

Tussenkoelers, een 'hot item'

Interstage cooling: a 'hot item'

Titus

M. C. Bartholomeus

Senior Development
Engineer,
Grasso Products b.v.

Inleiding

Tussenkoeling bij 2-trapscompressie is nodig om:

- het persgas van de lagedruktrap af te koelen naar een voor de hogedruktrap acceptabel niveau, en/of
- het totale rendement te verhogen door het onderkoelen van het condensaat.

Omgevingslucht als koelmiddel is voor tussenkoelers van koudecompressoren geen optie, omdat:

- de persgastemperatuur te laag is (R507/R404A), of
- de afkoeling niet diep genoeg is en de resterende oververhitting te veel is voor de hogedruktrap (R717).

Door het condensaat te onderkoelen, is met omgevingslucht een gering COP-verhogend effect te behalen, mits de condensor correct is uitgevoerd (splitsing van de condensatie- en onderkoelsectie).

Voor R507/R404A is er geen machinekoeling in de vorm van een lagedruk-persgaskoeler nodig. Zonder afkoeling is de resterende oververhitting voor de hogedruktrap maximaal 40K en speelt daarmee voor de hogedruk-persgastemperatuur geen rol. Zoals beschreven in het 'Tweetrapszuigercompressoren'-artikel, zal het door de oververhitting veel lichtere gas het mas-

sadebiet van de hogedruktrap beïnvloeden met ca. 0,5% per graad. Toch blijft tweetrapscompressie, zelfs bij ontbreken van een koeler op de tussendruk, een veel betere oplossing. De invloed van het opsplitsen van de druktrappen op het volumetrisch rendement, en dus de koelcapaciteit, is enorm.

Omdat omgevingslucht geen optie is, wordt een deel van het koudemiddel gebruikt om op tussendruk te verdampen en daarmee de persgasen condensaatwarmte af te voeren. Dit is een noodzakelijk kwaad, immers:

Het totale koudemiddel dat wordt gebruikt voor koelen van de compressor, wordt niet gebruikt voor productkoeling en vermindert dan ook direct de koelcapaciteit! Hoe geringer de verdampingswarmte van het koudemiddel, des te hoger de invloed. Zo is het verlies aan koelcapaciteit bij R507/R404A ca. 7 x zo hoog als bij ammoniak.

Door gebruik te maken van een luchtgekoelde persgaskoeler als voorcoeler in een ammoniak tweetrapper zal de COP met 5% stijgen, doordat er minder koudemiddel nodig is om het gas te koelen. Daar de tussendruk nagenoeg altijd onder de intredetemperatuur van de omgeving ligt, is gevaar van koudemiddelcondensatie nagenoeg uitgesloten. Het plaatsen van een warmteterug-

Samenvatting

Dit artikel geeft inzicht in de voor de koeltechniek zo specifieke wijze van tussenkoeling. Deze wijkt af van alle andere bekende tussenkoelsystemen omdat hierbij de warmte wordt onttrokken door verdamping van het condensaat, ontstaan uit het gecompriëerde gas.

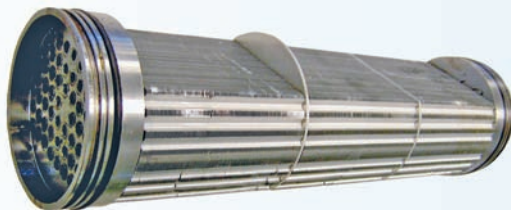
Summary

This article discusses the specific way of interstage cooling in the refrigeration engineering. This system differs from all other known systems of interstage cooling because in this case heat is extracted from the evaporation of the condensate, formed by the compressed gas.

winning op de lagedrukpers, is dus ondanks de 20% geringe warmteonttrekking, een veel verstandigere keuze dan in de hogedrukpersleiding. Een warmteterugwinning in de hogedruk heeft geen directe invloed op de COP. Wel zal de verbeterde olieafscheiding, door deelcondensatie van de in het persgas aanwezige oliedamp, een geringere installatievervuiling betekenen maar het maakt de bedrijfsvoering veel complexer en dus storingsgevoeliger.

Het gebruik van een niet-koudemiddelgekoelde persgaswarmtewisselaar op de tussen-druk in een ammoniaktweetrapscompressor is een bedrijfszekere oplossing, die de totale COP met 5% verhoogt.

Als we gas via een warmtewisselaar afkoelen, dus indirect, dan zijn de warmteoverdrachten beroerd. Vandaar dat er aan de gaszijde vaak een fors vergroot warmtewisselend oppervlak te vinden is. Een geschikte warmtewisselaar is dan een van het tube & fin type.



Afbeelding 1

Een veel intensievere afkoeling wordt verkregen door het gas direct in contact te brengen met de verdampende vloeistof.

De vraag die nu rijst is, wat gaat het beste:

- druppels verdampen in de hete gasstroom, of
- gasbellen afkoelen in een vloeistofbad?

Het antwoord daarop is met Nusselt (Nu) te vinden (met medium wordt de stof bedoeld waarin de druppel/ bel zich bevindt):

$$Nu := 2 + 0,6 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$$

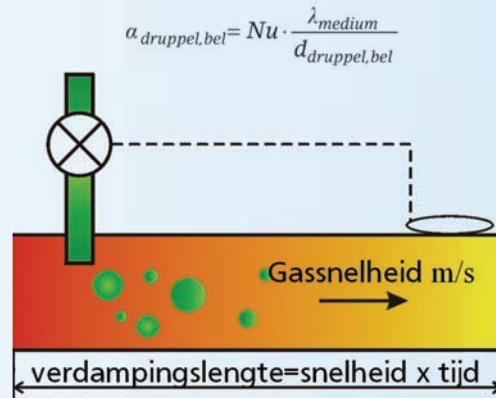
$$Re = \frac{v_{druppel,bel} \cdot d_{druppel,bel} \cdot \rho_{medium}}{\eta_{medium}}$$

$$Pr = \frac{\eta_{medium} \cdot c_{p,medium}}{\lambda_{medium}}$$

Druppels verdampen in de hete gasstroom

Koudemiddel dat via een expansieventiel in een persgasleiding wordt geïnjecteerd, vernevelt onder invloed van het hogedrukverschil en het ontstaan van flashgas. De nevel bevat druppels met een diameter tussen de 0,1 en 1mm. Druppels van deze grootte zullen door de gasstroom wor-

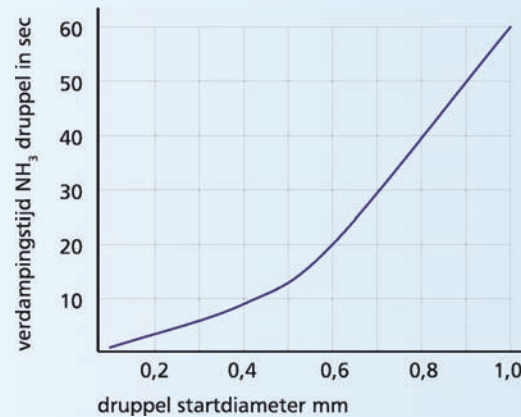
den meegesleurd. De relatieve snelheid $v_{druppel}$ tussen het gas en de druppel is daarmee nul en dus is Reynolds (Re) ook nul. Daarmee wordt Nusselt (Nu) voor een druppel 2 en de warmteoverdracht gas/ druppel:



Afbeelding 2

Nemen we als voorbeeld ammoniakgas van ca. 100 °C bij een tussen'druk' van -10 °C. Bij de grootste startdruppeldiameter van 1 mm wordt de warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha=100W/m^2K$.

De tijd die nodig is om een ammoniakdruppel te verdampen in een daardoor afkoelende gasstroom, is in afbeelding 3 terug te vinden.



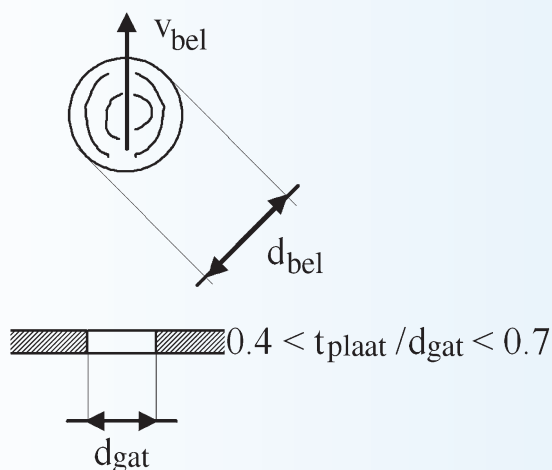
Afbeelding 3

Druppels met een diameter van 0,1 mm hebben een seconde nodig om te verdampen, die van 1 mm een minuut!

Druppels <0,1mm zijn alleen te verkrijgen door gebruik te maken van verstuivers. De gassnelheid bij deze druk ligt ruim boven de 10m/s. Ergo, als we 1 seconde uitdampstijd nodig hebben, hebben we een leidinglengte tussen de lagedrukpers en de hogedrukzuig nodig van meer dan 10 m?! Dit is uiteraard bijzonder onpraktisch.

Gasbellen afkoelen in een vloeistofbad

Als gas stroomt door een gat in een vloeistof, dan worden er bellen gevormd. De grootte van de bellen is afhankelijk van de snelheid in het gat,



Afbeelding 4

de gatvorm en de diameter. Grote bellen zullen bij het opstijgen kapot slaan in meerdere kleinere, daarmee de belgrootte beperkend tot 1 cm. De maximale stijgsnelheid van een bel bedraagt 0,3 m/s. Voor ammoniak wordt Reynolds ca. 10.000, Prandl 1,6 en dus Nusselt 72. De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor de maximale belgrootte van 10

mm wordt dan ca. 4.000W/mK, het 40-voudige van de 1 mm druppel in het gas.

Conclusies:

1. Gas afkoelen door borrelen gaat 40x zo goed als door het verdampen van druppels
2. Voor het afkoelen van een bel tot ca. 5 K boven de verzadigingstemperatuur is maximaal 1 seconde nodig
3. Voor het verdampen van een druppel is minimaal 1 seconde nodig. De benodigde trajectlengte wordt daardoor onpraktisch lang (>>10 m)!

Open flash, ouderwets?!

Recept voor een 'moderne' open tussenkoeler

Van groot belang voor de koudemiddelinhoud, dus badhoogte, is het ontwerp van het borrelstelsel (zie afbeelding 4 en 5).

Te grote borrelgaten en/of te lage gassnelheden zullen tot discontinue borreling met grote bellen leiden. Om het gas voldoende af te kunnen koelen, is een lange borreltijd nodig. Gebruikelijk zijn dan ook badhoogtes van ca. 1 m, waardoor het nauwelijks wordt toegepast bij de dure synthetische koudemiddelen. Daar het streven naar geringere vulling bij behoud van functie een pré is, zal

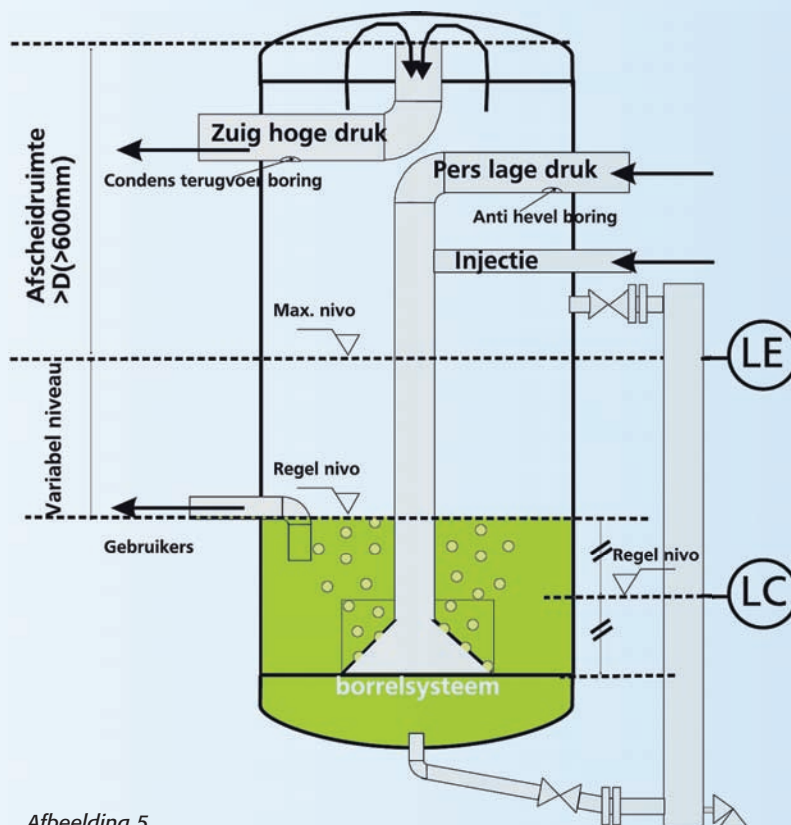
de badhoogte drastisch moeten worden gereduceerd.

Een doordacht ontwerp kan de vulling met >>80% laten afnemen:

- de voordruk in het borrelstelsel zal ca. 0,1K boven de tussendruk moeten liggen, dan zijn
- de bellen maximaal 2 keer de diameter van het borrelgat. Grotere bellen dan 1 cm, slaan tijdens het opstijgen kapot, dus
- moet de borrelgatdiameter < 5mm zijn;
- het borrelstelsel moet zo uitgevoerd zijn dat de borreldruk constant blijft, ook tijdens deellast.

Met een goed geconstrueerd borrelstelsel is het mogelijk om binnen 100 mm badhoogte de zware synthetische koudemiddelen tot 5K oververhitting af te koelen. Voor ammoniak is dan een badhoogte nodig van 200 mm. Bij 300 mm is het uitredende gas nagenoeg verzadigd.

De benodigde diameter van de open tussenkoeler zal afgestemd moeten worden op het maximaal te verwachten gasdebiet bij maximale gasdichtheid, dus bij opstartsituatie. Daar de stijgsnelheid van een bel maximaal 0,3 m/s bedraagt, is het niet zinvol de gassnelheid in het vat hoger te kiezen, ook al zou de valsnelheid van de afscheiden druppel dit wel toelaten. Gebaseerd op het voorgaande is de vattendiameter eenvoudig te



Afbeelding 5

berekenen uit het hogedruk slagvolume met de volgende afgeleide formule:

$$D_{ik}(mm) = K \cdot \left[V_{slagHD} \cdot \left(\frac{m^3}{h} \right) \right]^{0,5} K_{R717} =$$

$$= 35 \text{ en } K_{Rxyz} = 40$$

Als de heersende druk in de tussenkoeler te gering is voor de inspuiventielen van de gebruikers, kan dit worden opgelost door het toepassen van een warmtewisselaar in of onder de tussenkoeler. Meestal wordt in het vloeistofbad van de tussenkoeler een spiraal, bestaande uit een of meerdere lengtes gewikkelde buis, geplaatst. Bij een condensatiesnelheid van ca. 2 à 3 m/s in de spiraal (drukverlies < 1bar) en een gewenste onderkoeling van < 10K boven de tussen'druk', kan er ca. 30 kW/m² worden overgedragen. Een spiraaldiameter passend bij de vatdiameter zal ca. 300 mm hoog worden, wat een verdrievoudiging van de koudemiddelvulling betekent. Een onder de tussenkoeler gebouwde warmtewisselaar is dan een goede maar dure oplossing.

Een vaak vergeten detail in een tussenkoeler is het antihevelgat. Dit gat, aangebracht in de borrelbuis ruim boven het maximum niveau, zorgt ervoor dat bij stilstaande compressor het vloeistofbad niet de compressor in wordt geheveld. Dat laatste kan gebeuren doordat de pers- c.q. zuigkleppen altijd, al is het marginaal, lekken. De injectie is bij voorkeur aan te brengen op de borrelbuis. Als men dit niet doet, zal door het flashen van het geïnjecteerde condensaat een heftige sproeiageel ontstaan, waardoor het gasdeel onnodig veel hoger moet worden. Bij een snelheid van 0,3 m/s zal het vloeistofbad bestaan uit meer dan 50% damp. Het niveau in een buitenliggende standpijp, waar geen gas door de vloeistof borrelt, ligt dan ook minimaal de helft lager. De in de standpijp aangebrachte niveau-

regelaar moet dus op de helft van het gewenste niveau worden ingesteld. De afstand tussen de vloeistofspiegel en de zuigstomp moet minimaal gelijk zijn aan de diameter van het vat maar niet minder dan 600 mm. Mocht de tussenkoeler ook worden gebruikt voor opvang van koudemiddelvariatie aan de gebruikerskant, dan zal het vloeistofbad zover moeten kunnen variëren.

Voordelen:

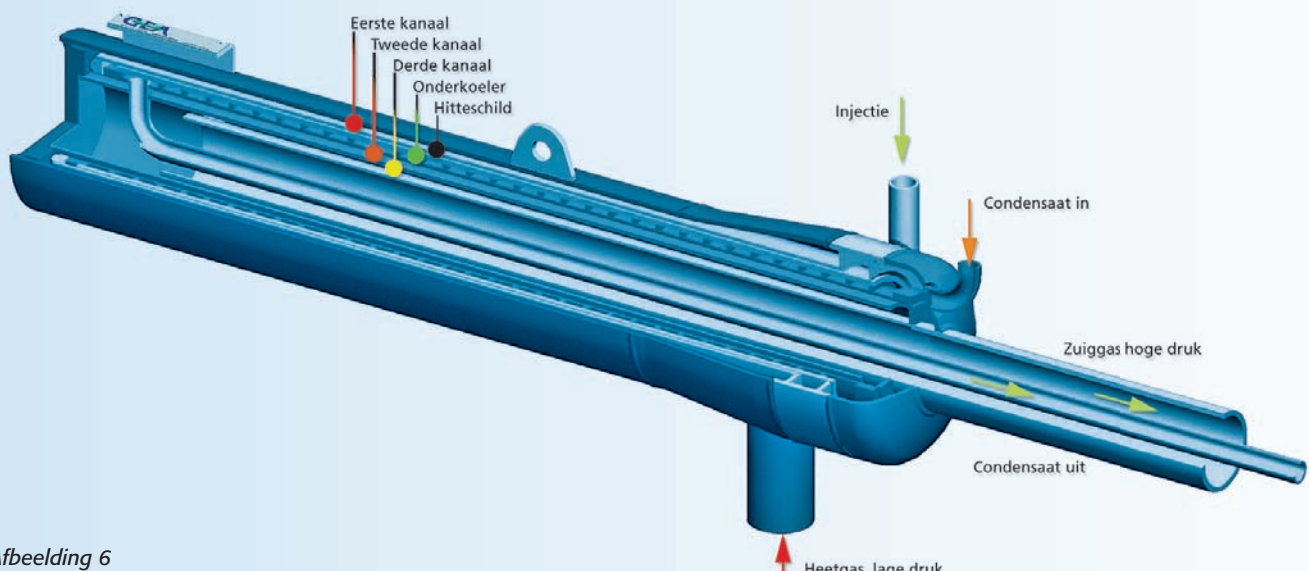
- afkoeling van het lagedrukpersgas tot verzaadiging mogelijk
- door bufferfunctie minder gevoelig voor fluctuaties in condensataanvoer
- door het vloeistofafscheidende vermogen blijft olie achter en kan bij NH₃-installaties worden teruggevoerd naar de compressor
- condensaat kan tot tussen'druk' worden onderkoeld
- hoogst mogelijke COP

Nadelen

- hoge koudemiddelvulling
- geringe voordruk bij opstart over gebruikerinjectie
- druk-egaliseratie nodig voor onbelaste opstart
- langere 'pull down'-tijd
- door het vloeistofafscheidende vermogen blijft olie achter, wat het lagedrukstelsel kan vervuilen
- 2 olieafscidders per compressor nodig
- extra leidingwerk, afsluiters, terugslagklep en zuigfilter
- isolatie
- automatische inbloeafsluiters om drukvat
- niveauregeling en alarm
- complex en duur.

Ammoniak-DX is Niks?!

Tussenkoeler met gaskoeling en/of condensaat-onderkoeling door koudemiddelinjectie



Afbeelding 6

Omdat een dergelijk tussenkoelsysteem veel goedkoper is, blijft het de ontwikkelingsgeest prikkelen. Zoals boven blijkt, is er voor verdamping van een zwevende druppel een onpraktisch lang stromingskanaal nodig. Tot nu toe probeert men dit met 'trucs' op te lossen en doet daarmee de fysica, en dus de aangesloten compressorcilinders, geweld aan. Het verkorten van het zweeftraject blijkt niet zinvol, omdat een druppel eenvoudig een bepaalde verdampingstijd nodig heeft.

Het antwoord op deze contradictie is, rem de druppels dus af!

Als een met druppels bezwangerde gasstroom met voldoende snelheid door een spleetvormig kanaal stroomt, zullen de druppels naar de spleetwand toe vliegen alsof ze daardoor worden aangetrokken. Dit wordt het coanda-effect genoemd. De tegen de spleetwand aangevlogen druppels stromen nu met zeer lage snelheid ($\ll 1$ m/s) verder. Door diverse richtingsveranderingen zullen uiteindelijk alle druppels tegen de spleetwand slaan en afgeremd zijn. Om te voorkomen dat de afgeremde vloeistof onder invloed van de zwaartekracht naar beneden zakt en niet de gehele spleetwand bevochtigt, dient de gasnelheid voldoende hoog te zijn. De snelheid in de warmtewisselaar moet boven de ringsnelheid worden gehouden, alleen dan wordt het totale warmtewisselende oppervlakte bevochtigt. Bij directe expansie is de volledige bevochtiging ook nodig om het regelmechanisme, de oververhitting, bij alle condities stabiel te houden. Het bij deellast opvullen van de verdamperpijpen, beekjesstroming, zal anders tot 'hunting' van het expansieventiel leiden.

De verdeling van het gasvloeistofmengsel na het expansieventiel over de diverse gebruikers, is een huzarenstukje op zich. Immers het volumepercentage gas ligt ruim boven de 90%, er blijft dus nog maar zeer weinig vloeistof over om te verdelen.

Bij het geotrooieerde **Grasso tussenkoelsysteem B** is dit opgelost door gebruik te maken van maar 1 enkel verdamperkanaal! Het hete gas van de lagedruktrap stroomt langs de met verdampend koudemiddel bevochtigde buiswanden en koelt daardoor af. Het gas doorloopt meerdere passages. De binnenwand van de eerste passage is dubbelwandig uitgevoerd en vormt daarmee een kanaal voor het te onderkoelen condensaat. Het geïnjecteerde koudemiddel komt binnen tussen de onderkoeler en een hitteschild. Dit laatste houdt het verdampende koudemiddel weg van de buitenmantel, zodat koude-isolatie overbodig is.

Om de met het persgas meegevoerde olie onder alle condities mee te blijven voeren, is het systeem horizontaal geplaatst. Het gaszijdige drukverlies ligt op hetzelfde niveau als bij de open

tussenkoelerceten (vollast $< 3K$). Met de open tussenkoelerceten wordt achtereenvolgens bedoeld: persleiding, olieafscheider, terugslagklep, afsluiter, tussenkoeler, afsluiter en zuigfilter. Bij het systeem B vervallen al deze componenten, wat de eenvoud, het bouwvolume en de investering ten goede komt. De geïntegreerde onderkoeler heeft een maximaal drukverlies van 1 bar.

Omdat het extreem hoog belaste koelers betreft (> 50 kW/m²), is de reactietijd navenant. Ter illustratie: een luchtkoeler heeft een reactietijd van ca. 2 minuten, de Grasso systeem B tussenkoeler reageert binnen de 4 seconden op een injectieverandering. Een continue condensaattoevoer is dus uitermate belangrijk. De aanvoering naar het expansieventiel moet dan ook prioriteit hebben boven die van de gebruikers (zie schema). Het expansieventiel op deze tussenkoeler kan een mechanisch of elektronisch ventiel zijn. Mechanische ventielen hebben een reactietijd van ca. 3 minuten, waar de capaciteitsregeling op moet worden afgestemd. Meestal is een snellere respons van de compressor gewenst en dan bieden elektronische expansieventielen uitkomst. Deze kunnen worden aangesloten op de compressorbesturing (Grasso Monitron of GSC) of enkel een oververhittingregelaar (Danfoss EKC315A).

Nadelen:

- gevoelig voor discontinue condensaatvoer
- hogere oververhitting dan bij open flash
- COP voor Ammoniak ca. 3 % lager dan open flash.

Voordelen:

- koudemiddelvulling $\ll 1\%$ van de open flash
- geïntegreerd met de compressor, dus uitermate compact
- geen extra vloerruimte nodig voor tussenkoelsysteem
- geen isolatie nodig
- maar 1 olieafscheider per compressor
- korte 'pull down' tijd
- ongevoelig voor variabele tussendrukken
- eenvoudig
- tot 20% investeringsbesparing op het aggregaat
- tot 60% besparing op de installatiekosten.

Status Quo:

De door Grasso ontwikkelde directe expansie (DX)-tussenkoeler is sinds zijn introductie bij enkele honderden compressoren succesvol ingezet. De significante kostenbesparing die met het Grasso systeem B te behalen is, compenseert ruimschoots de iets lagere COP.

Volgende maand gaat het Grasso-artikel over Deellast.

Mocht u reacties en/of vragen hebben over dit artikel of een van de vorige dan kunt u contact opnemen met:

Grasso Products b.v.,
Heleen van Hout,
tel.: (073) 6203 782,
hvhout@grasso.nl.

Alle artikelen kunt u terugvinden op de Grasso site: www.grasso-global.com
>News & Events>
Latest News