Ijsbuffers met inwendige afsmelting of indirect systeem

Bij dit systeem wordt een water/glycol-oplossing voor de gebruikers door de koelmachine gekoeld c.q. door de gekoelde buizen in de ijsbuffer. In de buffer wordt het ijs vanaf de buiswand afgesmolten, zodat uiteindelijk de ijscilinders door smelten uiteenvallen. De haalbare temperatuur van de water/glycoloplossing is 3 à 4°C. De energie-efficiëntie van dit systeem is door de extra warmteoverdracht lager dan die van het directe systeem.

Hybride ijsbuffer

Om de problemen van de conventionele ijsbanken (onbetrouwbare ijsdiktemeting, de mogelijke vorming van ijsbruggen, cavitatie en corrosie) te voorkomen, is de hybride ijsbuffer ontworpen. Dit systeem functioneert met een ijsbuffer die ontladen wordt door een water/glycol-oplossing en een additioneel watercircuit. Daarbij is het vermogen per volume zo hoog dat met minder ruimtebeslag gerekend mag worden. Ook kan de proceswatertemperatuur tot op 0,5°C van het vriespunt komen.

IJsopbouw bij fallingfilmverdamper

Bij fallingfilmverdamper, opgebouwd uit roestvaststalen platen, is het mogelijk ijs op de platen te vriezen en dat periodiek van de platen los te laten komen. Het gevormde ijs valt daarna in stukken in een opvangbak. Het warme retourwater wordt in de bak gevoerd, mengt zich met het daar aanwezige ijswater en ijs en zal zoveel van het ijs afsmelten tot het 0°C is geworden. Via pompen wordt daarna het ijswater afgevoerd naar de gebruikers.

In een op dit concept voortbordurend type en als alternatief voor de geschraapte warmtewisselaar, wordt het gevormde ijs vermalen tot ijsslurrie die op haar beurt naar de gebruikers kan worden geleid;

Geschraapte warmtewisselaar

Een van oudsher bekend type voor het produceren van grote hoeveelheden 'droogscherfijns' is de geschraapte warmtewisselaar, bestaande uit een groot stalen vat waar op de wand ijs wordt aangevoren. Het ijs wordt dan op haar beurt, met behulp van roterende messen, weer van de wand geschraapt. De gevormde ijsschilfers vallen in een bak en worden vandaar als los ijs getransporteerd naar de gebruiker;

Koudebuffers met eutectische zoutoplossingen

Indien in een proces lagere temperaturen dan 0°C vereist worden, zijn andere stoffen dan water nodig. Dit zijn meestal eutectische zoutoplossingen die bij een constante temperatuur verschillende dooifasen doorlopen. Bij voorkeur dient de stollings- of smeltwarmte niet veel lager te liggen dan die van water. De eutectica hebben een aantal specifieke kenmerken, zoals geringe kristallisatiesnelheid, uitzetting, onderkoeling en corrosie.

De eutectica zijn in verband met mogelijke giftigheid en corrosiviteit veelal verpakt in afgesloten kunststofbolletjes. Een nadeel hiervan is dat de warmteweerstand van de kunststof een negatieve invloed heeft op de energie-efficiëntie.

Door de samenstelling van de eutectica te variëren, kunnen vele vriespunten gekozen worden. De kleur van de bolletjes is het kenmerk voor een bepaald vriespunt. Deze bolletjes zijn op hun beurt weer in een tank of bak opgesloten. Om de koudebuffer te laden, dient de koelmachine koude te leveren met een

temperatuur die 10 K tot 20 K lager is dan de kristallisatietemperatuur. Dit beïnvloedt in sterke mate de energie-efficiëntie van het systeem.

De grote uitzettingscoëfficiënt van eutectica leidt bij kristallisatie tot een volumetoename van 10% en het hoge aandeel minerale zouten in de eutectica (tot 50%) maakt het mengsel zeer corrosief.

Ten opzichte van de ijsbanken is de rentabiliteit van de koudebuffers met eutectica voor lagere temperaturen sterker afhankelijk van de tariefstructuur van de elektriciteitsvoorziening. Vandaar dat momenteel de ijsbuffers een ruimere verspreiding gevonden hebben.

- PCM (phase change materials) materialen. Deze worden nauwelijks buiten de gebouwde omgeving toegepast.
- CO₂ hydraat slurries, vacuüm ijs en alcohol/water slurries. De CO₂ hydraat slurrie systemen zijn nog in ontwikkeling, evenals hydraten met tetra butyl ammonium bromide (TBAB). Vacuüm ijs en alcohol/water ijsslurrie systemen hebben al veel ontwikkeling achter de rug en enkele systemen zijn in de markt geleverd. Ze zijn echter in de praktijk niet doorgebroken.

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 Koninkrijkrelaties (BZK) en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M)

© Rijksdienst voor Ondernemend Nederland | juli 2015
Publicatienummer: RVO-101-1501/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.