



Energy research Centre of the Netherlands

Ontwikkeling van een energiezuinige airconditioning voor de auto

R. de Boer

Verschenen in RCC Koude en Luchtbehandeling nr. 12, december 2008, 33-37

Verantwoording

Dit rapport is gemaakt als bijdrage aan het tijdschrift RCC koude en luchtbehandeling, 101^e jaargang, nr. 12, december 2008, pagina 33-37.

Inhoud

Lijst van figuren	4
Samenvatting	5
1. Inleiding	6
2. Werkingsprincipe adsorptiekoeling	7
3. Het prototype	9
4. Tests en resultaten	10
5. Vooruitblik	12

Lijst van figuren

Figuur 2.1	<i>Isosteren diagram van een silicagel-water systeem met daarin aangegeven de bedrijfscyclus van een adsorptiekoelsysteem.....</i>	7
Figuur 2.2	<i>Standaard opbouw van een adsorptiekoelmachine.....</i>	8
Figuur 3.1	<i>(links) Opbouw van de thermische compressor van de sorptiekoeler, (rechts) foto van het inwendige van een silicagel compartiment</i>	9
Figuur 4.1	<i>Koelvermogen en COP bij verschillende cyclustijden. De horizontale stippellijnen geven de target prestaties weer voor de geselecteerde testcondities .</i>	10
Figuur 4.2	<i>Vermogensverloop in de tijd voor verwarming, koeling (linker y-as), condensatie en verdamping (rechter y-as) bij een cyclustijd van 6 minuten (de x-as is de tijd in min:sec)</i>	11
Figuur 5.1	<i>Impressie van een adsorptiekoelsysteem als airconditioning geïntegreerd onder de motorkap van een personenauto</i>	12

Samenvatting

De huidige airconditioning (AC) systemen in auto's zijn gebaseerd op compressiesystemen gebruikmakend van koudemiddel R134a. Deze AC systemen leveren een significante bijdrage aan de uitstoot van broeikasgassen, zowel direct door het geleidelijk weglekken van het koudemiddel uit het systeem, als indirect door het extra brandstofgebruik voor de aandrijving van de compressor.

Bij ECN is een nieuw concept voor een auto AC systeem in ontwikkeling. Dit beoogt zowel de directe als de indirecte uitstoot van broeikasgas tot nul te reduceren. Het nieuwe concept is gebaseerd op adsorptiekoeltechniek, die gebruik maakt van de vrij beschikbare warmte in het koelwatercircuit voor de aandrijving van het koelproces, zodat er geen extra brandstof wordt gebruikt. Daarnaast wordt water als koudemiddel toegepast, wat eveneens niet bijdraagt aan schadelijke emissies.

Het artikel geeft een beschrijving van de ontwikkeling, tests en resultaten van een laboratorium prototype. Er is aangetoond dat het mogelijk is om met adsorptiekoeltechniek de restwarmte van de motor te gebruiken voor het maken van voldoende koeling voor de cabine.

1. Inleiding

Het gebruik van airconditioning (AC) systemen voor auto's en vrachtwagens draagt op twee manieren bij aan de uitstoot van broeikasgassen. Een directe bijdrage door verlies van koudemiddel door lekkages van het systeem, en een indirecte bijdrage door het extra brandstofgebruik, nodig voor de aandrijving van de compressor. Schattingen van de EU voor het jaar 2010 lopen op tot 37 miljoen ton CO₂ equivalenten voor de directe emissies van R134a en 24 miljoen ton CO₂ voor het extra brandstofverbruik voor de EU-15 landen. Deze milieunadelen van het AC gebruik wegen voor de gemiddelde gebruiker echter bij lange na niet op tegen de voordelen van verhoogd comfort en veiligheid in de auto. Tegenwoordig wordt in Nederland 90% van de nieuwe auto's afgeleverd met een AC systeem.

In de EU landen is vastgelegd dat vanaf 2011 het gebruik van het koudemiddel R134a voor auto AC systemen aan banden wordt gelegd. EU directive 2006/40/EC is uitsluitend gericht op het verminderen van de directe emissies door verlies van koudemiddelen met een GWP hoger dan 140. Daarbij komt dat de EU sinds kort de automobielbranche stringenter eisen oplegt ten aanzien van de maximale CO₂ emissies per gereden km, waardoor brandstofgebruik voor "auxiliaires" onder de loep wordt genomen.

Deze regelgeving vormt een sterke stimulans voor de automotieve AC branche om naar alternatieven voor R134A te zoeken. De meeste aandacht gaat daarbij naar CO₂ als koudemiddel. Een aantal Duitse automobielabrikanten hebben intussen voor CO₂ gekozen als koudemiddel in hun toekomstige AC systemen. De toepassing hiervan vereist wel een forse aanpassing van de componenten van het AC systeem, vanwege de veel hogere bedrijfsdrukken tot wel 100 bar. Dit maakt dat er ook nog goede kansen bestaan voor een nieuw drop-in koudemiddel, HFO1234y, dat momenteel uitgebreid wordt getest. Ook het brandbare R152a wordt als alternatief onderzocht.

Een andere aanpak voor een alternatief voor een compressiesysteem wordt uitgevoerd bij ECN in het kader van het Europees gesponsorde TOPMACS project, **Thermally OPerated Mobile AC-Systems**. Dit project is gericht op de ontwikkeling van koelsystemen die de overtollige warmte van de verbrandingsmotor kunnen benutten voor de aandrijving ervan. Op deze wijze wordt extra brandstofverbruik vermeden. Hiervoor wordt adsorptiekoeltechniek toegepast, waarin bovendien geen koudemiddelen worden gehanteerd met een hoge GWP. Het TOPMACS project wordt door een consortium van industriële partijen, onderzoeksinstituten en universiteiten uitgevoerd. ECN doet in deze context de ontwikkeling van een adsorptiekoelsysteem op basis van silicagel en water.

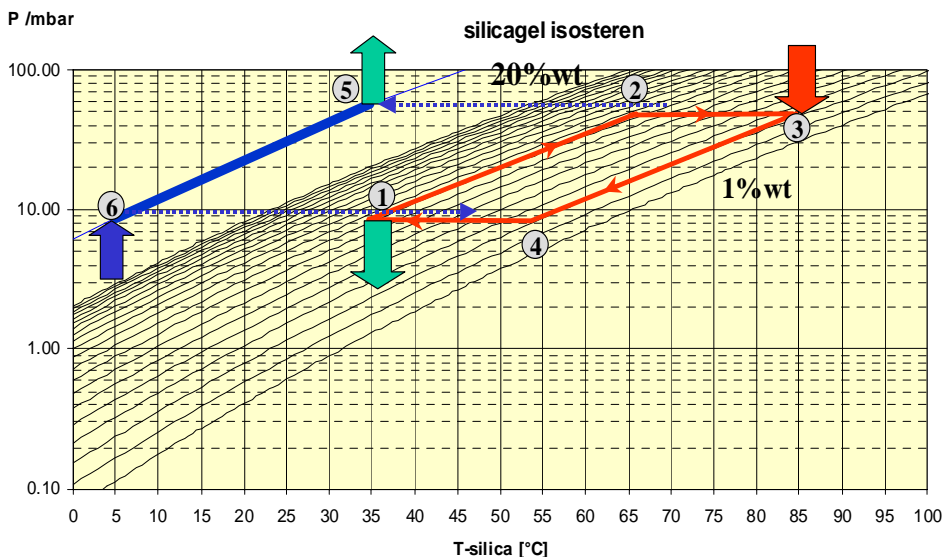
In dit verhaal wordt nader ingegaan op het werkingsprincipe van dit adsorptiekoelsysteem, de ontwikkeling van het prototype en de resultaten van de tests hieraan. Tot slot wordt nog een vooruitblik gedaan naar de volgende ontwikkelstappen.

2. Werkingsprincipe adsorptiekoeling

Net als bij compressiekoeling wordt bij sorptiekoeling gebruikt gemaakt van een cyclus waarbij het koelmedium bij hoge druk en temperatuur condenseert en bij lage druk en temperatuur weer verdampt. In het sorptiesysteem worden de drukverschillen door thermische compressie gecreëerd. Hiervoor wordt een combinatie gebruikt van een vaste stof (i.c. silicagel) en een koude-middel (water) dat aan deze vaste stof adsorbeert. In Figuur 2.1 is in het druk-temperatuur diagram van het silicagel-water systeem de werking schematisch weergegeven. In het diagram staan de isosteren weergegeven, ofwel de waterdampspanning-temperatuur evenwichten voor silicagel met constante waterbelading tussen 20% wt en 1% wt. De blauwe lijn is de dampspanning van water.

Aan het begin van de sorptiecyclus (punt 1 in het diagram) is er het koudemiddel (water) dat ge-adsorbeerd is aan de silicagel. Door de temperatuur van het silicagel te verhogen naar ongeveer 85°C met de warmte van het koelwater van de motor, stijgt ook de waterdampspanning in de silicagel (1→2). Deze waterdamp gaat condenseren (5), zodra de druk in de reactor tot boven die van de condensor ligt. De silicagel in de reactor wordt zo gedroogd (2→3) totdat er een drukevenwicht is ontstaan tussen de warme reactor en de condensor. Na het condenseren stroomt het water via een regelklep naar de verdamper (6). Vervolgens wordt de gedroogde silicagel teruggebracht naar omgevingstemperatuur. (3→4) Bij het afkoelen daalt de dampspanning tot onder het drukniveau van de verdamper en zo wordt er waterdamp uit de verdamper aange-trokken (6) door de silicagel. Adsorptie van waterdamp vindt plaats (4→1) totdat er weer even-wicht is ontstaan tussen de druk in de verdamper en boven de silicagel.

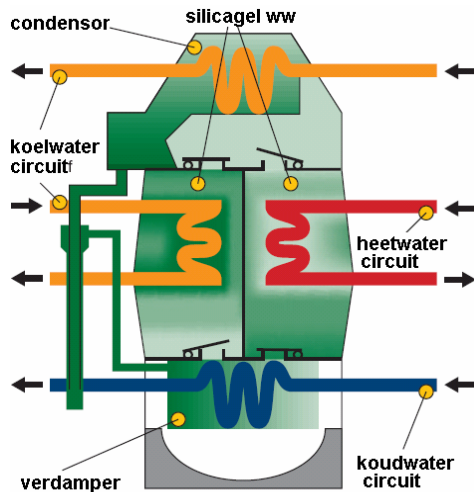
In de cyclus is tevens met pijlen weergegeven waar warmte wordt toegevoerd (3), warmte naar de omgeving wordt afgevoerd (1 en 5) en waar koude wordt gemaakt (6).



Figuur 2.1 *Isosteren diagram van een silicagel-water systeem met daarin aangegeven de bedrijfscyclus van een adsorptiekoelsysteem*

De bedrijfscyclus van adsorptiekoeling is vergelijkbaar met het meer bekende absorptie proces op basis van lithiumbromide oplossing en water. De twee belangrijkste verschillen zijn dat silicagel met een lagere temperatuur nog efficiënt kan worden aangedreven en dat silicagel een vaste stof is die niet verpompt kan worden van generator naar absorber. Voor opwarming en afkoeling van silicagel is deze op een warmtewisselaar aangebracht waarmee de opwarming en afkoeling wordt opgelegd. De hierboven beschreven adsorptiecyclus is dus een batchmatig proces.

Voor een quasi-continu proces is het nodig om tenminste twee silicagel batches in tegenfase te bedienen. De opbouw van een adsorptiekoeler, weergegeven in Figuur 2.2 bevat daarom twee gescheiden compartimenten met een silicagel gevulde warmtewisselaar die de ‘thermische compressor’ vormen. Via een aantal kleppen in het heetwater (85°C) en koelwater (35°C) circuit wordt een warmtewisselaar dan afwisselend gekoeld en verwarmd.



Figuur 2.2 Standaard opbouw van een adsorptiekoelmachine

Systeemeisen

Met de beoogde testauto zijn bij aanvang van het project metingen gedaan naar de hoeveelheid koude die nodig is voor de cabine en tevens de hoeveelheid warmte die beschikbaar is in het koelwater bij de genormaliseerde Europese ritcyclus. Daarbij is nog een onderscheid gemaakt tussen koelvraag onder normale Europese zomercondities (28°C, 50%RV) buitentemperatuur en extremere zomercondities (35°C, 60%RV). Onder deze condities is afgeleid dat een sorptiekoeler voor een auto tot 2 kW koude moet leveren en dat met een efficiency moet kunnen doen van ongeveer 50%. De efficiency wordt uitgedrukt als Coefficient Of Performance (COP), de verhouding tussen geproduceerde koude gedeeld door de gebruikte warmte.

Naast de thermische prestaties zijn er tevens eisen geformuleerd voor systeemgewicht (35 kg) en volume (16 dm³ voor de thermische compressor) waaraan toekomstige AC systemen op basis van adsorptietechniek aan moeten kunnen voldoen.

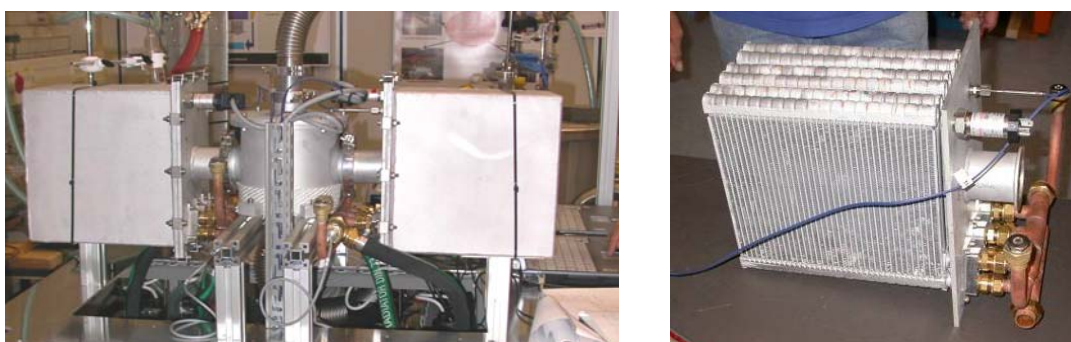
Voor de aandrijving van een adsorptiekoelsysteem in een auto wordt als uitgangspunt de aanwezige warmte uit het koelwatercircuit van de motor gebruikt. Deze warmte wordt in de zomer normaal via de radiator naar de omgeving afgevoerd, en heeft een temperatuur van 80-90°C. De warmteafvoer hangt rechtstreeks samen met het toerental en vermogen van de motor en is vooral in stadsverkeer sterk fluctuerend. Daarnaast duurt het na een koude start enkele minuten voordat de motor is opgewarmd en er warmte beschikbaar is voor de adsorptiekoeler. Voor deze situatie wordt een hulpbrander overwogen om extra warmte aan de AC systeem te leveren. Deze hulpbrander maakt het in principe ook mogelijk om het AC systeem te laten werken als standkoeling of voorkoeling zonder dat de motor daarvoor moet draaien.

De grootste uitdaging voor het ontwerp van het prototype zit in het voldoende klein krijgen van het thermische compressor gedeelte.

3. Het prototype

Om kleine adsorptiekoelsystemen op basis van vaste stof adsorptie te verkrijgen is het als eerste van belang om de warmteoverdracht van en naar de silicagel zo groot mogelijk te krijgen zodat opwarming en afkoeling ervan snel verloopt en dat daarbij de opname en afgifte van waterdamp bij resp. afkoelen en opwarmen ook snel kan plaatsvinden. Om hier aan te voldoen worden de silicagel deeltjes (een glasachtige vaste stof) in dunne lagen in of op een warmtewisselaar aangebracht. Als warmtewisselaar is gekozen voor buis-vin warmtewisselaars uit de auto-industrie. Deze warmtewisselaars combineren een groot warmteoverdragend oppervlak in een klein volume met een laag gewicht en hebben vrije ruimte beschikbaar voor de silicagel.

Figuur 3.1 toont de opbouw van de thermische compressor, bestaande uit twee silicagel compartimenten met daartussen een behuizing voor dampkleppen.



Figuur 3.1 (links) Opbouw van de thermische compressor van de sorptiekoeler, (rechts) foto van het inwendige van een silicagel compartiment

Een silicagel compartiment is opgebouwd uit drie parallel geschakelde warmtewisselaars, die tussen de vinnen het silicagel bevatten. Deze warmtewisselaars zijn in een aluminium vacuüm-behuizing gevat. Het netto volume van de silicagel compartimenten bedraagt 30 dm^3 , bij een gewicht van 24 kg, waarvan 6 kg silicagel.

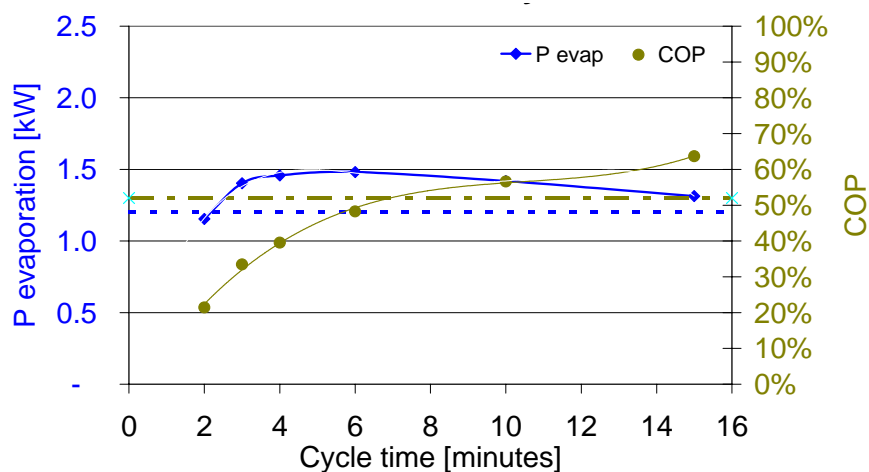
De dampkleppen (terugslagkleppen) in de behuizing tussen de reactoren zorgen ervoor dat de waterdampstroom uitsluitend in de beoogde richting kan stromen.

Voor de laboratoriumtests aan de thermische compressor zijn een watergekoelde condensor en verdamper toegepast. Het prototype is voor de tests aangesloten op heetwater-, koelwater- en koudwatervoorziening, en uitgerust met temperatuur en debietsensoren om de overgedragen thermische vermogens te meten.

4. Tests en resultaten

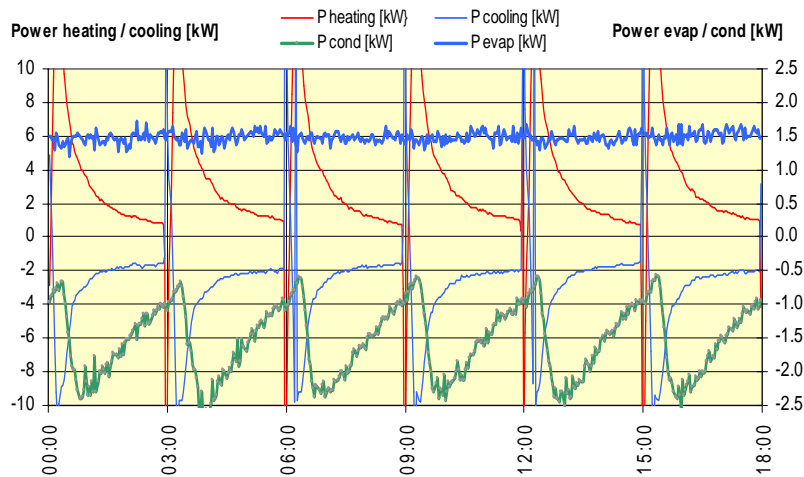
De eerste tests aan het prototype waren erop gericht de invloed van de cyclustijd op de prestaties te analyseren. De cyclustijd is de duur van een volledige cyclus waarin een silicagel warmtewisselaar wordt opgewarmd en weer wordt afgekoeld. De inlaattemperaturen voor verwarming, koeling en koude werden daarbij respectievelijk op 90°C, 33°C en 20°C ingesteld.

De invloed van de cyclustijd op de prestaties van het adsorptiekoelsysteem staan in Figuur 4.1. Bij toenemende cyclustijden stijgt de efficiency van het systeem (hogere COP) omdat er per tijdseenheid minder warmte verloren gaat in het opwarmen van thermisch 'dode' massa van aluminium warmtewisselaars. Het koelvermogen is bij 2 minuten cyclustijd laag. In deze korte cyclustijd is er maar een beperkt deel van het silicagel dat effectief bijdraagt aan adsorptie en desorptie van waterdamp. Bij toenemende cyclustijd wordt de silicagel effectiever benut en stijgt het vermogen. Bij cyclustijden boven de 10 minuten zakt het vermogen verder in.



Figuur 4.1 *Koelvermogen en COP bij verschillende cyclustijden. De horizontale stippellijnen geven de target prestaties weer voor de geselecteerde testcondities*

De thermische vermogens van het systeem zijn in Figuur 4.2 weergegeven. Hierin is duidelijk het batch karakter te zien in de vermogens voor verwarming en koeling van de reactoren en ook de condensor vertoont een fluctuerend vermogen tijdens een cyclus.



Figuur 4.2 *Vermogensverloop in de tijd voor verwarming, koeling (linker y-as), condensatie en verdamping (rechter y-as) bij een cyclustijd van 6 minuten (de x-as is de tijd in min:sec)*

Het verdampervermogen is wel constant op een niveau van 1.5 kW. Het constante niveau is veroorzaakt door de thermische massa van de verdamper, waardoor korte fluctuaties in het thermische vermogen worden uitgedoofd.

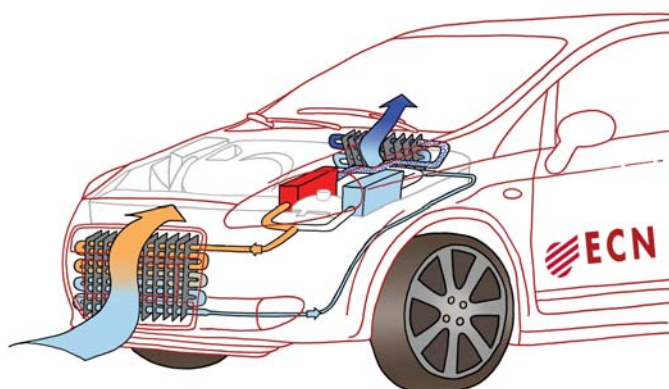
Na de eerste serie tests is gebleken dat er een restrictie in de leidingen voor de waterdampstroom aanwezig was. Deze veroorzaakte extra drukval en daarmee een lagere algemene prestatie van het systeem. Deze drukval is vervolgens door kleine aanpassingen met zo'n 40% verminderd, waarna het koelvermogen bij de bovengenoemde testcondities is toegenomen tot iets meer dan 2 kW.

5. Vooruitblik

Gebaseerd op de resultaten behaald met het 1^e lab-prototype is in het consortium besloten om op basis van het silicagel water systeem de ontwikkeling voort te zetten met de bouw van een on-board prototype. Dit 2^e prototype wordt door ECN ontworpen en gebouwd om bij CRF in Italië in een Fiat Grande Punto te worden ingebouwd. Ondanks dat de afmetingen van het systeem het nog niet toelaten om al onder de motorkap te worden ingebouwd, willen de betrokken partijen nu ervaring opdoen met de integratie van een sorptiekoeler in het koelwatercircuit van een verbrandingsmotor van een auto. Met dit on-board prototype moet het mogelijk worden om onder dynamische rijcondities te testen, de interactie tussen koeler en motor nader te bestuderen, en natuurlijk vast te stellen of de vereiste koeling van de cabine wordt geleverd en de beoogde besparingen op brandstofgebruik worden gehaald.

Omdat het volume van het on-board prototype nog te groot is om onder de motorkap te worden ingebouwd, zal in de huidige fase de kofferbak van de testauto nog worden gevuld met het adsorptiekoelsysteem. Voor uiteindelijke grootschalige toepassing van deze technologie in een auto moeten nog wel een aantal ontwikkelstappen worden doorlopen, om de technologie nog verder terug te brengen in volume en ook de opbouw van de systemen te vereenvoudigen. Ideeën hiervoor hebben betrekking op de ontwikkeling en toepassing van luchtgekoelde condensator en verdampers en het toepassen van een nieuwe generatie warmtewisselaars met een coating van silicagel daarop. Ook de ontwikkeling van verbeterde adsorptie materialen, met een hogere opname capaciteit voor water kan positief bijdragen. Een toekomstbeeld staat in Figuur 5.1 geschetst.

Daarnaast heeft het project tot nu toe al geleid tot verbeteringen in adsorptiekoelsystemen die de weg kunnen openen naar andere stationaire toepassingen zoals kleinschalige trigeneratie.



Figuur 5.1 *Impressie van een adsorptiekoelsysteem als airconditioning geïntegreerd onder de motorkap van een personenauto*