

# Hybride Adsorptie Compressie voor Industriële Toepassingen

HYACINT - openbare eindrapportage

M. van der Pal

Juni 2013

ECN-E--13-016



## Verantwoording

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, regeling EOS: Lange Termijn uitgevoerd door Agentschap NL en is bekend onder projectnummer EOSLT 08026.

Vanuit ECN hebben de groep Thermal Systems van de unit BEE, de groep Policy Evaluation and Support van de Unit Beleidsstudies en de groepen Engineering en Realisation van de unit EEE bijgedragen aan de uitvoering van het project. GEA Grencó heeft ondersteuning verleend bij opzetten en interpreteren van de compressor metingen. KWA Bedrijfsadviseurs en KCPK hebben een grote bijdrage geleverd aan het onderdeel Toepassing en evaluatie. Tenslotte hebben Bronswerk Heat Transfer en Technisch Bureau Dahlman bijgedragen aan de techno-economische evaluatie.

## Projectgegevens

Projectnummer: EOSLT 08026

Projecttitel: Hybride Adsorptie Compressie voor Industriële Toepassingen (HYACINT)

Penvoerder: ECN

Medeaanvragers: Bronswerk Heat Transfer BV.  
Technisch Bureau Dahlman B.V.  
KWA Bedrijfsadviseurs  
Kennis Centrum Papier en Karton  
GEA Grencó B.V.

Projectperiode: 1 juli 2009 tot 31 december 2012.

“Hoewel de informatie in dit rapport afkomstig is van betrouwbare bronnen en de nodige zorgvuldigheid is betracht bij de totstandkoming daarvan kan ECN geen aansprakelijkheid aanvaarden jegens de gebruiker voor fouten, onnauwkeurigheden en/of omissies, ongeacht de oorzaak daarvan, en voor schade als gevolg daarvan. Gebruik van de informatie in het rapport en beslissingen van de gebruiker gebaseerd daarop zijn voor rekening en risico van de gebruiker. In geen enkel geval zijn ECN, zijn bestuurders, directeuren en/of medewerkers aansprakelijk ten aanzien van indirecte, immateriële of gevolgschade met inbegrip van gederfde winst of inkomsten en verlies van contracten of orders.”



# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Energiehuishouding Nederlandse Industrie	7
<b>2</b>	<b>Systeemverkenning</b>	<b>9</b>
2.1	Doelstellingen	9
2.2	Werkwijze	9
2.3	Resultaten	10
2.4	Conclusies	10
<b>3</b>	<b>Component en systeem: ontwikkeling en karakterisering</b>	<b>11</b>
3.1	Doelstellingen	11
3.2	Werkwijze	11
3.3	Resultaten	12
3.4	Conclusies	16
<b>4</b>	<b>Economische en maatschappelijke aspecten</b>	<b>17</b>
4.1	Doelstelling	17
4.2	Werkwijze	17
4.3	Resultaten	18
4.4	Conclusies	18
<b>5</b>	<b>Aanvullende informatie</b>	<b>19</b>

# Samenvatting

Industriële restwarmte is warmte waarvan de temperatuur te laag is om deze opnieuw in het proces in te zetten. Met warmtepomp technologie kan een deel van de industriële restwarmte in temperatuur worden verhoogd tot proceswarmte. Dit vermindert de inzet van primaire energiedragers hetgeen resulteert in netto energiebesparing.

Warmtegedreven warmtetransformatoren kunnen warmte vanaf ongeveer 100 a 120°C opwaarderen tot warmte van 180 tot 200°C. Het merendeel van de restwarmte bevindt zich echter onder 100°C. De hybride adsorptie compressie technologie biedt de mogelijkheid om ook deze warmte met tenminste 50°C te kunnen verhogen. Het hybride concept combineert een warmtegedreven warmtetransformator met een arbeid aangedreven compressie warmtepomp.

Binnen het HYACINT project is onderzocht welke componenten van beide warmtepomp technologieën het meest geschikt zijn voor toepassing in een hybride warmtetransformator. Dit is gedaan door middel van literatuurstudie, sociaalwetenschappelijk onderzoek, toepassingspotentieelonderzoek, modelberekeningen en metingen aan componenten.

Uit de literatuurstudie en modelberekeningen blijkt dat de combinatie van  $\text{CaCl}_2(2-4-8)\text{NH}_3$  met  $\text{MnCl}_2(2-6)\text{NH}_3$  met een compressor geplaatst in de hoge drukfase van de cyclus het meest optimaal is. Metingen tonen aan dat de druk-temperatuur relatie voor deze twee zouten overeenkomstig is met data uit de literatuur. Daarnaast tonen metingen in combinatie met modelberekeningen aan dat de prestaties van de compressor onder de dynamische condities van de hybride adsorptie compressie cyclus goed te beschrijven zijn op basis van het compressor gedrag onder statische condities en fabrieksgegevens. Metingen aan zoutreactorcomponenten tonen aan dat de zouten zich gedragen conform verwachtingen maar dat een toename van reactiesnelheid en belading gewenst is. De economische analyse laat op basis van een kostenschattning van een 10 MW systeem zien dat het hybride systeem ook economisch haalbaar is. Het toepassingspotentieel wordt geschat op 30 tot 56 PJ per jaar voor de Nederlandse industrie. Derhalve wordt geadviseerd de technologie verder te ontwikkelen om te komen tot significante reductie in het energiegebruik van de Nederlandse industrie.

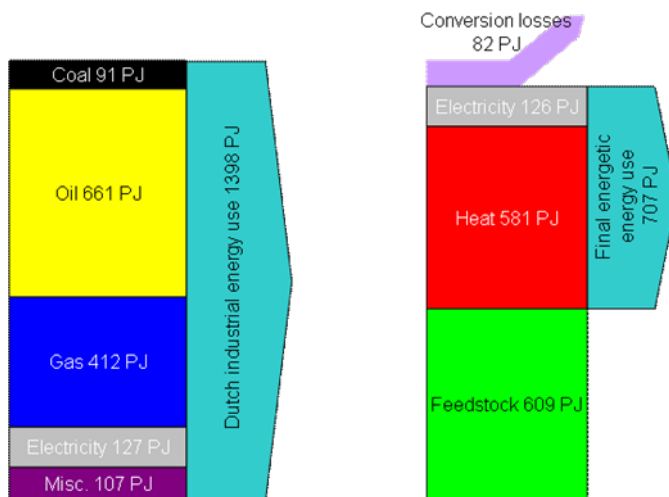
# 1

## Inleiding

### 1.1 Energiehuishouding Nederlandse Industrie

In heel Nederland en met name in de industrie bestaat het grootste deel van de energiebehoefte uit de behoefte aan warmte. Van het totale eindgebruik aan energie in de industrie komt meer dan 80% voort uit warmtebehoefte in de vorm van stoom op verschillende drukniveaus of voor ondervuring van fornuizen. Cijfers van het CBS voor het jaar 2005 leveren het volgende Sankey diagram op voor het energiegebruik in de industrie.

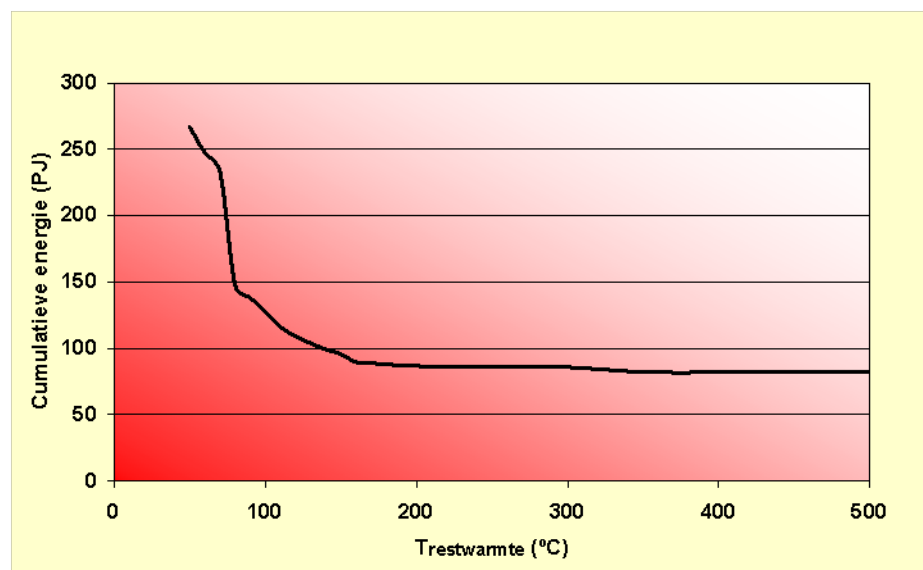
**Figuur 1:** Industrieel energiegebruik in Nederland, bron CBS 2005



Alle toegevoerde energie komt uiteindelijk vrij als restwarmte. Een deel van deze warmte bevindt zich in stromen waaruit de restwarmte is terug te winnen, denk hierbij aan condensoren, de afblaasluft van droogprocessen, water- of luchtkoelers, etc. Uit een studie die samen met Jacobs is uitgevoerd blijkt dat binnen de Chemie en Raffinage

jaarlijks meer dan 100 PJ aan restwarmte tussen de 50°C en 200°C actief wordt gekoeld. Tellen we daar geschatte schoorsteenverliezen bij op, dan resulteert Figuur 2.

**Figuur 2:** Geïdentificeerde industriële restwarmte in chemie en raffinage sector in Nederland



Met warmtepomptechnologie kan warmte van lage temperatuur in temperatuur worden verhoogd tot proces temperatuur. Door de restwarmte in temperatuur te verhogen tot proces warmte wordt de fossiele energie verdrongen die ander nodig was geweest om de proces warmte op te wekken. Warmtepompen die tegenwoordig commercieel beschikbaar zijn hebben doorgaans een beperkte temperatuurlift (20°C tot 50°C) en werken op een relatief lage bedrijfstemperatuur (< 100°C). Voor de industriële toepassing zijn warmtepompen nodig die bij hogere temperatuur werken (tot boven 200°C) en/of een grote temperatuurlift (50°C tot 80°C) hebben.

Binnen ECN wordt gewerkt aan warmte-gedreven warmtetransformatoren op basis van chemie-sorptie processen. Hiermee kan bovenstaande temperatuurlift wordt gerealiseerd. Voorwaarde is echter dat restwarmte temperatuur tenminste 100°C bedraagt. Dit betekent dat het restwarmte potentieel tussen 50°C en 100°C onbenut blijft. In het HYACINT project wordt gekeken naar de mogelijkheden om de chemie-sorptie warmtepomp te combineren met een traditionele compressor. Hierdoor kan de warmtepomp worden toegepast voor lagere restwarmte temperaturen en/of voor hogere temperatuurliften. Voor een beschrijving van de thermochemische en hybride warmtetransformator wordt verwezen naar Bijlage A.

Doel van dit onderzoek is het bepalen van de technische en economische haalbaarheid van het hybride adsorptie compressie concept voor industriële toepassingen. Hiertoe worden literatuurstudies, modelberekeningen en metingen op labschaal uitgevoerd.

Het HYACINT project wordt uitgevoerd door zes partners: ECN, Bronswerk Heat Transfer BV, Technisch Bureau Dahlman BV, KWA Bedrijfsadviseurs, Kennis Centrum Papier en Karton en GEA Grenco.

# 2

## Systeemverkenning

### 2.1 Doelstellingen

De eerste stap in de ontwikkeling van een hybride adsorptie compressie warmtetransformator is te bepalen welke onderdelen het meest geschikt zijn voor toepassing en op welke wijze zij dienen te worden toegepast. In de systeemverkenning zijn derhalve de volgende aspecten onderzocht:

- Welke systeemconfiguratie is het meest geschikt?
- Welke sorbentia zijn het meest geschikt vanuit energetisch, technologisch als economisch perspectief?
- Welke (type) compressor is geschikt voor toepassing in de hybride warmtetransformator?

### 2.2 Werkwijze

De bepaling van de meest optimale systeemconfiguratie is een functie van temperatuurniveaus, sorbentia eigenschappen en compressorprestaties. Een model is ontwikkeld waarin de prestaties van een drietal systeemconfiguraties zijn berekend voor een selectie van vijftig sorbentia. De modelresultaten zijn vervolgens gefilterd op basis van een aantal sleutelparameters zoals energie efficiency, vermogensdichtheid, drukbereik en drukratio. Vervolgens is op basis van de gevonden drukken en drukratios gekeken naar mogelijke compressortypen hiervoor.

## 2.3 Resultaten

De modelresultaten laten zien dat een hybride warmte transformator op basis van  $\text{CaCl}_2$  en  $\text{MnCl}_2$  als sorbentia in combinatie met ammoniak als sorbaat het meest geschikt is. Hierbij is de compressor bij voorkeur geplaatst tussen twee zoutreactoren tijdens de (hoge druk) warmteleveringsfase. Naast de geschiktheid op basis van de modelberekeningen hebben deze sorbentia nog een aantal bijkomende voordelen:

- Het zijn chlorides die bekend staan om goede kinetische eigenschappen
- Het calciumchloride heeft naast de  $\text{CaCl}_2(2-4)\text{NH}_3$  overgang, een tweede overgang, de  $\text{CaCl}_2(4-8)\text{NH}_3$  overgang. Dit biedt de mogelijkheid de warmtepomp over een breder temperatuurgebied in te zetten.

Als type compressor zijn zowel dynamische als verdringercompressoren geschikt. Een centrifugaalcompressor heeft de voorkeur vanwege hoge efficiencies en de optie om olievrij te opereren. Schroef- en zuigercompressoren dienen te worden aangepast voor gebruik maar laten een hogere drukverhouding toe waardoor een groter temperatuurbereik kan worden bediend.

## 2.4 Conclusies

Uit de resultaten blijkt dat er op basis van literatuurgegevens sorbentia, zijnde calcium chloride en mangaanchloride, en compressoren beschikbaar zijn voor succesvolle toepassing in een hybride adsorptie compressie warmtetransformator. Gegeven de drukverhoudingen, de volumedebieten en het olie-vrije bedrijf is een centrifugaal compressor het meest geschikt voor full-scale applicatie.



# 3

## Component en systeem: ontwikkeling en karakterisering

### 3.1 Doelstellingen

Voor de modelberekening van hoofdstuk 2 is gebruik gemaakt van literatuurgegevens over ammoniak-zout reacties. Eerdere ervaringen hebben laten zien dat deze data niet altijd correct of volledig zijn. Voor compressoren komt daar bij dat de gegevens van de fabrikant worden gegeven voor steady-state toestanden en niet voor dynamisch gedrag zoals dat plaatsvindt in de hybride adsorptie compressie cyclus. Derhalve is in dit projectonderdeel gekeken naar:

- Verificatie van de door de fabrikant opgegeven compressor prestaties onder steady-state condities
- Het compressor gedrag onder dynamische condities ten opzichte van steady-state condities
- Verificatie van de in de literatuur opgegeven druk-temperatuur correlaties voor ammoniak-zout reacties van  $\text{CaCl}_2$  en  $\text{MnCl}_2$
- Het gedrag van de sorbentia in een reactor onder hybride warmtetransformator condities

### 3.2 Werkwijze

Voor het bepalen van de compressorprestaties onder steady-state alsmede dynamische condities is een compressor testplatform ontwikkeld. Dit platform bestaat uit diverse sensoren zoals massastroom meters, temperatuur- en druksensoren waarmee de massa- en warmtestromen kunnen worden gemeten onder typische compressor

condities die optreden tijdens de cyclus van de hybride adsorptie compressie warmtetransformator en onder de door de fabrikant opgegeven werkcondities. Voor het bepalen van de in te stellen dynamische condities in een hybride adsorptie compressie cyclus is gebruik gemaakt van een model waarin de interactie tussen compressor en reactor is meegenomen.

Voor de verificatie van de druk-temperatuur relaties voor de twee sorbentia is gebruik gemaakt van een hoge druk DSC. In dit apparaat wordt de opname/afgifte van warmte ten gevolge van een temperatuur en/of drukverandering gemeten. Hieruit kan worden afgeleid bij welke temperatuur adsorptie en desorptie van ammoniak plaatsvindt. Dit wordt vergeleken met literatuurbedata.

Voor het bepalen van de kinetische prestaties van de sorbentia in een reactor onder hybride warmtetransformator condities is gebruik gemaakt van een opstelling waarin de sorbentia in een reactorelement kunnen worden blootgesteld aan typische hybride warmtetransformator condities (druk en temperatuur). In de opstelling wordt in de vorm van massa- en warmtestromen, de respons gemeten van het reactorelement op de opgelegde condities.

### 3.3 Resultaten

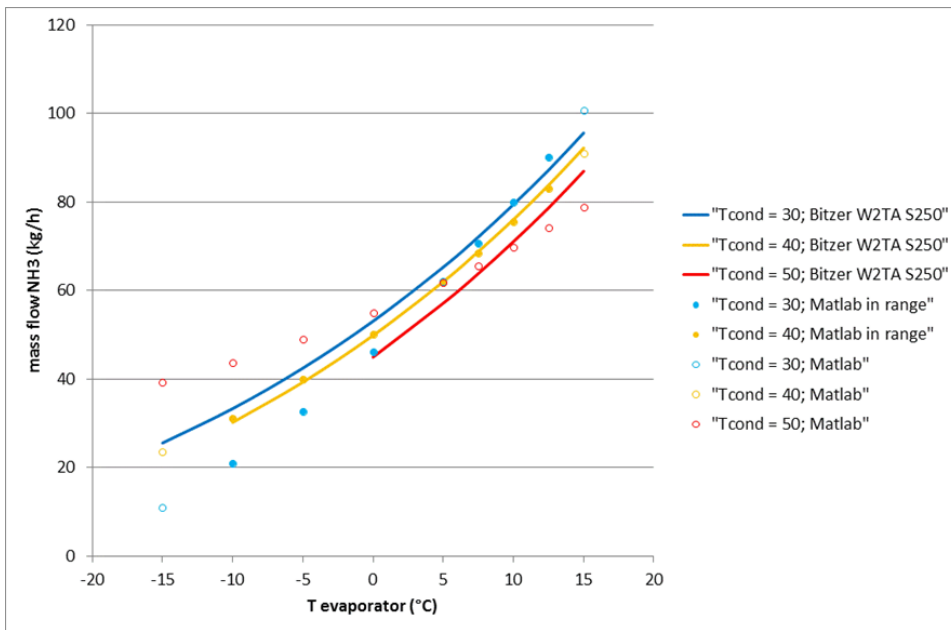
Figuur 3 toont het compressor test platform dat is ontwikkeld en gebruikt voor de bepaling van het compressor gedrag onder steady-state en dynamische condities.

**Figuur 3:** Foto van het compressor testplatform



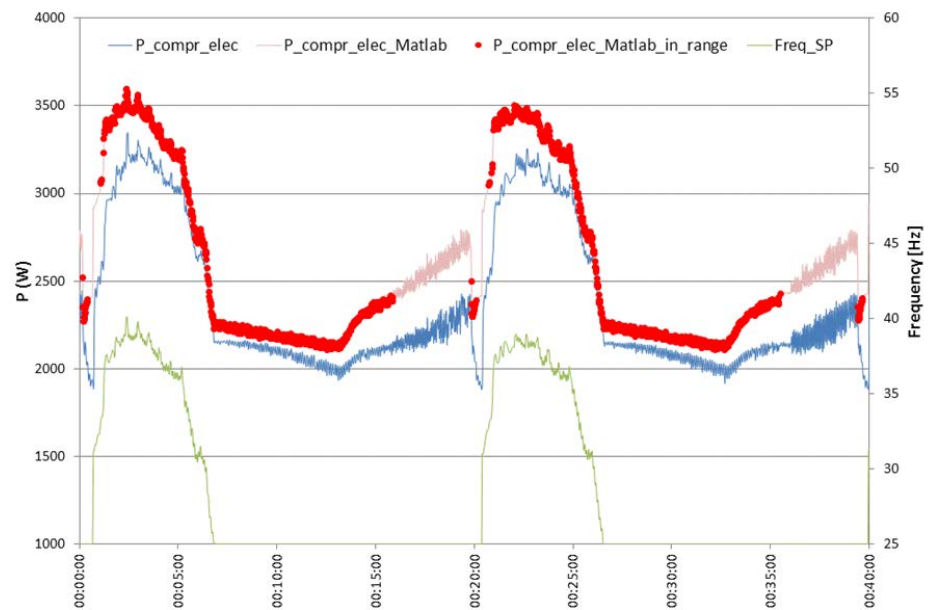
Figuur 4 toont de resultaten van de steady-state metingen met het compressor test platform. Op de horizontale as staat de verdamper temperatuur weergegeven waarbij wordt verondersteld dat de bijbehorende druk overeenkomt met de evenwichtsdampspanning van ammoniak voor gegeven temperatuur. Op de verticale as staat de ammoniak massa-stroom weergegeven. De lijnen tonen de gegevens van de fabrikant en de punten de waarden berekend op basis van een serie metingen. Hoewel er verschillen te zien zijn tussen gemeten waarden en die van de fabrikant zijn deze beperkt, met name in het gebied waarin de compressor naar verwachting zal opereren in een hybride systeem, namelijk bij verdampertemperaturen boven de 0°C.

**Figuur 4:** Resultaten statische metingen met het compressor test platform: vergelijking tussen waarden opgegeven door de fabrikant en gemeten waarden



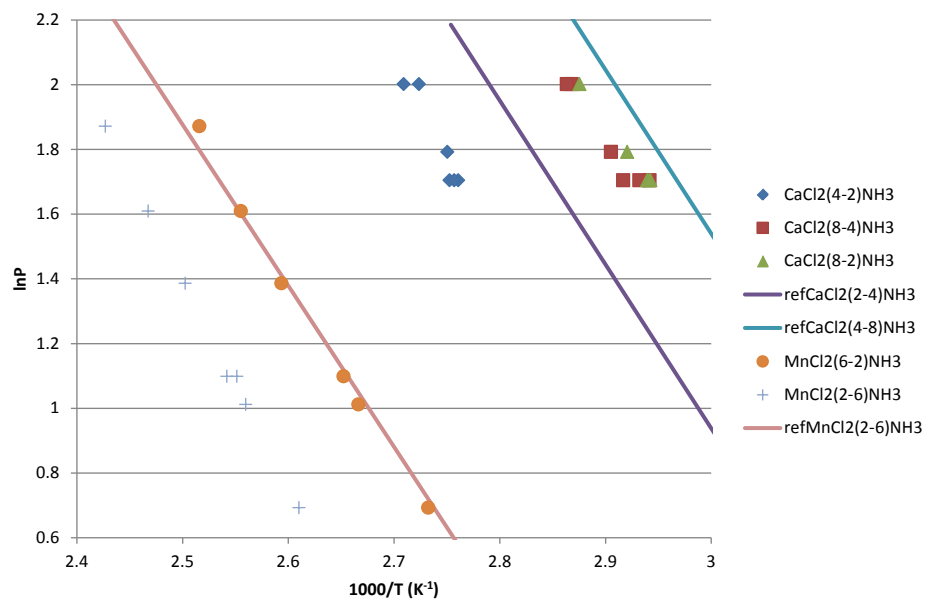
Figuur 5 toont één van de meetresultaten aan de compressor onder dynamische condities: het gemeten (blauwe lijn) en op basis van statische metingen berekende (rode lijn) opgenomen vermogen van de compressor als functie van de tijd. De berekende waarde is opgesplitst in geïnterpoleerde (donkerrood) en geëxtrapoleerde (lichtrood) waarden.. Hieruit blijkt dat de verschillen tussen de modelberekeningen en gemeten waarden beperkt zijn (<10%). Dit houdt in dat op basis van gegevens van de fabrikant en/of meetgegevens en een daarop gebaseerd empirisch model, een bruikbare inschatting van de compressorprestaties gemaakt kan worden en daarmee – mits er een goede reactorprestatie beschrijving aanwezig is – een goede eerste inschatting van de prestaties van het hybride warmtetransformator systeem.

**Figuur 5:** Resultaten dynamische meting met het compressor test platform: het gemeten ( $P_{\text{compr\_elec}}$ ) en berekende ( $P_{\text{compr\_elec\_Matlab}}$ ) elektriciteitsverbruik van de compressor als functie van de tijd



De reactorprestaties zijn gemeten in de hoge druk DSC en met reactorelement opstelling. In de hoge druk DSC wordt de warmte-opname/afgifte van de sorbentia gemeten als functie van temperatuur en druk. Uit deze gegevens kunnen de evenwichtslijnen worden afgeleid die horen bij de adsorptie en desorptie reacties van beide zouten. Deze staan weergegeven in Figuur 6. Hieruit blijkt dat er een beperkte afwijking ( $<10^{\circ}\text{C}$ ) tussen de gemeten data en literatuurgegevens. Dit heeft geen consequenties voor de geschiktheid van de geselecteerde sorbentia.

**Figuur 6:** Druk - temperatuur correlatie voor  $\text{MnCl}_2(2-6)\text{NH}_3$  (links) en  $\text{CaCl}_2(2-4/4-8)\text{NH}_3$  (rechts) op basis van metingen op de hoge druk DSC. De lijnen geven de literatuurwaarden weer en de punten de gemeten waarden.

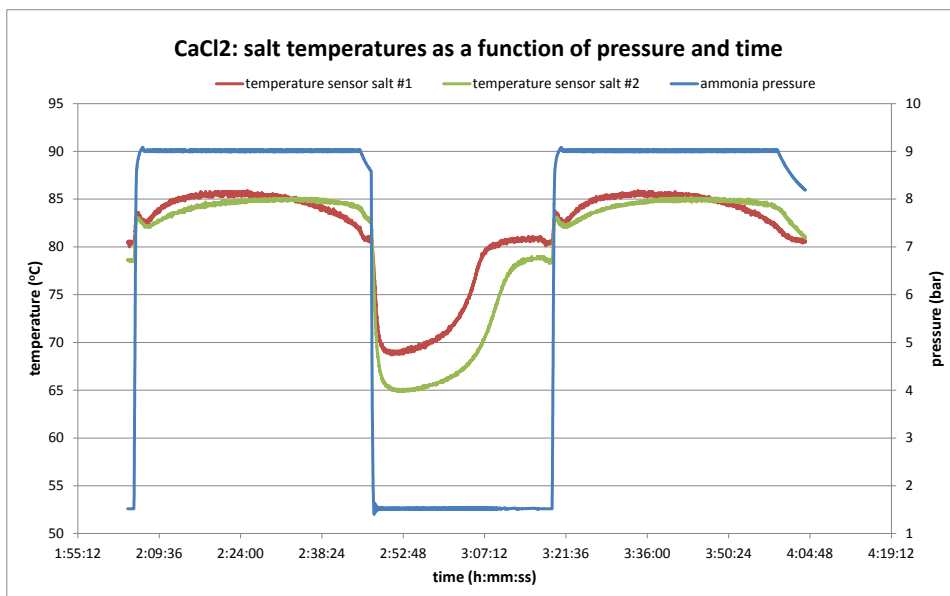


Figuur 7 toont een reactorelement dat is gebruikt voor het testen van de zouten  $\text{CaCl}_2$  en  $\text{MnCl}_2$  in de reactor. Figuur 8 toont de temperatuur (linker y-as) van calciumchloride op twee plaatsen (rode en groene lijn) in een reactorelement onder invloed van de druk (blauwe lijn, rechter y-as) als functie van de tijd. Hieruit blijkt dat – overeenkomstig de verwachtingen – de temperatuur van het zout hoger wordt wanneer de druk wordt verhoogd tot boven de adsorptiedruk (en er adsorptie en daarmee warmteproductie plaatsvindt) en verlaagd wanneer de druk wordt verlaagd tot onder de desorptiedruk (en er desorptie optreedt wat warmte onttrekt aan de het zout). De tijd benodigd voor het beladen en ontladen van het reactorelement (ongeveer 75 minuten) is vrij lang voor toepassing in een hybride adsorptie compressie cyclus. Ook bleek de hoeveelheid zout in het reactorelement onvoldoende te zijn. Hogere zoutbelading is haalbaar gebleken en modelberekeningen tonen aan dat warmte- en massatransport voldoende snel kunnen verlopen in dit reactorconcept maar dit is nog niet experimenteel vastgesteld.

**Figuur 7:** Foto van een reactorelement, stalen buis, aluminium vin en schuim



**Figuur 8:** Voorbeeld van meting aan de reactor component gevuld met calcium chloride: zouttemperatuur en de ammoniakdruk als functie van de tijd.



## 3.4 Conclusies

De metingen en modelberekeningen aan het compressor gedrag tonen aan dat op basis van fabrikant gegevens voor compressor prestaties voor steady-state condities een goede schatting gemaakt kan worden van het compressor gedrag onder dynamische condities.

Metingen aan de evenwichtsrelaties van de ammoniak-zout reacties tonen goede overeenkomsten met literatuurgegevens en bieden daarmee een basis voor toepassing in een hybride adsorptie compressie cyclus.

De metingen aan reactorelementen blijven achter bij verwachte waarden ten aanzien van zoutbelading en cyclustijd. Er zijn geen (theoretische) belemmeringen van het significant verbeteren van deze twee parameters maar hiervoor dient verder onderzoek te worden uitgevoerd.

# 4

## Economische en maatschappelijke aspecten

### 4.1 Doelstelling

Naast het overkomen van de technologische barrières is het ook van belang dat er een markt is voor de hybride adsorptie compressie warmte transformator en dat eventuele niet-technologise barrières worden weggenomen. Hiertoe zijn de volgende aspecten onderzocht:

- De omvang van het toepassingspotentieel in Nederland en bij welke sectoren
- De verwachte kosten van de hybride adsorptie compressie warmtetransformator, zowel voor de constructie en installatie als tijdens gebruik
- De factoren die bijdragen aan succesvolle vervolgstappen in de ontwikkeling van de technologie

### 4.2 Werkwijze

Voor het bepalen van het toepassingspotentieel is er een toepassingspotentieelstudie uitgevoerd. Hiertoe werden een aantal doorsneden gemaakt van de Nederlandse industrie: op basis van de restwarmtecurve voor de procesindustrie in Nederland, het energieverbruik per sector alsmede op basis van de gegevens in een destillatiekolommedatabase waarin de in Nederland voorkomende destillatiekolommen inclusief warmtestromen en temperaturen is opgenomen. Hieruit is een schatting van de beschikbare restwarmte af te leiden alsmede de temperatuur waartoe deze verhoogd dient te worden om nuttig in het proces te worden ingezet. Voor de kostenschatting is een techno-economische evaluatie uitgevoerd. Hiertoe is een kostenschatting gemaakt voor een 10 MW systeem en de daaraan gekoppelde kosten voor installatie en bedrijfsvoering. Met behulp van deze kostenschatting wordt een terugverdientijd berekend.

De succesfactoren zijn onderzocht in een sociaalwetenschappelijk onderzoek. Hiertoe werd een succesvol vervolproject geanalyseerd door middel van interviews met de betrokkenen en een literatuurstudie.

## 4.3 Resultaten

In de toepassingpotentieelstudie is gekeken naar diverse sectoren, waaronder de papier industrie, de voedingsmiddelen en de chemische industrie. Belangrijkste resultaten zijn dat het totale besparingspotentieel voor Nederland ligt tussen de 30 PJ tot 56 PJ per jaar met als belangrijkste sectoren Chemie en Raffinage, Papier en Karton, en Voedingsmiddelen. Dit potentieel kan nog worden vergroot wanneer de technologie commercieel beschikbaar komt en processen worden geoptimaliseerd voor toepassing in combinatie met deze technologie.

Uit de techno-economische evaluatie is gebleken dat de kosten en daarmee de terugverdientijd van het systeem sterk afhankelijk is van de aanwezigheid van een secundair circuit voor de toe en afvoer warmte en de methode voor de bepaling van de materiaalkosten. Terugverdientijden van minder dan zeven jaar lijken haalbaar, alleen in de worst-case bedraagt de terugverdientijd meer dan 10 jaar. Wel verdient het de aanbeveling om – indien mogelijk – het secundair circuit weg te laten.

De sociaal wetenschappelijke studie toont aan dat het veelal niet de harde eisen, zoals terugverdientijd of kosten, belangrijk zijn voor het succesvol vervolgen van onderzoek maar met name de ‘zachte’ aspecten, zoals vertrouwen, respect en vakmanschap.

## 4.4 Conclusies

De conclusies van de evaluatie zijn dat:

- Er is een toepassingspotentieel van 30 tot 56 PJ per jaar voor hybride adsorptie-compressie warmtetransformatoren in Nederland
- Op basis van de berekende terugverdientijden blijkt dat de hybride technologie techno-economisch haalbaar is mits het secundaire circuit kan worden geëlimineerd
- Voor succesvol vervolg van de ontwikkeling is het van belang de ‘zachte’ aspecten zoals vertrouwen, respect en vakmanschap te onderhouden en waar mogelijk te versterken



# 5

## Aanvullende informatie

Aanvullende informatie over het ECN programma Energie Efficiency is te vinden op de website van ECN: <http://www.ecn.nl/nl/units/ei/introduction/>

Specifieke informatie over de ontwikkeling van Industriële warmtepompen wordt gevonden door via 'onze technologieën' door te klikken naar 'Industrial Heat technology'.

Openbare ECN rapporten kunnen worden gevonden op het gedeelte 'Publicaties' van de ECN website.

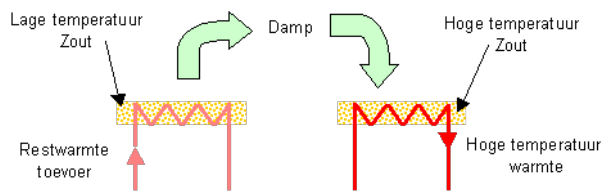
Een overzicht van publicaties naar aanleiding van het HYACINT project is te vinden in bijlage B.

# Bijlage A. Werkingsprincipe

## Thermochemische technologie

De werking van een thermochemische warmtepomp is gebaseerd op de reversibele absorptie en desorptie van damp in een vaste stof. De absorptie van damp is een exotherm proces en levert dus warmte, terwijl de desorptie van damp warmte kost (endotherm). De werking staat schematisch aangegeven in Figuur 9.

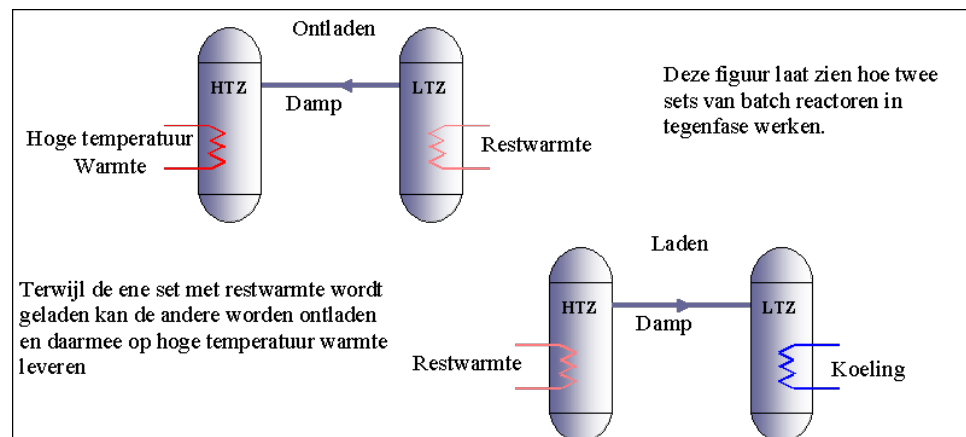
**Figuur 9:** Principewerking thermochemische warmtepomp



De werking van de thermo-chemische warmtepomp is gebaseerd op de reversibele vorming van een chemische verbinding tussen een metaal zout en ammoniak damp. Bij de vorming komt warmte vrij, voor de ontleding is warmte nodig

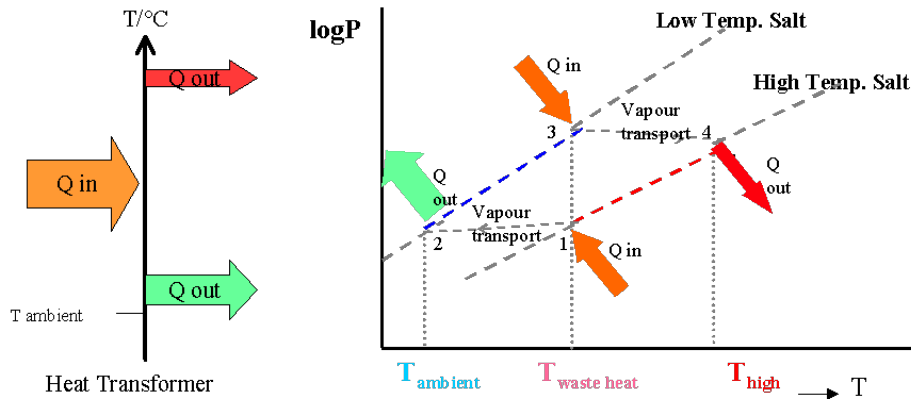
Restwarmte wordt gebruikt om damp vrij te maken uit een zogenoemd lage temperatuur zout (LTZ). Absorptie van deze damp door het hoge temperatuur zout levert warmte op een hoog temperatuur-niveau. Dit proces gaat door totdat alle damp uit het LTZ is vrijgemaakt. Daarna moet het systeem weer worden geregenereerd. Dit gebeurt door nu de restwarmte toe te voeren aan het HTZ en het LTZ te koelen met omgevingstemperatuur. Hierdoor wordt alle damp weer geabsorbeerd door het LTZ en kan het proces opnieuw beginnen. Door de twee reactievaten met zouten dubbel uit te voeren is dit batch proces continu te maken (Figuur 10).

**Figuur 10:** Van een batch- naar een quasi-continu chemische warmtepomp proces



Dit proces werkt met een efficiency van zo'n 40%: 2,5 MW restwarmte levert 1 MW middendruk stoom (Figuur 11).

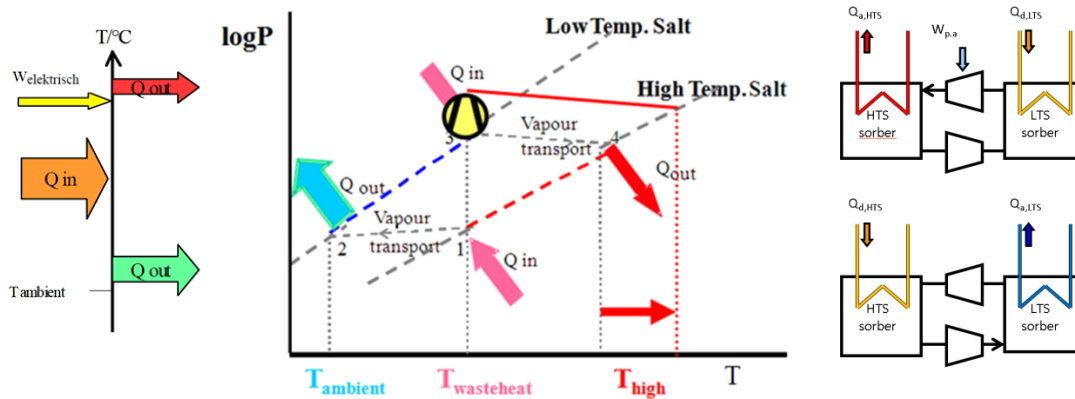
**Figuur 11:** Werking warmtetransformator in relatie tot de druk-temperatuur evenwichtslijnen voor de vaste-stof/damp paren



### Hybride adsorptie-compressie technologie

De werking van de hybride technologie is zoals gezegd gebaseerd op het principe van de thermochemische warmtepomp in combinatie met een mechanische compressor. De toevoeging van de compressor resulteert in een additionele drukstap tussen de LTZ en HTZ reactor (zie Figuur 12). Deze drukstap zorgt ervoor dat bij ontlading de druk van de damp in de HTZ reactor wordt verhoogd. Hierdoor verschuiven de drukken voor regeneratie en ontlading, met als gevolg dat het warmtetransformator proces ook met restwarmte van een lagere temperatuur kan blijven werken. De berekende hoeveelheid elektriciteit nodig voor dit proces bedraagt minder dan 10% van de gebruikte restwarmte.

**Figuur 12:** Configuratie van de Hybride adsorptie-compressie warmtetransformator



# Bijlage B. Openbare publicaties naar aanleiding van het HYACINT project

**Tabel 1:** Publicaties en Presentaties/lezingen

Platform	Titel
<b>KennisCentraal: Nieuwsbrief van het KCPK en Bumaga BV, November 2010</b>	Nieuwe warmtepomp maakt restwarmte herinzetbaar
<b>International Journal of Low Carbon Technologies, 3:6, 2011, 207-211.</b>	Study on performance of hybrid adsorption-compression type II heat pumps based on ammonia-salt adsorption
<b>RCC, Koude &amp; Luchtbehandeling, September 2011</b>	Hybride sorptie warmtepompen
<b>Applied Thermal Engineering (ATE), 2013</b>	Technical and economic feasibility of the hybrid adsorption compression heat pump concept for industrial applications (accepted for publication April 2013)
<b>Innovatiefestival 2010, oral presentation</b>	Hyacint project restwarmtebenutting
<b>Sustainable Energy Technology Conference 2010 (paper and oral presentation)</b>	Study on performance of hybrid adsorption-compression type II heat pumps based on ammonia-salt adsorption
<b>International Sorption Heat Pump Conference 2011 (paper and oral presentation)</b>	Measurement results of a hybrid adsorption-compression heat pump based on a roots compressor and silica gel-water sorption cycle
<b>IEA Heat Pump Conference 2011 (paper and oral presentation)</b>	Experimental results and model calculations of a hybrid adsorption-compression heat pump based on a Roots compressor and silica gel-water sorption
<b>Heat Powered Cycles Conference 2012 (paper and oral presentation)</b>	Technical and economic feasibility of the hybrid adsorption compression heat pump concept for industrial applications

**ECN**

Westerduinweg 3  
1755 LE Petten

Postbus 1  
1755 LG Petten

T 088 515 4949  
F 088 515 8338  
info@ecn.nl  
www.ecn.nl