

# De juiste $\phi$ ?!

door: Titus M.C. Bartholomeus, Senior Development Engineer, Grasso Products b.v.

Hans Böger Product manager zuigercompressoren, Grasso Products b.v.

## Inleiding

In dit artikel gaan we in op de juiste tweetrapscompressor keuze voor een specifieke koel- of vriestoeppassing. In het vorige artikel (RCC 3) hebben we laten zien, waarom en wanneer we tweetraps zuigercompressoren toepassen, wat hoofdzakelijk wordt bepaald door twee criteria:

- Overschrijding van het "eentraps" inzetgebied van de compressor in combinatie met het gekozen koudemiddel
- Het slechte volumetrisch & isentropisch rendement bij hoge drukverschillen en "eentrapscompressie", met als gevolg een groter slagvolume en hoger energieverbruik.

Is op basis van deze criteria gekozen voor een tweetrapscompressor, dan zal het gebruik hoofdzakelijk worden bepaald door de maximale tussendruk en persgastemperatuur:

- De verhouding van het lagedrukslagvolume en het hogedrukslagvolume, hierna  $\phi$  genoemd bepaalt de uiteindelijke tussendruk  $p_m$ .
- De drukverhouding tussendruk/zuigdruk ( $p_m/p_o$ ) en condensordruk/tussendruk ( $p_c/p_m$ ) bepaalt de persgastemperatuur van respectievelijk de lage en hoge druk. In de praktijk ligt de beperking voornamelijk bij het koudemiddel ammoniak vanwege de hogedrukpersgastemperatuur.

Een Grasso compressor is modulair opgebouwd, zo is iedere cilinder van een bepaalde serie gelijk. Gebruikt men als basis het huis van bijvoorbeeld een 9 cilinder, dan kunnen daar twee 2-trappers uit worden gebouwd:

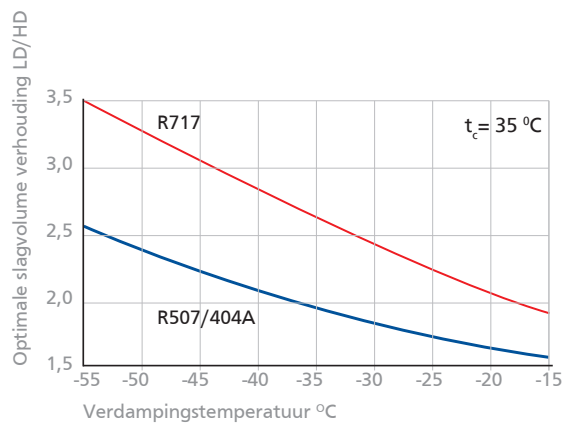
- een met 7 lagedrukcilinders en 2 hogedrukcilinders een  $\phi$  van 3, 5, of
- een met 6 lagedrukcilinders en 3 hogedrukcilinders een  $\phi$  van 2.

Bij Grasso tweetraps zuigercompressoren lopen, afhankelijk van serie en model, de standaardverhoudingen van  $\phi = 2$  tot 5, waardoor in de meeste gevallen de meest optimale selectie kan worden gemaakt.

## Energetisch optimale $\phi$

De energetisch optimale drukverhouding, waarbij het rendement het hoogst is, wordt bereikt als de drukverhouding over de lagedruktrap gelijk is aan de drukverhouding over de hogedruktrap. Hieruit volgt dan voor de optimale tussendruk  $p_m = \sqrt{p_o \times p_c}$ . Wel dient altijd te worden nagegaan of bij deze tussendruk wordt voldaan aan de eisen van het toepassingsgebied. In

afbeelding 1 is voor een condensatie "druk" van ca. 35 °C, bij verschillende zuig "drukken" (verdampingstemperatuur) de  $\phi$  uitgezet, waarmee de optimale drukverhouding wordt gerealiseerd.



Afb. 1

Welke cilinderaantallen zijn nu gunstig om te gebruiken als 2-trappers gebaseerd op modulaire bouw. Dus HD- en LD-cilinders hebben een gelijke slag en diameter.

Dit geeft de volgende resultaten:

- voor de zware koudemiddelen met kleine kappa is 2-traps bedrijf beneden de -30 °C commercieel interessant, dus hebben we een  $\phi$  van 2, maximaal 2,5 nodig. Een  $\phi$  van 2 biedt de meeste alternatieven en wel:

| * Totaal aantal cilinders    | 3 | 6 | 9 | 12 |
|------------------------------|---|---|---|----|
| Cilinders in de lagedruktrap | 2 | 4 | 6 | 8  |
| Cilinders in de hogedruktrap | 1 | 2 | 3 | 4  |

- voor ammoniak in het gebied tussen de -15 en -25 °C is ook een  $\phi$  van 2 benodigd en resulteert in dezelfde machines als voor de zware koudemiddelen. In het typische vriesgebied is een  $\phi$  van 3 benodigd en voor extreem lage temperaturen een  $\phi$  van 3,5. Voor deze laatste is de enige oplossing een 9 cilinder met 7 cilinders in de lage druk (LD) en 2 in de hoge druk. Voor een  $\phi$  van 3 komen in principe maar 3 machines in aanmerking:

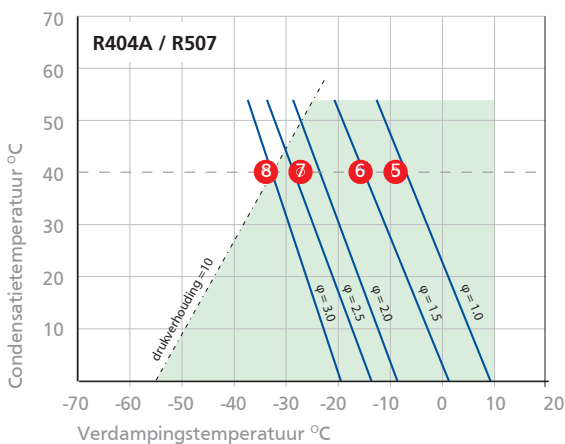
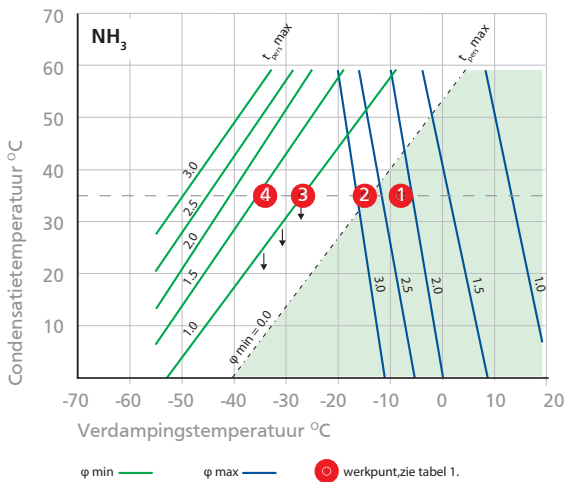
| ** Totaal aantal cilinders   | 4 | 8 | 12 |
|------------------------------|---|---|----|
| Cilinders in de lagedruktrap | 3 | 6 | 9  |
| Cilinders in de hogedruktrap | 1 | 2 | 3  |

Bij deze machines moet nauwlettend naar het schakelgedrag worden gekeken. Zie ook fast pull down.

**Conclusie: voor vriezen is bij "freon" een  $\phi$  van 2 en ammoniak een  $\phi$  van 3 de beste oplossing.**

## Capaciteitsregeling

Bij sommige machines verandert de volumeverhouding bij capaciteitsschakeling. Daarmee verandert ook de tussendruk en moet er dus worden gecontroleerd of de machine onder die condities nog binnen het toepassingsgebied opereert. Een handig hulpmiddel om dit te bepalen zijn onderstaande grafieken (zie afbeelding 2 en 3). In de R404A+R507 grafiek staan alleen de lijnen voor maximale  $\varphi$  ( $\varphi_{\max}$ ). De bij deze conditie gebruikte  $\varphi$  moet hieronder blijven om de maximale tussendruk niet te overschrijden. Bij ammoniak worden daaraan ook de minimale  $\varphi$  ( $\varphi_{\min}$ ) lijnen toegevoegd. De bij deze conditie gebruikte  $\varphi$  moet hierboven blijven om te voorkomen dat de maximale persgastemperatuur van de hogedruk wordt overschreden.



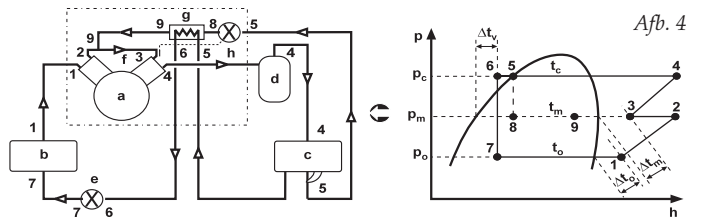
Afb. 2

Afb. 3

## $\varphi$ berekening:

Uiteraard kunnen bij de heersende werksituatie de toegestane  $\varphi$ 's door de besturing worden berekend.

Afbeelding 4. Uit de enthalpie- en massabalans over de tussendruk, is de  $\varphi$ -formule af te leiden:



$$\varphi = \frac{v_1' \cdot \left( A \cdot \frac{p_c}{p_m} + B \right) \cdot (h_3 - h_5)}{v_3' \cdot \left( A \cdot \frac{p_m}{p_o} + B \right) \cdot (h_2 - h_7)}$$

- h enthalpie van de betreffende conditie (J/kgK)
- $v''$  soortelijk volume van het gas bij de betreffende conditie ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ).
- p druk van de betreffende conditie (bar)
- A en B compressor- en koudemiddelaafhankelijke constantes gebruikt om het volumetrisch rendement te berekenen:

$$\lambda_{\text{vol}} = A \cdot \frac{p_{\text{pers}}}{p_{\text{zuig}}} + B$$

Voor een Grasso 10 zien deze er op dit moment als volgt uit:

Het streven naar steeds betere volumetrisch rendementen vereist een continue ontwikkeling. De constantes A en B zijn dus aan verandering onderhevig.

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| $T_{\text{pers}}$ max=155°C | Grasso 10 |
| $P_{\text{mmax}}$ R507      | 8,5       |
| A R507                      | -0,055    |
| B R507                      | 0,97      |
| $p_{\text{mmax}}$ R717      | 8,5       |
| A R717                      | -0,0473   |
| B R717                      | 0,9659    |

### Het berekenen van de maximale $\phi$ ( $\phi_{\max}$ ), om de tussendruk beneden de maximale te houden:

Om de maximale  $\phi$  ( $\phi_{\max}$ ) te berekenen waarmee mag worden gedraaid, zullen voor de waardes behorende bij de tussendruk de maximale waardes moeten worden gebruikt:

- $v''_3$  en  $h_3$  bij de maximale tussendruk en 10K (systeem B) oververhitting
- $p_m$  is de maximale tussendruk
- $h_2$  bij de maximale tussendruk en maximale persgastemperatuur
- $h_7$  bij de verzadigingstemperatuur van de maximale tussendruk plus mogelijke oververhitting
- de overige waardes passend bij de werkconditie.

### Het berekenen van de minimale $\phi$ ( $\phi_{\min}$ ), om bij ammoniak de persgastemperatuur van de hoge druktrap beneden de maximale te houden:

De persgastemperatuur die ontstaat na compressie hangt van te veel factoren af om op dezelfde wijze als hierboven de minimale  $\phi$  ( $\phi_{\min}$ ) te kunnen berekenen. Door de toepassing te beperken tot het koudemiddel ammoniak en een tussen"druk" gebied van -25 tot +15 °C, is toch een betrouwbare berekening te maken. De minimale tussen"druk" is uit een tabel af te lezen na berekening van  $t_{\min}$ :

- $t_{\min}$   $t_c - M + N \times dT_{om}$
- $dT_{om}$  de te verwachten oververhitting op de tussendruk
- Vollast  $M=50$  en  $N=0,45$
- Deellast  $M=40$  en  $N=0,35$
- de overige waardes passend bij de werkconditie

Per koudemiddel en toepassing zullen er in de besturing tabellen moeten worden aangelegd, waar naar teruggegrepen wordt om voortdurend de toegestane  $\phi$ 's te berekenen. Geïnteresseerden kunnen contact opnemen met Grasso Products voor gedetailleerdere informatie.

In de praktijk zijn er 2 soorten tweetraps installaties:

#### Installatie met 1 temperatuurniveau:

Voor deze systemen is de verdampingstemperatuur dus zuigdruk relevant en afgestemd op het proces. De tussendruk wordt dan bepaald door de slagvolumeverhouding tussen het lage- en hogedruk deel van de tweetraps compressor(en). Dit is typisch een toepassing voor een compound compressor.

#### Installatie met meerdere (2) temperatuur niveaus:

In het algemeen zal een dergelijke installatie als booster-systeem met aparte HD- en LD-compressoren worden gebouwd. Hiermee kunnen beide temperatuurniveaus op de gewenste waarde worden gehouden, ongeacht de belasting op de temperatuurniveaus. Compound compressoren kunnen hier alleen met succes worden toegepast als de belasting constant is.

Daar het doel van het artikel is, om inzicht te verstrekken in de juiste keuze compressor, beperken we ons tot installaties met 1 temperatuurniveau.

Om inzicht te krijgen in het bovenstaande, zullen we een invriesproces stapsgewijze volgen:

- 12 Ton waterig (80%) product per etmaal
- Voorkoeltijd ca. 2 uur (6 °C naar vriespunt -1 °C)
- Vriestijd ca. 12 uur
- Doorvriestijd ca. 2,5 uur (van vriespunt tot -20 °C in de kern)
- Luchtcirculatie zodanig dat het temperatuurverschil tussen product en de lucht 7K bedraagt
- Temperatuurverschil over koeler 7K (gemiddelde luchttemperatuur/verdampingstemperatuur)
- Leggen we de luchtkoelers uit op het procesafloop bepalende vriezen, dan ligt de verdampingstemperatuur  $t^o$  daarbij op -1-7-7=-15 °C.
- Tijdens het voorkoelen zal door ontvochtiging de warmteoverdracht van de koeler hoger zijn, daardoor zal het benodigde temperatuurverschil kleiner zijn. Gemiddelde  $t^o = -8^oC$ .
- Bij het doorvriezen zal het product slechter zijn warmte afstaan. Dat, samen met de toenemende rijplaag, verhoogt het benodigde temperatuurverschil. Gemiddeld wordt er op -26 °C gedraaid, op het eind -34 °C.

De benodigde vermogens worden nu:

- Voorkoel :  $12.000 \times 3,52 \times 7 / (2 \times 3600) = 41 \text{ kW}$
- Vries :  $12.000 \times 268 / (12 \times 3600) = 74 \text{ kW}$
- Doorvries :  $12.000 \times 1,77 \times 19 / (2,5 \times 3600) = 45 \text{ kW}$

Dit kan worden geleverd door een 2-trapscompressor Grasso 10. Kijken we dan naar 2 verschillende koudemiddelen, ammoniak en R507, dan:

- zal men bij het koudemiddel ammoniak gebruik maken van een verdampingscondensator ( $t_c = 35^oC$ ). Een Grasso 3110 op 1470 rpm kan dan de klus klaren. Zie tabel 1, koudemiddel R717
- zal men bij het koudemiddel R507 gebruik maken van een luchtgekoelde condensator ( $t_c = 40^oC$ ). De voorgescreven zuiggasoververhitting is  $>15K$ . Door de slechtere warmteoverdracht van R507 ligt de verdam-

| Koudemiddel          | Proces       | Tijd in uren | Gewenste koelcapaciteit kW | Product temperatuur van °C | Product temperatuur naar °C | Gemiddelde / eind verdampings-temperatuur °C | Compressor bedrijf | Capaciteit % | Cilinders lagedruktrap | Cilinders hogedruktrap | $\phi$ | Koelcapaciteit compressor kW | Tussen "druk" °C | Asvermogen kW | Punt in R507 toepassingsgebied afb. 2/3 | Persgastemperatuur hogedruktrap °C |
|----------------------|--------------|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|--------------------|--------------|------------------------|------------------------|--------|------------------------------|------------------|---------------|---|------------------------------------|
| NH <sub>3</sub> R717 | voorkoelen   | 2            | 41                         | 6                          | -1                          | -8/-13                                       | 1 traps            | -            | 0                      | 1                      | -      | 42                           | -8               | 12,5          | 1                                       | 140                                |
|                      | vriezen      | 12           | 74                         | -1                         | -1                          | -15  | 2 traps            | 67           | 2                      | 1                      | 2      | 76                           | 9                | 24,5          | 2                                       | 92                                 |
|                      | doorvriezen  | 2,5          | 45                         | -1                         | -20                         | -27/-34                                      | 2 traps            | 67           | 2                      | 1                      | 2      | 46                           | -2               | 21            | 3                                       | 122                                |
|                      | eindconditie |              | 45                         | -                          | -20                         | -34  | 2 traps            | 100          | 3                      | 1                      | 3      | 44                           | -1               | 23,7          | 4                                       | 120                                |
| R507                 | voorkoelen   | 2            | 41                         | 6                          | -1                          | -9/-14                                       | 1 traps            | -            | 0                      | 2                      | -      | 44                           | -9               | 18            | 5                                       | -                                  |
|                      | vriezen      | 12           | 74                         | -1                         | -1                          | -16  | 2 traps            | 75           | 3                      | 2                      | 1,5    | 74,5                         | 9                | 37,1          | 6                                       | -                                  |
|                      | doorvriezen  | 2,5          | 45                         | -1                         | -20                         | -28/-35                                      | 2 traps            | 75           | 3                      | 2                      | 1,5    | 50                           | -2               | 31            | 7                                       | -                                  |
|                      | eindconditie |              | 45                         | -                          | -20                         | -35  | 2 traps            | 100          | 4                      | 2                      | 2      | 46,9                         | -1               | 32,8          | 8                                       | -                                  |

Tabel 1

pingstemperatuur 1 à 2K lager dan bij ammoniak. De Grasso 3110 is niet geschikt voor deze toepassing. Een Grasso 4210 op 980 rpm, kan de klus klaren. Zie tabel 1, koudemiddel R507.

### Fast pull down (FPD)

De vriesconditie zou bij een standaard  $\phi$  van 2 tot een te hoge tussendruk leiden. Doordat elke cilinder is voorzien van z'n eigen deellastmechanisme, bestaat de mogelijkheid om voor bepaalde gevallen van de standaard capaciteitsregeling af te wijken. Deze optie wordt

wel de z.g. "Fast pulldown" optie genoemd. In tabel 2 is voor boven gebruikte compressoren zowel de standaard als de "fast pull down" capaciteitsregeling afgebeeld. Bij compressoren die op een batch vriezer staan, waarbij meerdere malen per etmaal bij hoge temperaturen wordt opgestart, zal men naast de normale deellaststappen een pulldownschemata moeten opzetten. Hierin wordt dan zowel het 1-traps deel als het 2-traps deel opgenomen. Het overschakelen van 1 naar 2-traps gebeurt op basis van de verdampingstemperatuur (zuigdruk) of door gebruik te maken van de berekende toegestane  $\phi$ . Afhankelijk van het aantal cilinders dat beschikbaar is voor 1-traps bedrijf, zal het verlagen van de zuigdruk een bepaalde tijd in beslag nemen. Tijd = geld, dus, als we deze tijd kunnen verkorten door bijvoorbeeld extra hogedruk cilinders in te kunnen schakelen tijdens deze "pulldown" tijd, levert dat economisch gezien voordeel op. Een  $\phi = 1$  is zelfs mogelijk als overbrugging. De mogelijkheden hiervoor zijn natuurlijk afhankelijk van de compressorconstructie, met name het totaal aantal cilinders. Na het bereiken van de ontwerpconditie wordt de standaard capaciteitsregeling van kracht.

Volgende maand gaan we verder in op de laatste stand op het gebied van tussenkoelsystemen. Mocht u reacties, vragen en/of opmerkingen over dit artikel hebben of m.b.t. de Grasso artikelen van vorige maanden, 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](http://www.grasso-global.com) > News&Events > Latest News.

| Type              | Capaciteit | Opm.    | Cilinders   | Magneetklep | $\phi$ |
|-------------------|------------|---------|-------------|-------------|--------|
| Grasso 3110       | 0 %        | Starten | 2           | -           | 0.0    |
|                   | 67 %       | -       | 1+2+3       | 1           | 2.0    |
|                   | 100 %      | -       | 1+2+3+4     | 1+2         | 3.0    |
| Grasso 3110 + FPD | 0 %        | Starten | 2           | -           | 0.0    |
|                   | 33 %       | Starten | 1+2         | FPD         | 1.0    |
|                   | 67 %       | -       | 1+2+3       | 1+FPD       | 2.0    |
| Grasso 4210       | 0 %        | Starten | 2           | -           | 0.0    |
|                   | 50 %       | -       | 1+2+3       | 1           | 2.0    |
|                   | 75 %       | -       | 1+2+3+6     | 1+3         | 3.0    |
| Grasso 4210 + FPD | 100 %      | -       | 1+2+3+4     | 1+2+3+4     | 2.0    |
|                   | 0 %        | Starten | 2           | -           | 0.0    |
|                   | 25 %       | Starten | 2+4         | FPD         | 0.0    |
|                   | 50 %       | Starten | 1+2+3+4     | 1+FPD       | 1.0    |
|                   | 50 %       | -       | 1+2+3       | 1           | 2.0    |
|                   | 75 %       | -       | 1+2+3+4+6   | 1+3+FPD     | 1.5    |
| Grasso 4210 + FPD | 75 %       | -       | 1+2+3+6     | 1+3         | 3.0    |
|                   | 100 %      | -       | 1+2+3+4+5+6 | 1+2+3+FPD   | 2.0    |

Tabel 2