

Warmtepompen

1 Inleiding

In de chemische industrie is er veelal een overschot aan warmte op een laag temperatuurniveau, deze warmte wordt meestal afgevoerd door middel van koelwater en lucht. Door deze warmte met behulp van een warmtepomp op een hoger temperatuurniveau (max. ca. 50 °C temperatuurstijging) te brengen kan ze worden hergebruikt hetgeen tot energie- en kostenbesparing leidt. Bovendien worden emissies die gepaard gaan bij het gebruik van fossiele brandstoffen aanzienlijk verminderd.

In deze brochure wordt het principe van de warmtepomp beschreven, tevens worden de verschillende uitvoeringsvormen alsmede de belangrijkste componenten van een warmtepomp behandeld. De economische aspecten van de warmtepomp worden toegelicht en er worden een aantal voorbeelden van praktische toepassingen gegeven.

2 Algemeen

2.1 Functie van de warmtepomp en energiebesparing

Warmtepompen waarden warmtestromen op door verhoging van het temperatuurniveau, zoals een vloeistofpomp water op een hoger niveau brengt. Zo kan met behulp van een warmtepomp warmte die vrijkomt bij condensatie van het topproduct van een destillatiekolom nuttig worden gebruikt bij het verwarmen van de kolombodem via de reboiler. Op deze wijze wordt niet alleen energie bespaard, maar vervalt ook de condensor van het topproduct en dus ook het gebruik van koelwater.

Warmtepompen winnen warmte uit een 'bron', verhogen deze in temperatuur en geven deze warmte op een nuttige plaats - de 'put'- af. Per saldo wordt dus (rest)warmte teruggekomen. Hoewel warmtepompen zelf aangedreven moeten worden met energie (warmte of elektriciteit), is deze hoeveelheid 'aandrijfenergie' veel lager dan de hoeveelheid nuttige energie die aan de put in de vorm van warmte wordt afgegeven. De hoeveelheid warmte die aan de bron wordt onttrokken plus de aandrijfenergie is steeds gelijk aan de hoeveelheid warmte die aan de put wordt afgegeven (wet van behoud van energie). Er wordt dus energie bespaard ten opzichte van de situatie dat in de warmtebehoefte van de 'put' moet worden voorzien door toepassing van fossiele brandstof. De hoeveelheid bespaarde energie is in principe gelijk aan de hoeveelheid onttrokken warmte - die anders verloren zou gaan - aan de bron. Uiteraard dient rekening gehouden te worden met het feit dat de aandrijfenergie van de warmtepomp meestal elektriciteit is en dus per eenheid een hogere brandstofinzet vergt dan warmte. De voor warmtepompen belangrijke verhouding: nuttige warmte/ aandrijfenergie wordt "Coëfficiënt Of Performance" (C.O.P.) genoemd.

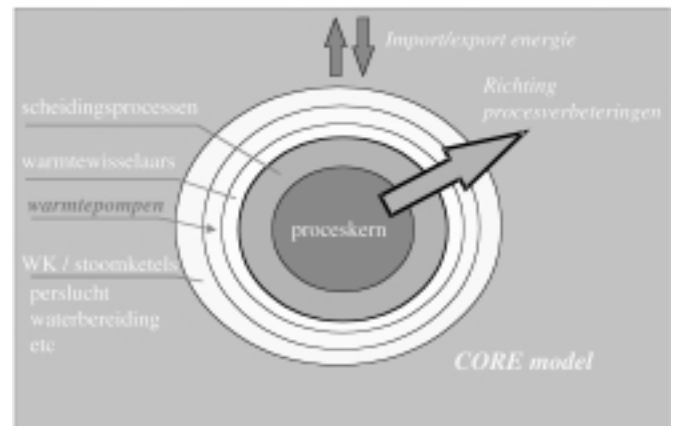
2.2 De warmtepomp en energiebesparingstechnieken

In principe wordt voor het toepassen van energiebesparings-

technieken het zgn. CORE model gehanteerd (CORE = Correct Orders for Reduction of Energy consumption). Dit model geeft aan dat verbeteringen in een zekere volgorde vanuit de kern plaats dienen te vinden:

1. procesoptimalisatie en innovatie in reactoren en scheidingsprocessen;
2. warmte terugwinning via warmte wisselaars;
3. warmte terugwinning via warmtepompen;
4. optimalisatie van utilities en inkoop /verkoop van energie;

In principe dienen de mogelijkheden 1. en 2. dus eerst benut te worden alvorens de toepassing van warmtepompen overwogen wordt. In tegenstelling tot verkoop van overtollige elektriciteit is verkoop van overtollige warmte zeer moeilijk: om deze reden dient het ontstaan van voor de processen onbruikbare (rest)warmte vermeden te worden.



Figuur 2.1 Het CORE model (Correct Orders for Reduction of Energy consumption)

2.3 Duurzaamheid

Doordat warmtepompen energie besparen en brandstofgerelateerde emissies (m.n. CO₂) reduceren belasten zij het milieu minder dan conventionele warmtevoorziening. Als de restwarmte uit fossiele brandstoffen afkomstig is dan is er - volgens de definities van het ministerie van Economische Zaken - geen sprake van duurzaam opgewekte energie. Als de bron wordt gevormd door reactiewarmte die vrijkomt bij het vormen van chemische producten, dan is de warmte door de warmtepomp geproduceerd naar onze mening duurzaam opgewekt. Doordat de afvoer van restwarmte vervalt, vermindert hierdoor de milieubelasting van het proces (geluid, koelwater en horizon).

2.4 Rentabiliteit

De rentabiliteit van warmtepompen wordt vooral bepaald door het aantal bedrijfsuren op jaarbasis, de prijsverhouding van aandrijfenergie/fossiele energie en de reeds genoemde C.O.P. Hoe hoger het aantal bedrijfsuren en de C.O.P. en hoe lager de verhouding aandrijfenergie/fossiele energie, hoe rentabeler de warmtepomp. Door de beschikbare analyse tools

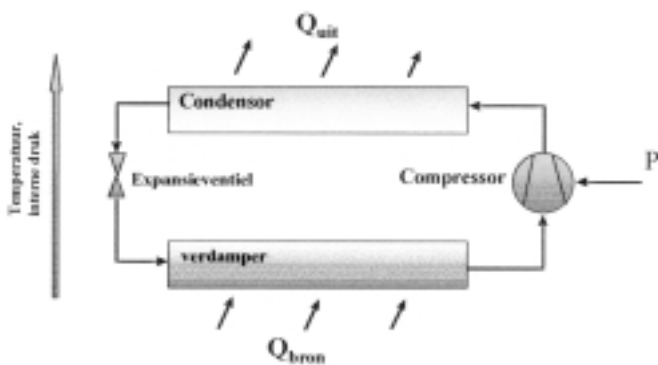
voor thermodynamische, technische en economische aspecten van processen zal het toepassen van onrendabele warmtepompen niet voor hoeven te komen. Het programma ODESSY (Optimal Design of Energy Supply SYstems) is een voorbeeld van zo'n analyse tool, specifiek - maar zeker niet uitsluitend - gericht op warmtepomptoepassingen [User Manual ODESSY, 12]. Dit betekent echter niet, dat iedere potentiële warmtepomptoepassing ook rendabel zal zijn. Het aantal toegepaste warmtepompen in de chemische industrie is vooralsnog beperkt.

2.5 Toepassing van warmtepompen in de chemische industrie (zie hoofdstuk 7 ev.)

De warmtepomp, die zeer veel verschijningsvormen kent, wordt in de chemische industrie vooral toegepast bij thermische scheidingsprocessen: indampprocessen, droogprocessen en destillatieprocessen. Daarnaast zijn warmtepompen nuttig bij processen waarbij zowel de onttrekking aan de bron bij lage temperatuur nuttig is als de afgifte aan de put (warmtepompen met koelmachinefunctie) en toepassingen waarbij warmte op lage temperatuur nodig is (ruimteverwarming, opslagtankverwarming).

3 Warmtepompen: van principe tot apparaat

Het algemeen werkingsprincipe van een warmtepomp - in dit geval een warmtepomp van het gesloten type - wordt geïllustreerd aan de hand van het volgende schema:



Figuur 3.1 Principeschema gesloten warmtepomp

De hoge drukdamp uit de compressor stroomt naar de condensator en condenseert daar onder afgifte van warmte bij hoge temperatuur. De aldus ontstane vloeistof stroomt door een expansieventiel waarbij de druk daalt. Het damp/vloeistofmengsel komt vervolgens in de verdampert, waar alle vloeistof verdampt onder opname van warmte bij lage temperatuur. Deze lage druk damp wordt door de mechanisch aangedreven compressor op hogere druk gebracht, waarbij de temperatuur van de damp stijgt. Op deze manier wordt warmte van lage temperatuur op een hoger temperatuurniveau gebracht.

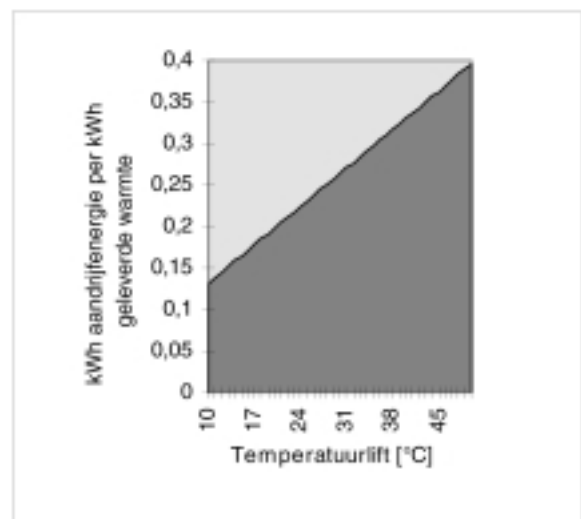
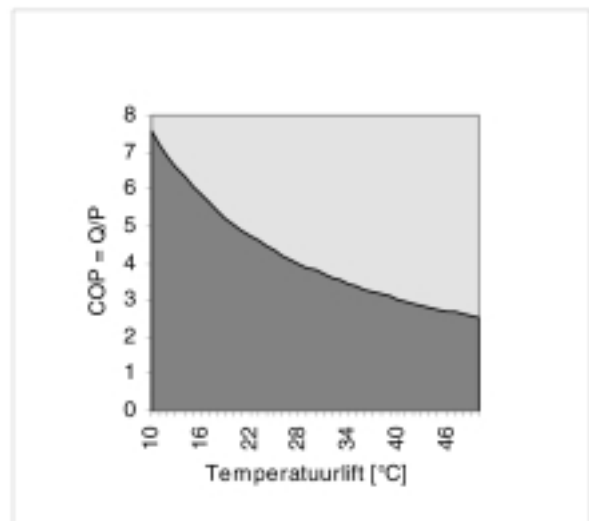
De verhouding:

$$C.O.P. = \frac{Q_{uit}}{P} \text{ [kW/kW, dus dimensieloos]}$$

wordt de Coëfficiënt of Performance (C.O.P.) genoemd. De C.O.P. wordt vooral bepaald door de absolute temperatuur van de condensator en het temperatuurverschil tussen condensator en verdampert en veel minder door de temperatuur:

$$C.O.P. = \eta_{carnot} \cdot \frac{T_{condensator}}{[T_{condensator} - T_{verdampert}]} \cdot [-]$$

Zo varieert - bij eenzelfde temperatuurlift - de theoretische C.O.P. niet meer dan een factor twee als de absolute condensortemperatuur van 30 °C naar 300 °C stijgt, hiermee de uitkomsten van eventuele warmtepomptoepassingen omspannend. Een daling van de temperatuurlift van 10 K naar 5 K heeft hetzelfde effect!



Figuur 3.2 De C.O.P. neemt sterk af bij stijgende temperatuurlift

Het rendement (ook wel Carnot-rendement genoemd) van de warmtepomp wordt weergegeven door η_{carnot} . Voor een ideale - niet realiseerbare - warmtepomp geldt: $\eta_{\text{carnot}}=1$. In de praktijk varieert η_{carnot} van 0,45 voor kleine gesloten warmtepompen tot 0,75 voor grote open warmtepompen.

	C.O.P.	$T_{\text{condensor}}$	T_{verdamp}	η_{carnot}
Warmtepomp 1	8,3	333	315	0,45
Warmtepomp 2	5,5	353	305	0,75

Dit Carnot-rendement is dus een maat voor de *efficiency* van de warmtepomp als apparaat, terwijl de C.O.P. de prestatie weergeeft van een warmtepomp met betrekking tot het opwaarderen van warmte. Deze prestatie wordt dus - zie bovenstaande formule - primair bepaald door de thermodynamische omstandigheden en pas in tweede instantie door het Carnot-rendement dat vrijwel altijd tussen 0,4 en 0,8 ligt.

Zo verricht warmtepomp 2 een betere prestatie dan warmtepomp 1, terwijl de C.O.P. van warmtepomp 2 toch lager is. Omdat het per saldo gaat om een hoge C.O.P. is het verbeteren van de thermodynamische omstandigheden - indien mogelijk - het eerste middel om het effect van een warmtepomp te vergroten. Naast de C.O.P. wordt ook het begrip Primary Energy Ratio (PER) gebruikt. Dit is de verhouding van de geleverde nuttige energie - al of niet in de vorm van warmte - en de hiervoor ingezette fossiele brandstof:

$$P.E.R. = \frac{Q_{\text{nuttig}}}{Q_{\text{fossiel}}} [-].$$

De PER van een elektrisch aangedreven warmtepomp (EWP) is derhalve:

$$P.E.R._{\text{ewp}} = \eta_{\text{centrale}} \cdot C.O.P._{\text{ewp}}.$$

Uitgaande van een centrale rendement van 50% is de PER ongeveer de helft van de C.O.P. Dit betekent dat de C.O.P. van een elektrisch gedreven warmtepomp tenminste de waarde twee moet aannemen om energie te besparen.

Indeling warmtepompen in open en gesloten typen

Type warmtepomp	Kenmerk	Proceswarmte	DT nuttige warmte - restwarmte
Gesloten warmtepomp	Werkmiddel in gesloten kringloop	< 65 °C	< 50 °C
Open warmtepomp	Werkmiddel = processtroom	< 300 °C	< 50 °C

Indeling warmtepompen naar type compressie

Type warmtepomp	Open warmtepomp	Gesloten warmtepomp
Mechanische compressie	Mechanische damp recompressie	Compressie warmtepomp
Thermische compressie	Stoom ejecteur	Absorptie warmtepomp

Warmtepompen komen in zeer veel vormen voor. Onderstaand schema geeft de indeling weer:

- Open en gesloten systemen. Open systemen maken voor het werkmedium gebruik van de procesdampen zelf, terwijl bij gesloten systemen gebruik wordt gemaakt van een gesloten circuit waarin een werkmiddel circuleert, zoals eerder uitgelegd.
- Mechanische of thermische aandrijving: bij mechanische aandrijving wordt het werkmiddel gecomprimeerd door een compressor, bij thermische aandrijving via een absorptie/ desorptiecyclus of door expanderende damp.

3.1 Gesloten compressiewarmtepompen.

De werking van de gesloten compressiewarmtepomp is eerder reeds uiteengezet. Soms wordt de compressor aangedreven met een gasturbine of een gasmotor. In feite is er in dat geval sprake van een WKK installatie waarvan de krachtopbrengst wordt gebruikt voor de aandrijving van een warmtepomp. Doordat bij de krachtopwekking warmte vrijkomt van een vrij hoog temperatuurniveau kan door serieschakeling een goede PER gecombineerd worden met een warmtelevering op een hoger temperatuurniveau. *Figuur 3.1* geeft het principeschema van de gesloten warmtepomp. Gesloten compressiewarmtepompen worden toegepast bij een condensortemperatuur tussen 50 en 110 °C. De temperatuurlift ligt in de praktijk meestal tussen 20 en 45 °C, waarbij de C.O.P. varieert tussen 6 en 2,5.

3.1.1 Werkmiddelen voor gesloten warmtepompen (zie ook VNCI brochure Koudemiddelen)

Er zijn zeer veel werkmiddelen beschikbaar voor warmtepompen. Bij de selectie spelen veiligheid, de optredende drukken, de drukverhouding tussen condensor en verdamp en de specifieke volumina van de dampstromen hierbij een belangrijke rol. Bovendien worden milieuoverwegingen steeds belangrijker bij de keuze van werkmiddelen. De toepassing van zgn. natuurlijke werkmiddelen zoals water en ammoniak krijgt steeds meer de voorkeur.

Gangbare werkmiddelen

Code	Chemische formule	Kritische temperatuur [°C]	Kookpunt [°C]	
			1 bar	20 bar
R22	CHClF ₂	96	-41	52
R32	CH ₂ F ₂	78	-52	31
R 113	CCl ₂ FCCl F ₂	214	47	178
R 134a	CH ₂ FCF ₃	101	-26	67
R 142b	CH ₂ CClF ₂	137	-10	97
R 290	Propaan (C ₃ H ₈)	96.8	-42	68 (25 bar)
R 502	R22/R115 Azeotroop	82	-46	48
R 600	n-Butaan (C ₄ H ₁₀)	152.1	-4	124 (25 bar)
R 600a	Isobutaan (C ₄ H ₁₀)	135	-11.7	108 (25 bar)
R 717	Ammoniak (NH ₃)	133	-33.3	58.2 (25 bar)
R 718	Water (H ₂ O)	374	100	212
R 1270	Propeen (C ₃ H ₆)	91.5	-47.7	48

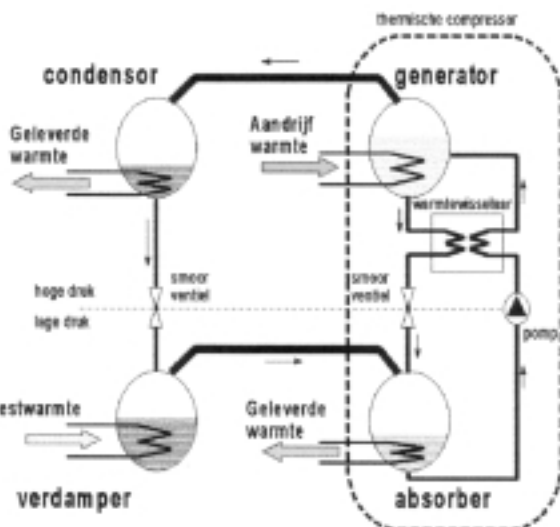
3.2 Gesloten absorptie warmtepompen (AWP)

Het is ook mogelijk een gesloten warmtepomp aan te drijven met warmte. Vooral als er veel restwarmte is en behoefte aan veel warmte op een relatief laag temperatuurniveau, kan een absorptiewarmtepomp aantrekkelijk zijn.

3.2.1 Werking

In absorptiewarmtepompen wordt het werkmiddel gecompri-meerd met behulp van een absorptie/ desorptiecyclus: het werkmiddel dat uit de verdamper komt wordt geabsorbeerd - onder afgifte van warmte - door een absorbens. Als vloeistof wordt dit mengsel met een drukpomp op druk gebracht en naar de generator gevoerd. Hier wordt onder invloed van warmte het werkmiddel verdampt en wordt het absorbens teruggevoerd naar de absorber. Het werkmiddel, dat nu in temperatuur en druk verhoogd is, condenseert in de verdamper en expandeert vervolgens naar de verdamper waarna de hele cyclus zich herhaalt. De meest voorkomende combinaties van werkmiddelen en absorbentia zijn water/lithiumbromide en ammoniak/water.

De PER van een absorptiewarmtepomp is vrijwel gelijk aan de C.O.P. van een absorptiewarmtepomp.



Figuur 3.3 Werkingsprincipe absorptiewarmtepomp

3.2.2 Toepassingsmogelijkheden

De absorptiewarmtepomp is door zijn opwarmtijd van 10 à 30 minuten niet geschikt voor sterk fluctuerende continue processen en batchprocessen. Bij toepassing in batchprocessen kan eventueel gebruik gemaakt worden van buffering, maar dit maakt de installatie wel duurder. De AWP kan goed met behoud van rendement in deellast worden bedreven als de belasting niet te snel fluctueert.

Voor de aandrijving wordt veelal lage-drukstoom gebruikt, waarbij de druk afhankelijk is van de gewenste eindtemperatuur en temperatuur van de warmtebron. Ook organische dampstromen uit de top van destillatiekolommen komen in aanmerking.

Omdat het pompen van vloeistof minder verliezen geeft dan het comprimeren van damp, kan de drukverhouding bij sorptiesystemen hoger gekozen worden dan bij compressiesystemen. Als gevolg hiervan is de temperatuurlift hoger dan bij compressiewarmtepompen, namelijk 30 tot 50 °C.

De C.O.P. van de absorptiewarmtepomp is 1,6 tot 1,8. Afhankelijk van de methode voor opwekking van de aandrijf-warmte is een PER mogelijk van 1,4 - 1,6.



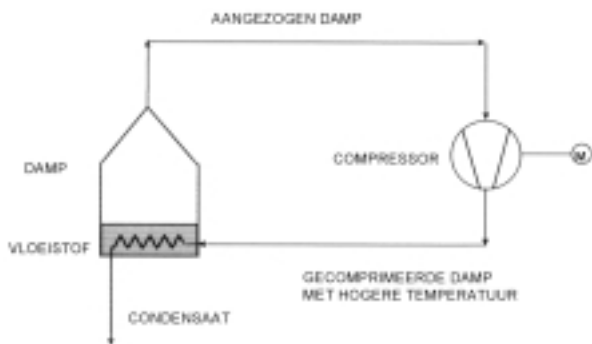
Absorptiewarmtepomp

3.3 Open warmtepompen met mechanische dampcompressie (MDR)

In een open systeem is de te comprimeren damp afkomstig uit het proces. Vaak is dit waterdamp, maar het kunnen ook koolwaterstoffen zijn bijv. propaan/ propene.

De warmtepomp dient ervoor om warmterugwinning door condensatie op een hoger temperatuurniveau mogelijk te maken. In een open systeem vindt alleen condensatie van de damp plaats. Een verdamper die in een gesloten systeem is geplaatst, is in een open systeem niet nodig daar het condensaat via het proces kan worden afgevoerd. De teruggewonnen warmte wordt meestal in het betreffende proces benut, maar dit kan ook een ander procesonderdeel zijn.

Wanneer waterdamp de te comprimeren stof is ligt het temperatuurbereik meestal tussen de 80 en 200 °C. De temperatuur stijging ligt tussen de 5 en 50 °C. In de praktijk ziet men vaak een temperatuur stijging van niet meer dan 30 °C. Om de mechanische dampcompressie rendabel te laten zijn, dient het geleverde vermogen ten minste 2-3 MWth of ongeveer 3-5 t/hr stoom en de C.O.P. 5 of meer te bedragen.

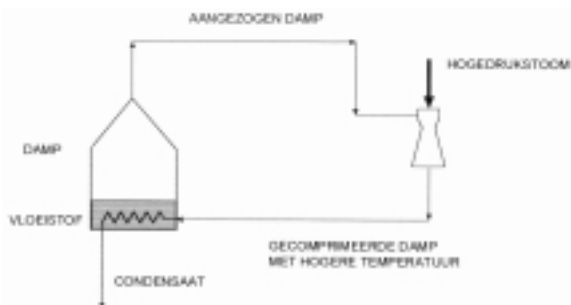


Figuur 3.4 Mechanische dampcompressie in een indampstelsel

3.4 Open warmtepompen met thermische compressie

Bij thermische dampcompressie wordt lagedrukprocesdamp in een ejector met behulp van hogedrukstoom gecompri-meerd. De procesdamp heeft bij het uittreden van de ejector een hogere temperatuur waardoor de warmte beter in het proces benut kan worden.

Daar stoom vrijwel altijd de procesdamp is, ligt de temperatuur bij thermische dampcompressie ongeveer tussen de 60 en 180 °C. De stijging in temperatuur is kleiner dan bij mechanische dampcompressie en ligt bij circa 25 °C. Bij meerstrapscompressie kan een hogere temperatuurstijging worden bereikt.



Figuur 3.5 Thermische dampcompressie, toegepast op een indampstelsel.

4 De warmtepomp in hoofdcomponenten

4.1 Compressoren (zie ook VNCI brochure Compressoren)

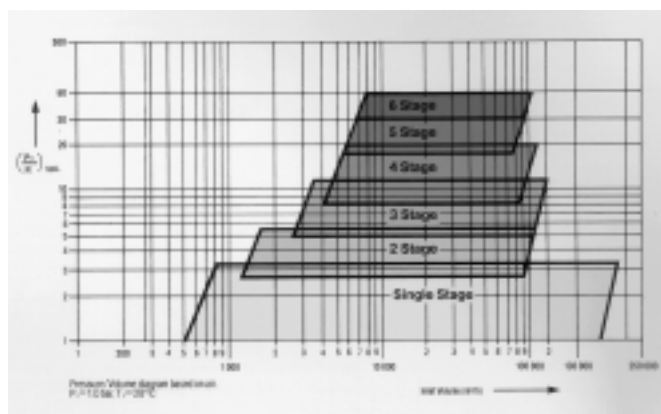
De keuze van het compressortype hangt behalve van de gewenste capaciteit ook af van de gewenste drukverhoudingen en het gewenste regelbereik. In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de verschillende typen compressoren en de bijbehorende kengetallen met betrekking tot beschikbare capaciteiten, bereikbare drukverhoudingen en (isentropisch) rendement. Dit laatste rendement is een maat voor de efficiency van het compressieproces ten opzichte van het ideale (isentropische) compressieproces. Dynamische compressoren worden vooral gebruikt voor grote volumestromen, verdringingscompressoren bij grotere drukverhoudingen.

4.1.1 Keuze compressor: gesloten systemen

Zuigercompressoren worden gebruikt voor kleinere systemen tot circa 500 kW warmtelevering, schroefcompressoren voor middenklasse systemen tot circa 4 MW terwijl centrifugaal-compressoren vooral gebruikt worden in grotere systemen met een warmtelevering boven 2 MW.

4.1.2 Keuze compressor: open systemen

Omdat er bij open systemen sprake is van lagere drukverhoudingen en grote volumestromen worden hier vooral axiaal-compressoren toegepast. Bij zeer geringe drukverhoudingen - zoals bij indampinstallaties zonder kookpuntsverhoging - kunnen ook hogedrukventilatoren toegepast worden. Bij hogere drukverhoudingen én grote volumestromen komen eigenlijk alleen centrifugaalcompressoren in aanmerking. Centrifugaalcompressoren worden veel toegepast in systemen met relatief grote debieten én relatief hoge drukverhoudingen. *Figuur 4.1* geeft aan in hoeveel trappen dit praktisch dient te gebeuren. Zo mogelijk dient men - zowel uit oogpunt van compressorkosten als uit oogpunt van C.O.P.! - met ééntrapssystemen te volstaan.



Figuur 4.1 Inpassingsschema centrifugaalcompressoren

4.2 Condensers

In de condensor wordt de warmte uit het werkmiddel afge-staan aan een ander medium. Afhankelijk van de behoefte in het proces kan dit medium een vloeistof of een gas zijn. Omdat zowel de warmtecapaciteit als de warmteoverdrachts-coëfficiënt van gas en vloeistoffen onderling sterk verschillen, heeft de keuze van het medium grote invloed op de uitvoering van de condensor.

Indeling compressoren

Categorie	Volumestroom [m ³ /h]	Drukverhouding	Isentropisch rendement
Dynamische compressoren:			
-axiaal	50.000 – 500.000	1.2 – 1.8	80%
-centrifugaal	500 – 300.000	1.8 – 3.0	70 – 80%
Verdingscompressoren:			
-schroef	500 – 35.000	2 – 6	60 – 80%
-roots(rolzuiger)	100 – 60.000	1 – 2	40 – 65%
-scroll	10 – 60	1 – 10	40 – 65%
-zuiger	100 – 3.000	4 – 6	50 – 80%

Voor warmteoverdracht naar een vloeistof (bijvoorbeeld water) wordt in het algemeen gebruik gemaakt van de shell and tube warmtewisselaars. Naast de “shell and tube” warmtewisselaar kan (met name bij een klein warmtewisselend oppervlak) ook gebruik gemaakt worden van systeem met coaxiale pijpen (dubbele pijp warmtewisselaar) die eenvoudig in serie te schakelen zijn. Sinds kort worden ook platenwarmtewisselaars in het werkmiddelcircuit toegepast, met als belangrijk voordeel een compacte bouw, en de kleine (werkmiddel)inhoud. Voor warmteoverdracht van condenserend werkmiddel naar water moet er rekening worden

gehouden met een hogere warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de waterzijde. Om deze reden worden er bijvoorbeeld (uitwendig) geribbelde pijpen toegepast.

4.3 Verdampers

Verdampers kunnen worden onderverdeeld in twee belangrijke categorieën: droge expansie systemen (ook wel directe expansie of DX verdamping) en natte verdamping, deze natte verdamping kan worden uitgevoerd als badverdampers (warmte uit vloeistof) of als pompcirculatiesysteem (warmte uit lucht). Bij directe expansieverdampers wordt precies

Verschillende verdampertypen voor gesloten systemen

Verdampertype	Smoorinrichting	Olieterugvoersysteem	Bijzonderheden
<ul style="list-style-type: none"> - DX verdampers - pijpenbundelverdampers - platenwarmtewisselaar - luchtkoeler: <ul style="list-style-type: none"> - laagtoerenventilator - hoogtoerenventilator - passief 	thermostatisch expansieventiel (droge verdamping)	Olie wordt meegenomen door de zuiggassen	<ul style="list-style-type: none"> - kleine werkmiddelinhoud - pijpenbundelverdampers: mediumbron moet schoon zijn - platenwarmtewisselaar: bij mogelijke verontreiniging open type “falling film” toepassen
Badverdampers	HD/LD vlotter (natte verdamping)	<ul style="list-style-type: none"> - venturi in zuigleiding of persgasgedreven ejecteur (werkmiddel oplosbaar in olie) - olieaftapinrichting (werkmiddel niet oplosbaar in olie) - altijd oliescheiders toepassen in de persleiding 	<ul style="list-style-type: none"> - grote werkmiddelinhoud. In het geval van H(C)FK's maandelijks inspectie (> 300 kg) - eenvoudig te reinigen; geschikt voor vervuild water - klein temperatuurverschil tussen medium warmtebron en werkmiddel mogelijk - zuiggaswarmtewisselaar benodigd (werkmiddel oplosbaar in olie) - werkmiddel-uitdamp warmtewisselaar nodig in olieterugvoersysteem (werkmiddel oplosbaar in olie) - grote capaciteit
Pompcirculatiesysteem <ul style="list-style-type: none"> - werkmiddelafscheider in combinatie met één of meer twee-fasen verdampers (zonder thermostatisch expansieventiel) 	HD/LD vlotter (natte verdamping)	<ul style="list-style-type: none"> - venturi in zuigleiding of persgasgedreven ejecteur (werkmiddel oplosbaar in olie) - olieaftapinrichting (werkmiddel niet oplosbaar in olie) - altijd oliescheiders toepassen in de persleiding 	<ul style="list-style-type: none"> - relatief grote werkmiddelinhoud - toe te passen bij grote afstand tussen warmtebron en warmtepomp (directe warmtewisseling) - werkmiddel-uitdamp warmtewisselaar nodig in olieterugvoersysteem (werkmiddel oplosbaar in olie)

zoveel werkmiddel toegevoerd als er gedurende de verblijftijd in de warmtewisselaar verdampt. De regeling vindt plaats op de oververhitting van de uittredende damp. Aan de uittredeszijde wordt deze oververhitting gemeten en direct teruggekoppeld naar een thermostatisch expansieventiel, waarmee de toevoer van werkmiddel wordt geregeld. De DX-verdamper kan worden uitgevoerd als pijpenbundelverdamper, platenwarmtewisselaar of als luchtkoeler (met ventilatoren of passief). Bij natte verdamper is zoveel werkmiddel in de verdamper aanwezig dat het warmtewisselend oppervlak steeds in aanraking is met vloeibaar werkmiddel. Daardoor wordt, ten opzichte van de droge expansiesystemen, een betere warmteoverdracht bereikt. De regeling is echter complexer, omdat de compressor beschermd moet worden tegen vloeistofschade, bijvoorbeeld door middel van afscheiders of oververhitters. Ook voor de terugvoer van olie naar de compressor zijn bijzondere maatregelen noodzakelijk. Er zijn bijvoorbeeld altijd olieafscheiders in de persleiding noodzakelijk. Hierdoor wordt een pompsysteem toch gauw duurder in aanschaf. De regeling van een pompsysteem gebeurt door middel van een vloeistofniveauregeling, bijvoorbeeld in de vorm van een vlotterventiel. De werkmiddelinhoud van natte systemen is relatief groot, in bepaalde gevallen (inhoud > 300 kg en toepassing van H(C)FK's) kan dit tot gevolg hebben dat een maandelijkse inspectie moet plaatsvinden. In voorgaande tabel zijn de belangrijkste eigenschappen van de verschillende typen nog eens samengevat.

5 Technische aandachtspunten m.b.t. warmtepompen

Bij het integreren van processen door middel van warmtewisselaars en warmtepompen moet er rekening worden gehouden met een aantal algemene aspecten die te maken heeft met het onderling verbinden van processtromen.

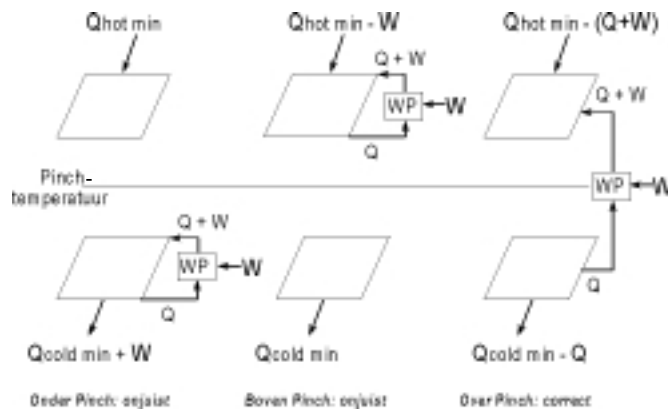
5.1 Kennis van Pinchligging is belangrijk (zie VNCI brochure Pinchtechnologie en Restwarmtebenutting,)

Zoals bekend deelt de Pinchtemperatuur het proces in twee min of meer gescheiden temperatuurgebieden, namelijk:

- een temperatuurgebied onder de Pinch: Hier heerst een **warmteoverschot**;
- een temperatuurgebied boven de Pinch: Hier heerst een **warmtetekort**;

Bij een destillatiekolom is de warmte die vrijkomt bij de top condensor onder Pinch, de warmte die geleverd moet worden om de reboiler te stoken boven de Pinch.

Pinch Technologie geeft aan dat de bron van warmtepompen onder de Pinch dient te staan, terwijl de put boven de Pinch dient te staan. Op deze wijze wordt warmte vanuit een overschotgebied naar een gebied met een warmtetekort gepompt. *Figuur 5.1*, toont aan dat plaatsing onder de Pinch de warmteoverschotten alleen maar verhoogt, terwijl plaatsing boven de Pinch, een relatief dure energievorm, andere, goedkopere energievormen zoals brandstoffen gaat verdringen.



Figuur 5.1 Correcte plaatsing van een warmtepomp: over de Pinch

5.2 De tijdspatronen voor warmtevraag en -aanbod

Ten gevolge van een verschillend tijdspatroon van energieaanbod en -vraag kunnen er belangrijke begrenzings ten aanzien van de integratiemogelijkheden ontstaan. Een batchproces zal bijvoorbeeld bijna nooit direct gekoppeld kunnen worden in een netwerk. Er moet duidelijk sprake zijn van gelijktijdigheid van vraag en aanbod. Soms is het mogelijk om warmte of koude te bufferen, maar deze voorzieningen leiden tot extra kosten en zijn niet voor alle temperatuurniveaus en capaciteiten beschikbaar. Het tijdsafhankelijke belastingspatroon (dat overigens ook bij eigen krachtopwekking -W/K- een grote rol speelt) is van wezenlijke invloed op de mogelijkheden voor benutting van restwarmte. Niet alleen de gelijktijdigheid speelt een rol, maar ook de tijdsduur dat de warmtevraag/-aanbod aanwezig is. De belastingsduur is van wezenlijke invloed op de rentabiliteit van de investering.

5.3 Een onderlinge koppeling beïnvloedt de procesvoering, -controle en -regeling

Het zal voor de bedrijfsvoering lang niet altijd acceptabel zijn dat bepaalde deelprocessen aan elkaar gekoppeld zijn via ingaande en uitgaande energiestromen. Als het ene proces door een bepaald productieschema of een storing tijdelijk uit gebruik is, ontstaat een heel ander energiegebruikspatroon en dit zal direct consequenties hebben voor de gekoppelde processen; dit proces zal zijn warmtebehoefte ergens anders uit moeten putten. Als dit voor een bedrijf tot gevolg heeft dat bij storing van een bepaald onderdeel vervolgens het gehele productieproces stilgelegd moet worden, kan zo'n integratie tot extra kosten leiden. Ook het start-/stopgedrag verdient bij gekoppelde processtromen bijzondere aandacht. Indien dergelijke onderlinge beïnvloeding op voorhand al wordt onderkend, is het met behulp van regeltechnische voorzieningen in het algemeen goed mogelijk eventuele nadelige effecten te minimaliseren.

5.4 Een onderlinge koppeling heeft invloed op veiligheids- en milieuaspecten

Het zal uit veiligheidsoverwegingen niet altijd toelaatbaar zijn om processen onderling te koppelen; een warmtewisselaar tussen stoffen die onderling sterk exotherm reageren kan extra risico's introduceren. In bepaalde gevallen zal er daarom een tussenmedium ingezet moeten worden, waar-

mee extra kosten en rendementsverliezen worden geïntroduceerd. Bij gesloten warmtepompen is er per definitie al sprake van een tussenmedium, waardoor dit soort risico's minder speelt, maar hier moet bij de keuze van het werkmiddel geanticipeerd worden op de te koppelen processtromen. Verwant aan deze veiligheidseisen worden er soms hygiëne-eisen gesteld. Met name in de voedingsmiddelenindustrie kunnen biologisch actieve stoffen voorkomen waarvoor speciale materialen en speciale periodieke reinigingstechnieken moeten worden ingezet. Er worden daardoor ook bijzondere eisen gesteld aan de materiaalkeuze en de reinigbaarheid van warmtewisselaars, en, bij open systemen, aan de compressoren.

5.5 De afstand tussen processen onderling speelt een rol

Ook de onderlinge afstand van de verschillende procesonderdelen ten opzichte van elkaar kan bij koppeling van processtromen extra kosten opleveren. In het geval van grote afstanden tussen de units zijn lange leidingen nodig waardoor extra warmteverliezen en grote drukvallen kunnen optreden. Door deze extra verliezen en de extra kosten voor dit transportnet, zal het kostenvoordeel van de procesintegratie verminderen.

5.6 De combinatie van warmte/kracht en warmtepompen

De techniek van gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit (W/K) heeft als kenmerk dat de bij de elektriciteitsopwekking ontstane warmte nuttig wordt gebruikt. In een situatie van gescheiden opwekking vindt de elektriciteitsproductie bijvoorbeeld plaats in een elektriciteitscentrale en wordt de benodigde warmte lokaal, bijvoorbeeld met behulp van een stoomketel, geproduceerd. W/K-eenheden produceren ongeveer 1,2 (STEG-eenheden) tot twee keer zoveel warmte als elektriciteit (kleine gasturbines/afgassenketel-combinaties). Gasmotor W/K-installaties zitten hier tussenin.

Omdat warmtepompen in veel gevallen warmte produceren

met inzet van aandrijfenergie in de vorm van elektriciteit is er een sterke interactie met eventuele W/K-installaties. In de zin van het CORE-model is toepassing van warmtepompen preferent aan de toepassing van W/K. Er zijn drie situaties denkbaar:

- de vereiste kracht voor het proces is aanzienlijk, maar gering ten opzichte van de warmtebehoefte. Rekening houdend met de thermodynamische condities van het proces kunnen zowel W/K als warmtepompen ingezet worden. De warmte die uit de W/K ingezet wordt, is minder gebonden aan het temperatuurniveau van restwarmte dan die uit de warmtepomp;
- de warmtebehoefte van het proces is in verhouding 1.2 – 2 zo groot als de krachtbehoefte en aanzienlijk. In dit geval is solitaire W/K toepasbaar;
- de vereiste kracht behoefte is gering, terwijl er sprake is van een aanzienlijke warmtebehoefte op een laag temperatuurniveau en/of met een klein temperatuurverschil ten opzichte van een restwarmtebron. In dit geval is een W/K-installatie niet rendabel, een warmtepomp wel.

5.7 Regeltechniek warmtepompen (zie ook VNCI brochure Capaciteitsregeling Roterende Apparatuur)

Er wordt bij de regeling van warmtepompen onderscheid gemaakt tussen interne regeling en externe regeling. De interne regeling heeft als doel om de warmtevraag en/of de koudevraag te realiseren die worden opgelegd. De externe regeling stelt de warmte/koudevraag vast en geeft deze door aan de interne regeling. De belangrijkste regeling voor zowel de open als de gesloten warmtepomp heeft betrekking op de capaciteitsregeling van de compressor. Onderstaande tabel geeft de geschiktheid van de verschillende soorten capaciteitsregelingen in combinatie met de courante compressortypen:

Regeling	geschiktheid warmtepompen	Regelbereik in % van de totale capaciteit (per compressor)	Opmerkingen
Toerenregeling (zuigercompressoren)	++	50 - 100	
Toerenregeling (schroefcompressoren)	+/-	70 - 100	beperkt regelbaar in verband met afdichtingsverliezen bij lage toerentallen en smeringsproblemen
Toerenregeling met beperkte kleplichting (zuigercompressoren)	+	25 - 100	
Beperkte schuifregeling (schroefcompressoren)	+/-	50 - 100	Bij voorkeur niet toepassen
Beperkte inlet/vane regeling (centrifugaal compressor)	+/-	50 - 100	Bij voorkeur niet toepassen
Bypass	-	-	Niet toepassen
Zuigdrukregeling	-	-	Niet toepassen
Kleplichting (zuigercompressoren)	-	50 - 100	Bij voorkeur niet toepassen.

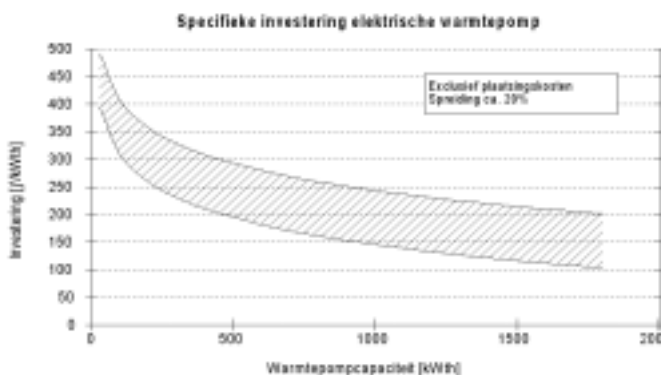
6 Economie van warmtepomptoepassingen

De specifieke investering - bijvoorbeeld in gulden per kW_{th} - van een warmtepomp is afhankelijk van de volgende factoren:

- temperatuurlift;
- corrosie risico's, veroorzaakt door het medium van de warmtebron;
- aanwezigheid van vervuilende componenten;
- continuïteit van de warmtebron (buffer);
- aggregatietoestand van warmtebron en warmteput (gas, damp of vloeistof);
- de capaciteit.

Over het algemeen geldt dat een verlaging van de temperatuurlift de kosten van de warmtepomp verlagen en de C.O.P. verhogen. Dit is de reden waarom succesvolle warmtepompen in de praktijk vaak een beperkte temperatuurlift hebben. Bij hogere temperatuurliften - boven ca 35 °C - wordt de compressieverhouding veelal hoog, hetgeen tot kostbare en vaak ook minder betrouwbare compressoren kan leiden. Zoals reeds is aangegeven is dit vooral het geval bij open warmtepompsystemen.

Vaak bepalen de benodigde temperatuurlift en het temperatuurniveau welk werkmiddel in de warmtepomp het best toepasbaar is. Met de keuze van het werkmiddel ligt de benodigde drukverhouding over de compressor vast en kan de capaciteit van de compressor worden bepaald. De keuze van het werkmiddel en de aard van de warmtebron bepalen de materiaalkeuze waaruit de componenten moeten worden opgebouwd. De condities (gas, vloeistof, snelheden) van de warmtebron en warmteput hebben invloed op de warmteoverdracht in de verdampers en de condensator en bepalen daarmee mede de grootte van deze componenten. Vanwege deze afhankelijkheden wordt bij het vaststellen van de investeringen een spreiding gehanteerd van 20%. Onderstaande figuur geeft de specifieke investering voor een elektrische warmtepomp als functie van de (thermische) warmtepompcapaciteit.



Figuur 6.1 Diagram specifieke investering van gesloten, elektrisch gedreven warmtepompen (temperatuurlift 25 – 35 °C)

Wanneer de proceswarmtevraag uitstijgt boven de capaciteit van de beschikbare warmteleverende utilities, kan een warmtepomp bijzonder aantrekkelijk zijn. Met de installatie van een warmtepomp kunnen mogelijk investeringen in andere utilities worden vermeden, waarmee de meerinvestering van de warmtepomp t.o.v. conventionele oplossingen relatief klein is. Uiteraard is het aantal bedrijfsuren ook van groot belang voor een aantrekkelijke terugverdiendtijd. Wanneer wordt uitgegaan van 6000 bedrijfsuren op jaarbasis zal bij meer of minder bedrijfsuren de terugverdiendtijd evenredig korter of langer worden.

6.1 Berekening terugverdiendtijd mechanische dampcompressie

Uitgangspunten zijn:

- debiet van de damp;
- dampdruk;
- damptemperatuur;
- gewenste temperatuur van damp na condensatie.

Uit de gewenste eindtemperatuur volgt de benodigde druk na de compressor.

Het nuttig vermogen dat door de gecomprimeerde damp geleverd wordt, wordt weergegeven door:

$$Q_{\text{nuttig}} = (h_{\text{gecomprimeerde damp}} - h_{\text{condensaat}}) * V$$

waarin

Q_{nuttig} = vermogen geleverde warmte (kW)

$h_{\text{gecomprimeerde damp}}$ = enthalpie gecomprimeerde damp (kJ/kg)

$h_{\text{condensaat}}$ = enthalpie condensaat (kJ/kg)

V = dampdebiet, te comprimeren massastroom (kg/s)

De hoeveelheid compressiearbeid die aan de afvaldamp moet worden toegevoerd wordt gegeven door:

$$P_{\text{el}} = \frac{(h_{\text{gecomprimeerde damp}} - h_{\text{damp}}) * V}{\eta_{\text{aandrijf}}}$$

waarin

P_{el} = compressievermogen (kW elektrisch)

$h_{\text{gecomprimeerde damp}}$ = enthalpie gecomprimeerde damp (kJ/kg)

h_{damp} = enthalpie aangezogen damp (kJ/kg)

V = dampdebiet, te comprimeren massastroom (kg/s)

η_{aandrijf} = het rendement in de aandrijfketen

Het isentropisch rendement varieert van ongeveer 0,5 tot 0,85, afhankelijk van de capaciteit en kwaliteit van de compressor. De hoeveelheid compressiearbeid is ook uit te drukken als:

$$P_{\text{el}} = \frac{W(\text{isentropische compressie } p_{\text{begin}} \text{ tot } p_{\text{end}}) * V}{\eta_{\text{isentropisch}} * \eta_{\text{aandrijf}}}$$

waarin

W = benodigde arbeid voor isentropische compressie

$\eta_{\text{isentropisch}}$ = isentropisch compressorrendement

η_{aandrijf} = rendement aandrijfketen

V = dampdebiet, te comprimeren massastroom (kg/s)

Met behulp van deze formules en leveranciersgegevens kunnen het opgenomen vermogen en het nuttig vermogen worden berekend. De besparing wordt gegeven door:

$$\text{besparing} = (Q_{\text{verzig}} * F_{\text{warmte}} - P_{\text{el}} * F_{\text{el}}) * \text{bedrijfstijd}$$

(in uren)

Hierbij is F_{warmte} de prijs van warmte in f/kWh. Bij een ketelrendement van 90% en een gasprijs van f0,35 / Nm³ bedraagt deze ongeveer f0,047 / kWh.

7 Toepassing warmtepompen in indampprocessen: Indamping methanol

Voor de scheiding van oleïne en stearine wordt door Uniqema het zogenaamde Emersolproces toegepast. Hierbij wordt een scheiding verkregen als gevolg van het verschil in oplosbaarheid in methanol van onverzadigde en verzadigde vetzuren. Daartoe wordt het vetzuurmengsel bij een temperatuur van circa 30°C gemengd met methanol, waarbij het volledig oplost.

Door deze oplossing vervolgens tot circa 8°C af te koelen wordt een nagenoeg volledige splitsing van beide vetzuren verkregen: de stearine kristalliseert bij deze temperatuur uit, terwijl de oleïne in de methanol opgelost blijft. De gevormde stearinekristallen worden mechanisch van de vloeistof gescheiden met behulp van een roterend filter.

De filterkoek, die 40 tot 60% methanol bevat, wordt in een opvangtank verzameld. Door deze tank te verwarmen wordt het stearine/methanolmengsel weer in vloeibare vorm gebracht. In de oorspronkelijke opzet werd dit mengsel naar een destillatietoren gevoerd waarbij de methanol gescheiden wordt van de oleïne of de stearine. Dit destillatieproces gebruikt zeer veel energie, waarvan 90% in de condensoren werd vernietigd. Door tussenvoeging van een indamptrap met mechanische damprecompressie (in 1984) werd het energiegebruik sterk teruggedrongen.

Zowel in de stearine- als de oleïnestroom bevindt zich een ééntrapsindamper. De methanoldamp uit beide indampers wordt gecompriëerd (in temperatuur en druk verhoogd) en vervolgens teruggeleid naar de indampers, waar het onder afgifte van warmte aan het product - waardoor de methanol uitdampt - aan de andere zijde van de pijpen condenseert. De indampcapaciteit voor methanol bedraagt 8.200 kg/uur. Tevens wordt 800 kg/uur water onttrokken. Het totale thermische vermogen van beide indampers bedraagt 3 MW. Voor de compressie wordt een ééntrapscentrifugaalcompressor gebruikt. De temperatuur aan de zuigzijde bedraagt 73 °C, de zuigdruk 1,05 bar. Aan de perszijde is de temperatuur 86 °C - de oververhitte damp wordt verzadigd - terwijl de druk 1,95 bar bedraagt. Het opgenomen elektrisch vermogen, inclusief hulpenergie, bedraagt 230 kW. De C.O.P. is onder deze omstandigheden circa 13.

7.1 Energiebesparing

De werkelijke C.O.P. bleek wat hoger dan berekend, namelijk 15,5. De besparing op primaire energie bedraagt circa 119 TJ per jaar, dus circa 3,4 miljoen Nm³ aardgas per jaar.

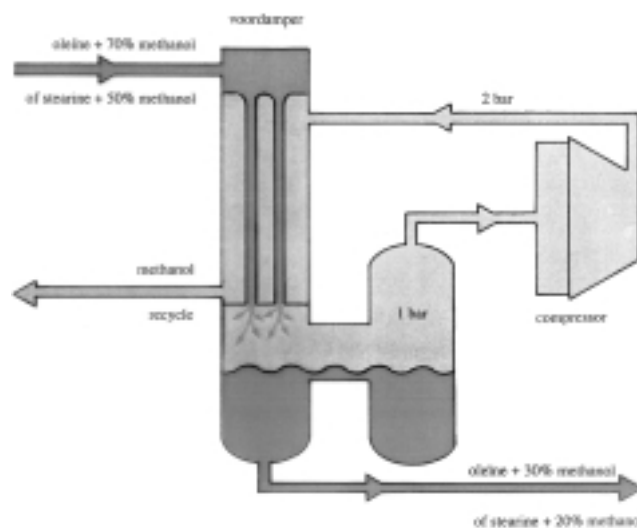
Energiekostenbesparing

De energiekostenbesparing komt hiermee op f 635.000,- per

jaar, rekening houdend met de sterk verminderde aardgaskosten en de enigszins toegenomen elektriciteitskosten. Er is uitgegaan van een aardgasprijs van f 0,30/Nm³ en een elektriciteitsprijs van f 0,10/kWh.

7.3 Milieuvordelen

Deze manier van concentreren leidt bovendien tot vermindering van CO₂-emissies met 6069 ton per jaar. Door het ontbreken van een deel condensorkoeling, die hier met behulp van grondwater uitgevoerd zou worden, wordt er ook bespaard op het gebruik van grondwater, circa 880.000 m³.



Figuur 7.1 Schema methanolindamping

8 Toepassing warmtepompen in destillatieprocessen I: scheiding van propaan en propeen

Bij de conventionele destillatie van propaan en propeen zijn door de geringe relatieve vluchtigheid van de te scheiden componenten een hoge refluxverhouding en/of zeer veel schotels nodig.

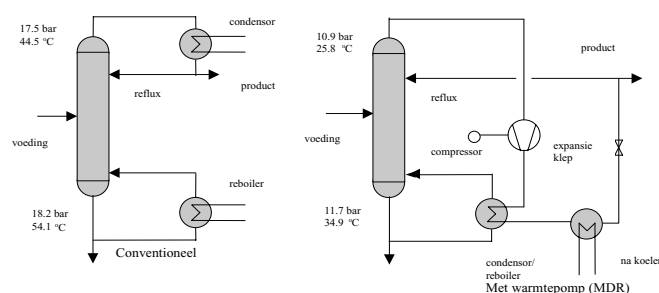
Het toepassen van een warmtepomp leidt hier tot een aanzienlijke energiebesparing. Tevens kan bij gelijkblijvende productkwaliteit het aantal schotels worden gereduceerd en derhalve de investering worden verlaagd.

In het algemeen is in productscheiding door middel van destillatie de toepassing van een warmtepomp aantrekkelijk indien aan de volgende voorwaarden kan worden voldaan:

- wanneer het verschil tussen top- en bodemtemperatuur van de kolom klein is: 50 °C of minder;
- wanneer er een hoge refluxverhouding toegepast moet worden;
- wanneer een kleine drukval over de kolom mogelijk is (speciale pakking);
- wanneer er geen laagwaardige energie (LD stoom of condensaat) als verwarming medium voor de reboiler gebruikt kan worden;
- wanneer koelwater lozingen verminderd of geëlimineerd dienen te worden.

Bij Shell Nederland Chemie wordt propeen uit een mengsel van propaan en propeen gedestilleerd. De kookpunten van propaan en propeen liggen dicht bij elkaar resp. $-42.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $-47.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. De destillatie wordt onder verhoogde topdruk (17.5 bar) uitgevoerd waarbij de toptemperatuur niet ver boven de omgevingstemperatuur ligt. Dit maakt dat grote hoeveelheden (oppervlakte) koelwater nodig zijn voor de condensor. De toepassing van een warmtepomp maakt het mogelijk de topdruk tot 10.9 bar te verlagen. Door de verlaging van de druk wordt de relatieve vluchtigheid tussen propaan en propeen verhoogd hetgeen de scheiding van propaan en propeen makkelijker maakt. De refluxverhouding kan hierdoor worden verlaagd.

De destillatie voor en na het installeren van de warmtepomp is hieronder weergegeven.



Figuur 8.1 Links: Conventionele scheiding P/P. Rechts: met 'opwaarderen' van reflux warmte tot het niveau van de reboiler door middel van Mechanische Damp Recompressie (MDR)

In de huidige situatie wordt de dampstroom die de top van de kolom verlaat door een compressor in druk verhoogt. De gecomprimeerde damp wordt door de reboiler geleid waar de damp condenseert en warmte aan het bodemproduct wordt afgegeven.

De tweetraps centrifugaalcompressor wordt elektrisch aangedreven. De condensor / reboiler is voorzien van UOP-HIFLUX™ pijpen.

8.1 Energiebesparing

De energieverbruiken van de conventionele destillatie en de destillatie met gebruik van warmtepomp zijn in onderstaande tabel weergegeven.

De gegevens zijn gebaseerd op een productie van 230.000 ton/jaar propeen. [MVR/TVR Systems in Chemical Industry, 8]

	Conventioneel	Warmtepomp
Reflux verhouding	13.4	12.3
Stoom verbruik (MW)	50.2	0
Elektriciteit verbruik (MW)	0	6.3
Koelwater verbruik (MW)	49	5

De netto jaarlijkse besparing die wordt bereikt bedraagt 37.8 miljoen m^3 aardgas equivalenten gebaseerd op een bedrijfstijd van 8000 uur per jaar.

8.2 Energiekostenbesparing

De totale investeringskosten voor de warmtepomp met bijbe-

horende warmtewisselaar bedroegen f 15 miljoen. Bij een aardgasprijs van f 0.30/ nm^3 en een elektriciteitsprijs van f 0.10/kWh bedraagt de jaarlijkse besparing ongeveer f 8.6 miljoen. De terugverdientijd is derhalve minder dan twee jaar.

9 Toepassing warmtepompen in destillatieprocessen II: water/ethanol-scheiding

Bij PURAC Biochem te Gorinchem wordt (rechtsdraaiend) melkzuur geproduceerd uit suiker. PURAC Biochem is onderdeel van het CSM concern. Het is de grootste melkzuurproducent ter wereld.

Melkzuur en de derivaten worden toegepast in conservering, cosmetica (shampoo en crèmes) en in de farmaceutische industrie. De afzetmarkt bestaat uit meer dan 140 landen en wordt bediend via een uitgebreid agentennetwerk.

Sinds 1996 is de Pharma-plant in bedrijf die volgens een nieuwe technologie melkzuur produceert van farmaceutische kwaliteit. In deze plant is een veresteringsstap met behulp van ethanol opgenomen.

Scheiding van ester, ethanol en water vindt plaats in een aantal destillaties, waarvan de destillatie van ethanol en water is uitgerust met een warmtepomp in de vorm van Mechanische Damp Recompressie (MDR).

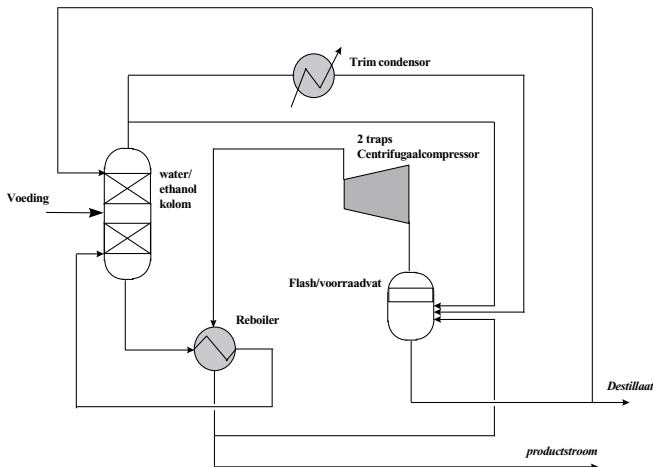
9.1 Inpassing van de warmtepomp in de ethanol/waterscheiding.

Met behulp van een tweetraps centrifugaalcompressor wordt ethanoldamp, die aan de top van de kolom afgevoerd wordt, gecomprimeerd naar een hogere temperatuur en druk. Deze gecomprimeerde ethanoldamp wordt gebruikt als verwarmingsmedium in de reboiler. In een conventionele installatie wordt de topdamp gecondenseerd met lucht of koelwater en wordt de reboiler met stoom verwarmd. Door toepassing van een warmtepomp vervalt dus zowel de koeling als de stoomverwarming. De damp in de kolom heeft een absolute druk van 1,03 bar terwijl de persdruk van de compressor 3,4 bar bedraagt, een drukverhouding van 3,4 derhalve. Het zuigvolume bedraagt ongeveer 2,4 m^3/sec of 8650 m^3/uur . De gemeten perstemperatuur bedraagt 147 $^{\circ}\text{C}$, terwijl de condensatietemperatuur bij 3,4 bar: 105 $^{\circ}\text{C}$ bedraagt. De damp wordt derhalve 42 $^{\circ}\text{C}$ oververhit.

9.2 Energiebesparing

Aan de reboilstroom moet 3180 kW worden toegevoerd om het proces aan de gang te houden. Dit vermogen wordt geleverd door een ethanolstroom van 13.000 kg/uur te condenseren. De ethanolstroom neemt hiermee de 'duty' van een stoomverwarming van 3180 kW over. Om deze stoomverwarming op te wekken is ongeveer 361,7 Nm^3 aardgas per uur nodig.

Aan de elektromotor die de compressor aandrijft wordt 525 kW toegevoerd. Om deze elektriciteit op te wekken in een STEG-installatie is 108,6 Nm^3 aardgas nodig. Per saldo wordt dus twee miljoen Nm^3 aardgas bespaard en de CO_2 -emissie met 3580 ton verminderd.



Figuur 9.1 Ethanol/waterscheiding m.b.v. MDR bij PURAC

9.3 Energiekostenbesparing

Het aantal bedrijfsuren van de ethanol/waterscheidingkolom bedraagt 8600 uur per jaar. De conventionele kolom gebruikt ongeveer 5,2 ton stoom per uur. De energiekosten per ton stoom bedragen voor PURAC f 25,-. De jaarlijkse stoomkosten bedroegen derhalve f 1.120.000,-.

De elektriciteitskosten van de warmtepomp bedragen f 465.000,-. De jaarlijkse besparingen bedragen dus f 655.000,-. Een terugverdientijd is niet te berekenen omdat de omvang van de investering niet bekend is. Er is uitgegaan van een aardgasprijs van f 0,30/Nm³ en een elektriciteitsprijs van f 0,10/kWh.

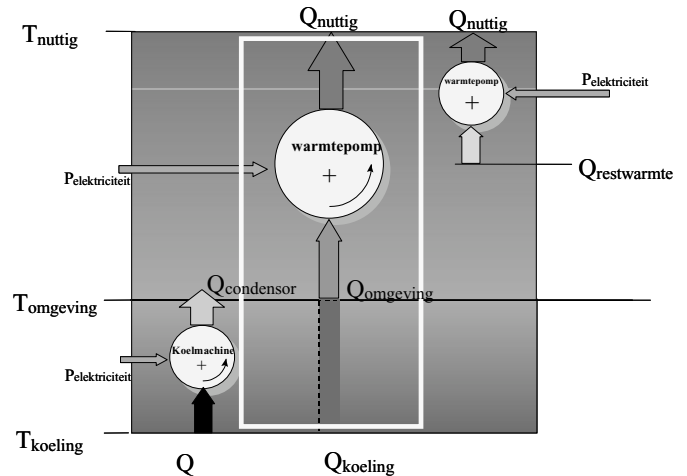
10 Gecombineerde koude/warmte-opwekking met warmtepompen

Aan de bronzijde van de warmtepomp vindt warmte-onttrekking plaats. Wanneer deze onttrekking onder de omgevingstemperatuur plaatsvindt, dan is er sprake van koude-opwekking. Over het algemeen is koude per MJ - zeker bij temperaturen v er onder omgevingstemperatuur - veel kostbaarder dan warmte per MJ uit fossiele bron. Dit wordt vooral veroorzaakt door het feit dat koelmachines per kW koude ten minste 4 - 8 keer zo duur zijn als stoom- en heetwaterketels.

Het is om deze reden niet verwonderlijk dat gesloten warmtepompen vaak daar worden toegepast waar primair koude wordt gevraagd. Koude wordt met name in de voedingsmiddelenindustrie toegepast. Door bijvoorbeeld warmte die aan slachtvarkens wordt onttrokken bij lage temperatuur op te pompen tot boven de omgevingstemperatuur en deze warmte te gebruiken als slachtwater op circa 40 - 50  C wordt de opwekking van nuttige koude en nuttige warmte in  en apparaat gecombineerd. Figuur 10.1 geeft een beeld van de koelmachine als warmtepomp.

11 Lage-temperatuurwarmte voor binnenklimaat en tankopslag

Het grootste deel van de energiebehoefte van Nederland bestaat uit laagtemperatuurige warmte voor de klimatisering



Figuur 10.1 Gecombineerde opwekking van warmte en koude met warmtepompen

van woningen, gebouwen en tuinbouwkassen. In de chemische industrie is er bovendien een behoorlijke behoefte aan laagwaardige warmte voor verwarmde tankopslag. Hoewel deze warmte in principe meestal voorzien kan worden uit 'eigen' restwarmte is in een aantal gevallen een aparte warmtevoorziening gewenst.

Warmtepompen kunnen uitstekend dienst doen om centrale verwarmingswarmte voor woningen en gebouwen te genereren. Doordat een warmtepomp ook als koelmachine dienst doet kan met  en apparaat zowel aan de wens tot koeling in de zomer (airconditioning) als aan de eisen met betrekking tot de verwarming voldaan worden.

In deze gevallen worden warmtepompen ingezet om warmte te genereren vanuit omgevingswarmte (bodem, grondwater, lucht of oppervlaktewater). Er is derhalve sprake van duurzaam opgewekte energie, waarvoor verschillende (fiscale) faciliteiten kunnen worden verkregen.



Figuur 11.1 Warmtepompen voor klimatisering (koelen/verwarmen) van gebouwen

12 Referenties

- [1] Ir. H. Boot en anderen, Handboek Industriële warmtepompen, Kluwer bedrijfsinformatie, ISBN 9055761397
- [2] Lie, A.B.K, Kerkhof, F.P.J.M., "Exergy analysis, Calculating exergies in Aspen Plus", proc. Aspenworld 94, Boston, USA, 1994
- [3] Kerkhof et al. "exergy analysis with a flowsheeting simulator: theory and applications", Chemical Engineering Science, Vol.51 No. 20, p 4693-4715, 1996
- [4] IEA Heat Pump Centre, "Industrial Heat Pumps; experiences, potential and global environmental benefits" report HPP-AN21-1, 1995
- [5] Kayihan, F., "Optimum distribution of heat load in distillation columns using intermediate condensers and reboilers, Recent advances in Separation Techniques II, AIChE 192, vol 76, 1980.
- [6] Meili, A. and Stuecheli, A., 1987, "Distillation Columns with Direct vapor Recompression", Chem. Eng., 94 (2) p. 133-143
- [7] "Toepassing van warmtepompen in de Nederlandse Industrie, beschrijving van de toepassing van succesvolle industriële warmtepompen", Novem brochure DV 3.4.30.95.10.
- [8] Industrial Heat Pumps, "MVR/TVR systems in chemical industry", NOVEM brochure DV 3.4.39 96.11
- [9] "Marktwijzer Warmtepompen", Novem brochure DV3-4-0051
- [10] Distillation and Heat Pump Technology, Sulzer Chemtech brochure 22.47.06.40-V.91-100.
- [11] Wit, J.B. de , "The application of industrial heat pumps in The Netherlands", TNO rapport 94-376, januari 1995.
- [12] ODESSY, User Manual, 2001
- [13] Brochure Pinchtechnologie en Restwarmtebenutting VNCI