

door **Ernst-Jan Bakker en Robert de Boer**  
ECN-Efficiency and Infrastructure

# Breakthrough in small scale sorption chillers Kleinschalig koelen met warmte

In de Nederlandse energievoorziening is veel warmte beschikbaar. Zo zijn er honderden petajoules aan restwarmte vanuit industrie en elektriciteitscentrales. Maar er zijn ook enorme hoeveelheden duurzame zonnewarmte. Dit potentieel aan warmte wordt nog nauwelijks gebruikt. Het zou voor de hand liggen om met deze warmte gebouwen en tapwater te verwarmen, maar dan blijft een groot deel van het zomerse warmteaanbod onbenut. Zou het niet veel beter zijn als ook de benodigde koeling met deze warmte kon worden geleverd? Dit is tegenwoordig mogelijk met behulp van sorptiekoeltechniek, zelfs voor kleinschalige toepassingen.

Sorptiekoeling is een techniek waarbij warmte wordt gebruikt om koude te genereren. ECN werkt vooral aan vaste stof/damp sorptiekoeling. Het werkingsprincipe hiervan is gebaseerd op omkeerbare (chemische) reacties van een damp met een vaste stof. Naast (betere) benutting van beschikbare zonnewarmte of restwarmte, en daarmee besparing op fossiele brandstoffen, biedt sorptiekoeling de volgende voordelen ten opzichte van de standaard elektrische compressiekoeling:

- Door het gebruik van warmte in plaats van elektriciteit zorgt sorptiekoeling ervoor dat er minder zomerse pieken optreden in het elektriciteitsnet. Hierdoor is er minder behoefte aan piekvermogen en aan eventuele verzwaaring van het net. Bovendien verkleint het de kans op een black-out, een probleem dat in Zuid-Europese landen regelmatig voorkomt.
- Een groot aantal sorptiecyclus is gebaseerd op natuurlijke koudemiddelen en is daarmee milieuvriendelijker dan compressiecyclus met HFC's of HFK's.
- Door het gebruik van thermische compressie in plaats van mechanische compressie produceert een sorptiekoelmachine veel minder geluid (en trillingen) en is er minder onderhoud nodig (want er zijn minder bewegende delen).

De afgelopen jaren zijn er in Europa meer dan 120

zonnekoelingsinstallaties gebouwd, met een totaal koelvermogen van circa 20MW [Hemming, 2007]. Koplopers bij deze ontwikkeling zijn Duitsland en Spanje.

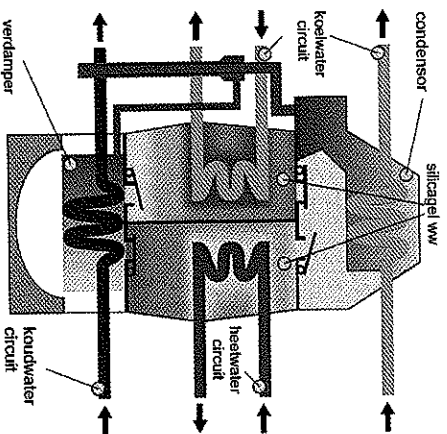
## Kleinschalige innovatie

Sorptiekoeling is op zich geen nieuwe ontwikkeling. Wel nieuw is de ontwikkeling van kleinschalige sorptiekoelmachines. In de vermogensrange van 2 tot 20kW zijn de laatste jaren verschillende producten ontwikkeld. Hiermee komt sorptiekoeling ook in beeld voor individuele woningen, klein-collectieve systemen en klein-zakelijke toepassingen (zoals kleine kantoren en winkels). Een tweede trend is geleidelijke verlaging van de aandrijftemperaturen voor de sorptiecyclus naar ruim onder de 100°C (temperaturen liggen nu typisch rond 80-90°C), waardoor meer zonne- en restwarmte kan worden gebruikt. Praktische voordelen hiervan zijn dat sorptiekoeling kan worden toegepast in combinatie met verlaging van de aanvoertemperatuur in het stadsnet in de zomer (omdat de vraag dan relatief laag is) en dat vlakke-plaat zonnecollectoren warmte van voldoende kwaliteit kunnen leveren voor zonnekoeling.

Op de IEA Heat Pump Conference 2008 in Zürich werd een goed overzicht gegeven van alle spelers en producten op deze markt. Enkele voorbeelden (inclusief koudemiddel/sorptiemiddel):

- Sortech 7,5kW adsorptiekoeler (water/silicagel)
- Pink 10kW absorptiekoeler (ammonia/water)
- EAW 15kW absorptiekoeler (water/lithiumbromide)
- Yazaki 17kW absorptiekoeler (water/lithiumbromide)
- ClimateWell 10kW absorptiekoeler (water/lithiumchloride)

Een aantal van deze producten, zoals de koelmachines van Sortech en ClimateWell, zijn ook reversibel: ze kunnen behalve koelen ook verwarmen. Naast deze voorbeelden van commerciële producten maakt het overzicht ook duidelijk dat er nog een aantal kleinschalige sorptiekoelmachines in ontwik-

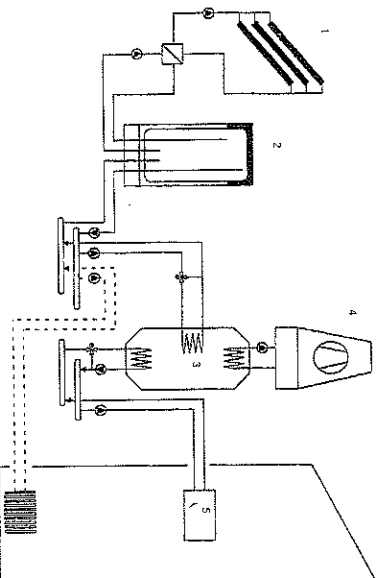


Abbeelding 1:  
schematische opbouw van  
een adsorptiekoelmachine

keling zijn, onder andere bij AoSol (6kW), Invensor (10kW), ITW Stuttgart (10kW) en ECN (2,5kW). Op deze laatste ontwikkeling (2,5kW adsorptie-koelmachine op basis van water/silicagel) zal in dit artikel verder worden ingegaan.

## Werking adsorptiekoeling

Niet als bij compressiekoeling wordt bij adsorptiekoeling gebruikgemaakt van een cyclus waarbij het koudemiddel bij hoge druk en temperatuur condenseert en bij lage druk en temperatuur weer verdampt. Het bijzondere bij adsorptiekoeling is dat er geen mechanische compressor wordt gebruikt voor deze drukverhoging. In plaats daarvan worden de bindingskrachten tussen silicagel en water gebruikt, waarbij warmte als energiebron dient. In het adsorptiesysteem worden de drukverschillen door 'thermische compressie' gecreëerd. Het verdampen van het koudemiddel water wordt bereikt door de sterke aantrekkingskracht van droge silicagel, die in verbinding staat met de verdampertank. Silicagel is een poreuze, glasachtige vaste stof met een sterke aan-



Abbeelding 2:  
schematische weergave van een door zonnewarmte gedreven koelsysteem 1 = zonnecollector,  
2 = warmteopslagtank, 3 = sorptiekoelsysteem, 4 = koelwater/drycooler, 5 = koudeafgifte

trekingskracht voor waterdamp. Om dit proces gaande te houden moet na enige tijd de met waterdamp beladen silicagel weer geregenereerd worden. Dit gebeurt door de temperatuur van de silicagel te verhogen, waarbij de waterdamp weer vrijkomt bij een zodanige druk dat die bij omgevingsdruktemperatuur tot condensatie kan worden gebracht. De drooggestookte silicagel kan dan opnieuw worden gebruikt voor adsorptie van waterdamp uit de verdampertank. De bedrijfscyclus van adsorptiekoeling is vergelijkbaar met die van absorptiekoeling op basis van lithiumbromide en water. De twee belangrijkste verschillen zijn dat silicagel met een lagere aandrijftemperatuur nog efficiënt kan worden geregenereerd (gedroogd) en dat silicagel een vaste stof is die niet verpompt kan worden van generator naar absorber, zoals bij een lithiumbromideoplossing. Voor de opwarming en afkoeling van silicagel is deze op een warmtewisselaar aangebracht, waar afwisselend heetwater en koelwater doorheen stroomt. De adsorptiecyclus is dus een batchmatig proces. Voor een quasi-continu proces is het nodig om ten minste twee silicagelbatches in tegengestelde bedrijven. De opbouw van een adsorptiekoeler, weergegeven in afbeelding 1, bevat daarom twee gescheiden compartimenten met een silicagel gevulde warmtewisselaar die samen de 'thermische compressor' vormen. Via een aantal kleppen in het heetwater- (85°C) en koelwatercircuit (35°C) wordt de silicagel warmtewisselaar dan afwisselend gekoeld en verwarmd. (Zie afbeelding 1)

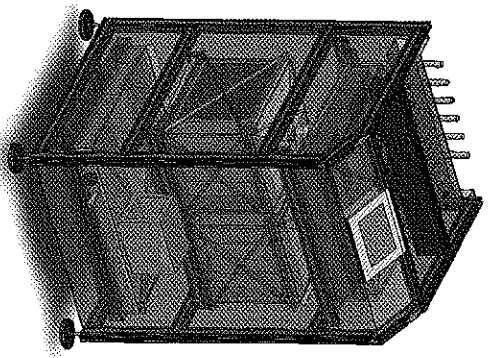
De laagst bereikbare koudwatertemperatuur van een adsorptiesysteem ligt rond 4°C, en is daarmee prima te gebruiken voor airconditioning en koudwatersystemen in de gebouwde omgeving en de industrie.

Adsorptiekoeling is een aantrekkelijke technologie in situaties waar een warmtebron kan worden ingezet om koeling te realiseren. De inzet van zonnewarmte is bijvoorbeeld interessant om met hernieuwbare warmte te kunnen koelen, alleen al omdat de vraag naar koeling en het aanbod aan zonnewarmte meestal tegelijkertijd optreden. In afbeelding 2 is een schema weergegeven van een systeem met zonnecollectoren in een door warmte gedreven koelsysteem [Henning, 2004].

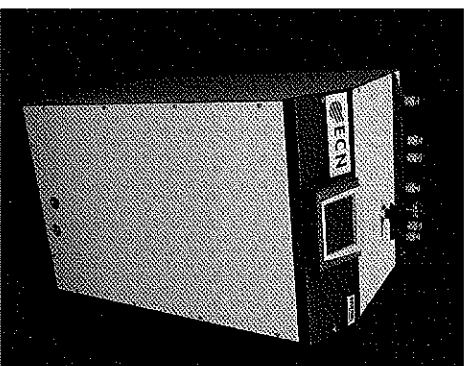
Naast zonnewarmte kunnen vanzelfsprekend ook andere (rest)warmtestromen uit industrie, elektriciteitsproductie, warmtekrachtssystemen of stadsverwarming voor de aandrijving worden gebruikt.

## Ontwerp adsorptiekoelsysteem

Om de technische en economische haalbaarheid van diverse kleinschalige warmtegedreven koelsystemen te onderzoeken en de mogelijkheden van deze technologie te demonstreren is het Europese Ff6 project PolySMART opgezet (polysmart.org).



Afbeelding 3: ontwerpschets en foto van de 2,5kW adsorptiekoeler van ECN



Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) ontwikkelt in het kader van dit project een kleinschalige adsorptiekoeler op basis van het stofteppaar silicagel en water, die wordt getest en gedemonstreerd in één van de onderzoekswoningen op het ECN-terrein. De uitgangspunten voor deze koeler zijn gebaseerd op het leveren van voldoende koudevermogen (2,5 kW) voor een modern woonhuis.

Voor de afmetingen is een standaard wiggedformaat gehanteerd om zo veel mogelijk aan te sluiten bij gebruikelijke afmetingen in de woningbouw. Voor adsorptiekoelsystemen ligt hier een grote uitdaging. Vanwege het grote benodigde warmte-wisselende oppervlak zijn de commerciële systemen tot op heden volumineus en zwaar.

In het nieuwe systeemontwerp zijn compacte lichtgewicht aluminium warmtewisselaars uit de autobedienbranche toegepast om de silicagel op aan te brengen. Door de opbouw met zeer veel kleine vinnen wordt een groot oppervlak verkregen, terwijl volume en gewicht beperkt blijven. Om dezelfde reden is dit type warmtewisselaar ook voor de verdamper en de condensor toegepast.

In afbeelding 3 is de opbouw van de koeler schematisch weergegeven. De verdamper is op de bodem geplaatst, daarboven bevinden zich de twee silicagel reactoren en bovenin zit de condensor. (Zie afbeelding 3)

Waterdamp stroomt bij lage druk uit de verdamper en wordt in een van de twee silicagel reactoren opgenomen. Vanuit de reactor stroomt de waterdamp vervolgens bij hogere druk naar de condensor. Tussen deze componenten zijn terugslagkleppen aanwezig om retourstroom van waterdamp te blokkeren. Het proces vereist dat er naast waterdamp geen andere gasen of dampen in het systeem aanwezig zijn. De behuizingen van de componenten in het koelcircuit zijn hermetisch afgesloten en staan

op onderdruk. Het water uit de condensor gaat via een condensaat retourleiding en een afsluiter weer naar de verdamper. Het heetwater en koelwater wordt via een achttal kleppen en leidingwerk afwisselend naar de reactoren geleid. Daarnaast heeft het systeem een controller waarmee de kleppen worden aangestuurd.

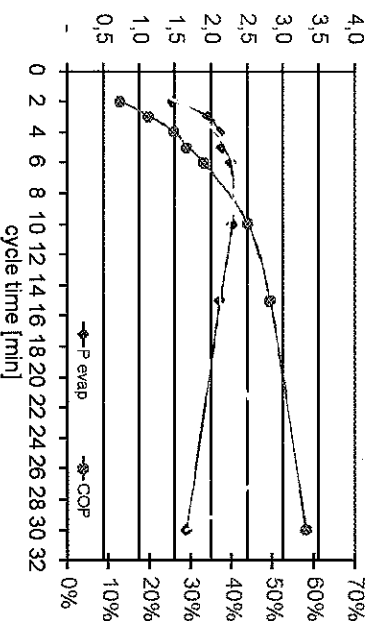
## Prestaties

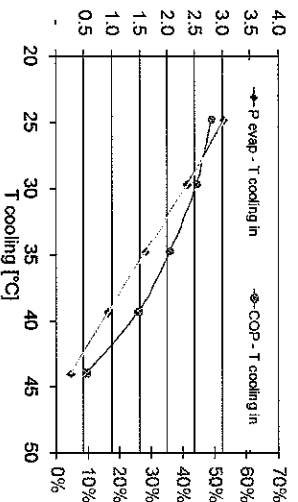
De adsorptiekoeler is bij ECN in het laboratorium getest en wordt binnenkort ingebouwd ingebouwd in één van de onderzoekswoningen. Dit houdt in dat het systeem op goed regelbare stromen voor heet water, koelwater en koud water is aangesloten. Verderop in dit artikel worden de gemeten prestaties op hoofdlijnen toegelicht.

Het is van belang te weten dat de prestaties van een warmtegedreven koeler sterk variëren met de aangeboden temperaturen van heet water, koelwater en koud water. Als standaardcondities voor de inlaattemperaturen zijn hiervoor respectievelijk 80°C, 30°C en 15°C aangehouden. Onder deze omstandigheden is de invloed van de cyclustijd op de

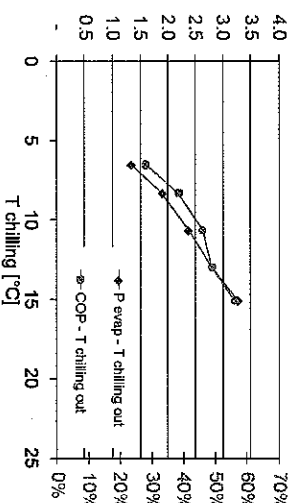
Afbeelding 4:

invloed van de opgelegde cyclustijd op het koelvermogen en de COP van het adsorptiekoelsysteem





Afbeelding 5: invloed van koelwatertemperatuur (links) en koudwatertemperatuur (rechts) op de prestaties van het adsorptiekoelsysteem



prestaties bepaald, zie afbeelding 4. De cyclustijd is de duur van een complete cyclus van opwarmen en afkoelen van een reactor, dus een desorptie- en een adsorptiefase. De efficiency is uitgedrukt als Coëfficiënt of Performance (COP). Het COP-percentage geeft de verhouding weer tussen de geproduceerde hoeveelheid koude en de gebruikte hoeveelheid warmte. Deze percentages mogen dus niet worden vergeleken met de elektrische COP-waarden die bij mechanische compressiesystemen worden gehanteerd.

Uit de afbeelding is af te leiden dat cyclustijden korter dan 6 minuten niet zinvol zijn, omdat dan zowel het geleverde koudvermogen als de efficiency een dalende trend laten zien. De oorzaak hiervan is dat bij te korte cyclustijden een deel van de silicagel niet actief meedoet in het proces, omdat het te weinig tijd krijgt om de volledige temperatuurcyclus te doorlopen. Bij toenemende cyclustijden (>10 minuten) wordt een daling van het koudvermogen gecompenseerd door een hogere efficiency. Bij langere cyclustijden wordt er per tijdseenheid minder vaak afgewisseld in opwarmen en afkoelen van de silicagel reactoren. Omdat wisselen gepaard gaat met thermische verliezen, betekent minder wisselen een hogere efficiency. Het gemiddelde koudvermogen per cyclus neemt echter af en dit verklaart de dalende trend in de vermogenscurve.

De invloed van de aanvoertemperatuur van het koelwater naar de adsorptiekoelmachine is in afbeelding 5 (links) weergegeven. Bij een lagere koelwatertemperatuur stijgt het koudvermogen en de COP van het systeem gestaag. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een verhoging van de wateropname van de silicagel bij een lagere koelwatertemperatuur. Bij een hogere koudwatertemperatuur gaat de prestatie van het systeem ook omhoog. Dit betekent dat er bij de systeemintegratie van een adsorptiekoeler duidelijk rekening moet worden gehouden met de temperaturen van het koelwater-

stelsysteem en de temperatuur van het koudwaterafgiftesysteem.

De testen laten zien dat de ambieuze ontwerp-specificaties voor dit prototype gehaald zijn. Er kan bijna 2,5kW koude worden geleverd met een zeer compacte koelmachine (vermogensdichtheid circa 7kW/m<sup>3</sup>) bij een zeer respectabele COP.

## Perspectief

De hiervoor beschreven sorptiekoelmachine zal worden ingebouwd in één van onderzoekswoningen op het ECN-terrein in Petten. De woningen zijn gebaseerd op de referentie 'tussenwoning' en zijn daarmee representatief voor een belangrijk deel van de Nederlandse woningbouw. De woningen zijn onbewoond, maar alle aspecten van gebruikersgedrag worden gesimuleerd (zoals tapwatergebruik, interne warmteproductie, vocht- en CO<sub>2</sub>-productie, en instellingen voor ventilatie- en thermostaatstanden). Hiermee bieden deze woningen een realistische maar gecontroleerde testomgeving.

De sorptiekoeler zal worden aangedreven door een micro-warmtekracht eenheid, waarmee een uniek micro-trigeneratie systeem wordt gerealiseerd. Trigeneratie wil in dit geval zeggen: de micro WKK unit levert kracht en warmte, en deze warmte wordt in de zomer gebruikt om de koelmachine aan te drijven (en om tapwater te verwarmen). Als buitendeel zal een standaard drycooler worden toegepast. Deze configuratie zal minimaal één jaar lang worden getest.

Het vermogen van de sorptiekoeler past goed bij een Stirling microWKK (of een zonnecollector systeem) voor een individuele woning. Mits toegepast in combinatie met maatregelen om opwarming in de zomer te beperken (bijvoorbeeld door zonwering), is de verwachting dat 2,5kW voldoende koeling is voor een zeer aangenaam binnenklimaat. Zeker als dit vermogen, indien nodig, volledig kan worden benut voor het meest gemelde comfort-



hangen op het ECN terrein in Petten

probleem: hitte in de slaapkamers. Parallel aan de 'veldtest' wordt deze sorptiekoelmachine verder ontwikkeld tot een marktrijp product, waarbij de nadruk ligt op het 'productieklaar' maken van het ontwerp. Hiervoor zoekt ECN momenteel naar geschikte marktpartijen, zowel voor productie als voor vernakting.

## Referenties

- EU FP6 project PolySMART, [www.polysmart.org](http://www.polysmart.org)
- EU FP6 project PolySMART, Solar-Assisted Air-conditioning in Buildings – A handbook for planners, Hemming, H.M. (editor), Solar-Assisted Air-conditioning in Buildings – A handbook for planners, ISBN 3-211-00647-8, 2004.
- Hemming, H.M., "Solar Cooling and Air-Conditioning", ESTTP presente, [http://esttp.org/cnshp-load/pdf/070202\\_4\\_EUSEW\\_Hemming.pdf](http://esttp.org/cnshp-load/pdf/070202_4_EUSEW_Hemming.pdf), 2007.

## Samenvatting

N naast (betere) benutting van beschikbare zonne-energie, biedt sorptiekoeling nog een warmte of restwarmte, en daarmee besparing op fossiele brandstoffen, biedt sorptiekoeling ook in beeld aantal voordelen ten opzichte van de standaard elektrische compressiekoeling, zoals reductie van zomerse pieken in het elektriciteitsnet, milieuvriendelijkere koudemiddelen en minder geluid & onderhoud. Sorptiekoeling aan zich is geen nieuwe ontwikkeling van kleinschalige Wel nieuw is de ontwikkeling van vermogenstrange van 2 sorptiekoelmachines (in de vermogenstrange van 2 tot 20kW), waardoor sorptiekoeling ook in beeld komt voor individuele woningen, klein-collectieve systemen en klein-zakelijke toepassingen (zoals kleine kantoren en winkels). Een tweede trend is geleidelijke verlaging van de aandrijftemperaturen

voor de sorptiecyclus naar ruim onder de 100°C, (temperaturen liggen nu typisch rond 80-90°C), waardoor meer zonne- en restwarmte kan worden gebruikt. Dit artikel gaat nader in op het principe van ad-sorptiekoeling, met in het bijzonder aandacht voor sorptiekoeling, en gemeten prestaties van een nieuwe, het ontwerp en gemeten prestaties van een nieuwe, innovatieve 2,5kW adsorptiekoelmachine, ontwikkeld door ECN in Petten (NL). Hiervoor zoekt ECN momenteel naar geschikte marktpartijen, zowel voor productie als vernakting.

## Summary

Besides (better) utilisation of available solar heat of waste heat, and thereby reduction offers several fuel consumption, sorption cooling offers several other advantages compared to standard electrical compression cooling. Such as reduction of summer peaks in the electricity grid, refrigerants with lower GWP/ODP, and less noise & maintenance. Sorption cooling in itself is not a new development. However, the development of small scale sorption chillers (in the range of 2 to 20kW) is new. This development allows sorption cooling to enter the markets for individual homes, small collective systems and small commercial applications (e.g. small offices and shops). A second trend is gradual reduction of the driving temperatures of the sorption cycles, to well under 100°C (temperatures are typically around 80-90°C at the moment), allowing more solar and waste heat to be used. This article describes the principle of adsorption cooling, with in particular the focus on the design and measured performance of a new, innovative 2.5kW adsorption chiller, developed by ECN in Petten (NL). For this chiller ECN is currently searching for suited commercial parties, for both production and commercialization.