

Adsorptiewarmtepomp voor duurzame verwarming en koeling in de bestaande bouw

—

Onderzoek en ontwikkeling van systeemaspecten voor toepassing in een realistische gebruiksomgeving

Openbaar eindrapport

TKI project, nr. TEGB214003



UNIVERSITEIT TWENTE.

Inhoudsopgave

1	GEGEVENS PROJECT	3
2	ACHTERGROND EN PROJECTDOELSTELLING	4
2.1.1	<i>De uitdaging: energiezuinige verwarming van bestaande woningen</i>	4
2.1.2	<i>De Cooll carbon-ammonia adsorptiewarmtepomp.....</i>	5
2.1.3	<i>Projectdoelstelling.....</i>	6
3	BEHAALDE RESULTATEN, KNELPUNTEN EN PERSPECTIEF VOOR TOEPASSING	7
3.1.1	<i>Dakdoorvoer, kanaalsysteem, luchtkoeler, ontdooicyclus</i>	7
3.1.2	<i>Gas heater.....</i>	8
3.1.3	<i>Fabricage adsorptiecompressor array</i>	9
3.1.4	<i>Tests in de warmtepomp</i>	9
4	BIJDRAGE AAN DE DOELSTELLINGEN VAN DE REGELING	10
5	SPIN-OFF	10
6	PUBLICATIES	10

1 Gegevens project

Projectnummer: TEGB214003
Projecttitel: Adsorptiewarmtepomp voor duurzame verwarming en koeling in de bestaande bouw – Onderzoek en ontwikkeling van systeemaspecten voor toepassing in een realistische gebruiksomgeving
Penvoerder: Cooll Sustainable Energy Solutions B.V.
Hengelosestraat 298A
7521 AM Enschede
tel: 053-7890623
info@cooll.eu
Contactpersoon: Dr.ir. Johannes Burger
Mede-aanvragers: BDR Thermea, Kanaal Zuid 106, 7332 BD Apeldoorn
Muelink & Grol, Duinkerkenstraat 27, 9723 BP Groningen
Total Support Group, Furkapas 8, 5624 MD Eindhoven
Universiteit Twente, Drienerlolaan 5, 7522 NB Enschede
Projectperiode: 1-10-2014 t/m 31-12-2017
Datum van publicatie: 30-6-2018

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Subsidieregeling energie en innovatie (SEI), Topsector Energie, uitgevoerd door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

2 Achtergrond en projectdoelstelling

2.1.1 De uitdaging: energiezuinige verwarming van bestaande woningen

Ruimteverwarming. Met ruim 40 GJ maakt ruimteverwarming het grootste deel uit van het huishoudelijk energieverbruik in Nederland. De grootste besparingen op ruimteverwarming zijn te halen in bestaande woningen. Deze hebben gemiddeld een veel grotere warmtevraag dan nieuwbouw en vormen bovendien de komende tientallen jaren nog steeds het overgrote deel van de woningvoorraad. Op dit moment vormt de vervangingsmarkt 90% van de totale Nederlandse markt van 460.000 CV-ketels per jaar.

Nieuwbouw. In de nieuwbouw wordt een lage warmtevraag in de eerste plaats bereikt door goede isolatie van de woningen. Die lage warmtevraag maakt het vervolgens mogelijk om lage temperatuur vloerverwarming toe te passen. En dat maakt het weer mogelijk om bijvoorbeeld elektrische warmtepompen te gebruiken, die onder die omstandigheden de toch al vrij geringe warmtevraag met een relatief lage CO₂ uitstoot kunnen opwekken.

Bestaande bouw. Toepassing van volledig elektrische warmtepompen in bestaande woningen vragen grote aanpassingen voor: 1) isolatie van de woning (altijd goed!); 2) ontsluiting van de warmtebron (meestal een bodembron) en 3) het CV-afgiftesysteem om de afgifte bij een lage temperatuur (vloerverwarming) mogelijk te maken. Elektrische warmtepompen functioneren om fundamentele redenen namelijk slecht bij een hoge temperatuurlift (= temperatuursverschil van buitentemperatuur naar CV-temperatuur). Zonder deze kostbare aanpassingen zijn elektrische warmtepompen in bestaande woningen daarom vaak geen CO₂ besparend alternatief voor de HR ketel. In de discussie over het loskoppelen van bestaande woningen van het gasnet wordt vaak aan deze feiten voorbijgegaan. Bovendien vraagt toepassing van volledig elektrische warmtepompen in bestaande woningen om grote aanpassingen in het bestaande elektriciteitsnet vanwege het benodigde extra elektrische vermogen. Dit betekent dat er feitelijk voor de grootste groep woningen in Nederland geen serieus CO₂ besparend alternatief is voor de HR ketel, afgezien dan van 1) relatief dure micro-WKK oplossingen; 2) hybride warmtepompen die in de Nederlandse situatie maar beperkt CO₂ besparen; 3) situaties waarin geschikte warmtenetten beschikbaar zijn.

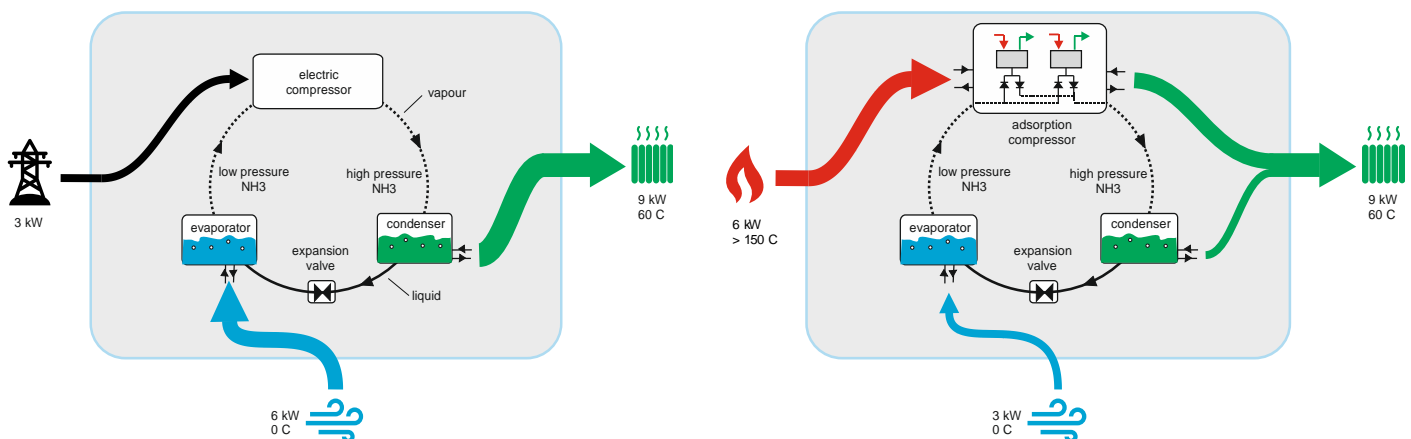
Sorptiewarmtepompen. Sorptiewarmtepompen zijn in principe beter geschikt voor toepassing in bestaande woningen doordat deze minder prestatieverlies lijden bij hogere afgiftetemperaturen (nodig bij bestaande radiatoren) en lagere brontemperaturen (bij gebruik van buitenlucht, in de bestaande bouw een gemakkelijker toe te passen warmtebron dan de bodem). Op de markt beschikbare ab- en adsorptiewarmtepompen zijn echter voor toepassing in woningen veel te groot in vermogen, afmetingen en gewicht. De innovatieve technologie van Coolt lost deze problemen op doordat hiermee een efficiënte adsorptiewarmtepomp (AWP) kan worden gerealiseerd in een licht en compact systeem, dat op termijn tegen een lage kostprijs te maken moet zijn. Hiermee komt een redelijke terugverdientijd en dus grote markt-acceptatie en bijbehorende CO₂ besparing binnen bereik. Gaswarmtepompen hebben in de jaren 90 al eens de naam Super Rendement (SR) ketel gekregen, als toekomstige opvolger van de Verbeterd Rendement (VR) en Hoog Rendement (HR) ketels; ze zijn tot nu toe echter nooit doorgebroken omdat er geen geschikte technologie bestond.

Verduurzaming via het gasnet. De adsorptietechnologie uit dit project kan daarmee een grote impuls geven aan verduurzaming via het gasnet. In combinatie met het vergroenen van het gasnet (biogas en synthetisch gas), toekomstige Power to Gas oplossingen (productie van waterstof uit elektriciteitsoverschotten), seizoensbuffering via het gasnet en een efficiënter gebruik van gas voor verwarming geeft dit de bestaande gasnetten in West-Europese en Aziatische landen een unieke kans om één van de pijlers te worden in de energietransitie.

2.1.2 De Cooll carbon-ammonia adsorptiewarmtepomp

De cyclus. Een adsorptiewarmtepomp bevat een vergelijkbare continue cyclus als een elektrische warmtepomp. Compressie van het koudemiddel vindt nu echter plaats met een door warmte aangedreven adsorptiecompressor in plaats van een elektrisch-mechanische compressor, zie Figuur 1. De benodigde warmte is hierbij afkomstig uit een (bio)brandstofgestookte heater.

Een adsorptiecompressor bestaat uit twee losse adsorptiecompressor vaatjes gevuld met actieve kool (door ons adsorptiecompressor arrays genoemd) die cyclisch worden verwarmd en afgekoeld; een complete cyclus duurt ongeveer 6 minuten. Tijdens verwarming van zo'n vaatje (tot temperaturen boven 150 °C) wordt het koudemiddel uit het adsorptiemateriaal geperst en via een passief ventiel naar de hogedruk zijde van de warmtepomp geleid. Het koudemiddel condenseert in de condensor en geeft zijn warmte op bijv. 60 °C af aan de verwarming waarna de druk wordt verlaagd door het expansie ventiel. Het koudemiddel verdampt weer in de verdampers bij lage temperatuur (bijv. 0 °C) en neemt daar warmte op uit de koude omgeving. Daarna gaat het koudemiddel via een passieve klep naar het andere vaatje dat op de begintemperatuur staat (bijv. 60 °C) waarbij het koudemiddel weer aan het adsorptiemateriaal wordt geadsorbeerd. Na enkele minuten draait de functie van de twee vaatjes om, en zo wordt een continu-proces mogelijk.



Figuur 1. Vergelijking tussen een warmtepompcyclus met elektrische (links) en adsorptie-compressor (rechts).

De innovatie. Deze adsorptiewarmtepomp basis-cyclus is reeds lang bekend in de wetenschappelijke literatuur, maar het rendement van deze cyclus was tot nu toe te laag voor een economisch rendabel systeem. Het team achter Cooll heeft ontdekt dat het rendement sterk verbeterd kan worden door hergebruik van een gedeelte van de warmte die wordt gebruikt om de vaatjes op te warmen. Het rendement van de basis-cyclus verdubbelt zo door gebruik te maken van Cooll's innovatieve 'thermal wave heat regeneration', waar het compressorontwerp van Cooll op is afgestemd en geoptimaliseerd met hulp van nog enkele innovaties. De combinatie van deze uitvindingen vormt de technologie waar Cooll aan werkt; de technologie is intussen door meerdere patenten beschermd. De werking van het concept is in de afgelopen jaren aangetoond met een aantal proof of principle warmtepompen.

Generieke oplossing. Deze thermisch aangedreven warmtepomptechnologie is een generieke conversietechnologie waarmee het energieverbruik en de CO₂-uitstoot voor verwarming met een factor anderhalf tot twee kan worden gereduceerd door het (thermodynamisch) slimmer benutten van de verbrandingswarmte uit fossiele of hernieuwbare brandstoffen. Dit in vergelijking met de huidige situatie waarin de verbrandingswarmte van brandstoffen in ketels rechtstreeks wordt gebruikt voor verwarming. In principe zijn alle soorten brandstoffen in combinatie met de technologie toepasbaar: gasvormig (aardgas, biogas, groen synthetisch gas, waterstof), vloeibaar ((bio)olie, propaan, etc.) en vast (hout, pellets).

Gaswarmtepomp. Cooll en haar partners werken aan een eerste toepassing als gaswarmtepomp. Dit is een potentiële opvolger voor de HR ketel in de bestaande bouw want:

1. Door het lage gewicht is het systeem geschikt voor binnenplaatsing, de afmetingen zijn vergelijkbaar met die van een grote HR ketel.
2. De warmtepomp kan buitenlucht als warmtebron gebruiken (er is dus geen bodembron nodig).
3. Hij kan worden aangesloten op traditionele hoge temperatuur (HT) radiatoren.

Per jaar kan ongeveer 30% gas (en CO₂ uitstoot) worden bespaard in een gemiddelde woning met normale hoge temperatuur radiatoren, en minimaal 40% in een woning met lage temperatuur (LT) verwarming. Deze besparing is aangetoond met de 'Works like real' proof-of-principle gasgestookte warmtepomp in het lab van Cooll, inclusief de bijbehorende dakdoorvoer waarmee warmte uit de buitenlucht wordt onttrokken.

Zon-aangedreven koeling als optie. De technologie kan ook worden toegepast voor zon-thermisch aangedreven koeling. Dit is een logisch concept: in warme klimaten valt de koelbehoefte (per dag en seizoen) samen met een grote instraling van zonne-energie. Door deze zonne-energie via een zonnecollector op te vangen en direct te koppelen aan een koelsysteem is er geen energie-transport nodig, geen energieopslag, en zijn er nauwelijks omzettingsverliezen. Economische toepassing voor koeling wordt op termijn met name interessant als dezelfde sorptiewarmtepomp wordt gecombineerd in één systeem voor zon-aangedreven koeling in de zomer en zeer efficiënte (bio-)brandstof aangedreven verwarming in de winter. Alle benodigde systeemcomponenten worden dan jaarrond optimaal benut. Deze toepassing is extra interessant voor landklimaten met koude winters en warme zomers.

2.1.3 Projectdoelstelling

De twee hoofddoelen van het project zijn:

1. Het door-ontwikkelen van de adsorptiewarmtepomp technologie richting een realistisch 'fits like real' productconcept. Hiervoor worden een aantal onderdelen en aspecten verder ontwikkeld:
 - Inpassing in de woning via kanaalstructuur en dakdoorvoer;
 - Bijbehorende geïntegreerde luchtkoeler (inclusief test-circuit);
 - Ontdooicyclus van de luchtkoeler;
 - Veiligheid;
 - Gas heater, geschikt voor hoge aandrijftemperaturen (> 150 °C);
2. Onderzoek en door-ontwikkelen van enkele cruciale stappen in de fabricage van de adsorptiecompressor array.

3 Behaalde resultaten, knelpunten en perspectief voor toepassing

3.1.1 Dakdoorvoer, kanaalsysteem, luchtkoeler, ontdooicyclus

De carbon-ammonia warmtepompcyclus van Cooll is zeer geschikt voor lage brontemperaturen. Eén van de uitgangspunten voor de baseline productconfiguratie van de adsorptiewarmtepomp (AWP) is daarom de keuze voor een luchtbron, die de technologie geschikt maakt voor toepassing in de bestaande bouw. Om deze luchtbron te ontsluiten is er in het baseline productconcept voor gekozen om de warmtepomp inclusief luchtkoeler binnen de woning te plaatsen en de buitenlucht door de woningschil naar binnen te halen. Voordelen hiervan zijn bijvoorbeeld: 1) plaatsing is relatief eenvoudig, er hoeft geen separate buitenunit geplaatst te worden (belangrijk in de bestaande bouw); 2) het ammoniak koudemiddelcircuit kan worden uitgevoerd als een intern (hermetisch) gesloten circuit dat geheel is omsloten door de naar buiten toe geventileerde behuizing (veiligheid); 3) de AWP met bijbehorende luchttoevoer/rookgasafvoer en kanaalsysteem en dakdoorvoer kan esthetisch ook aantrekkelijk worden uitgevoerd.

In een samenwerkingsverband tussen de projectpartners is gewerkt aan de ontwikkeling van de luchtkoeler, het kanaalsysteem en de dakdoorvoer. Hierbij zijn de volgende ontwerp-randvoorwaarden als uitgangspunt genomen:

- Functioneel:
 - Bevat aan-/afvoer kanalen om buitenlucht door te geleiden
 - Bevat losse luchtaanvoer/rookgasafvoer voor de heater(s) van de AWP
- Hydraulisch: Minimale drukval voor een minimale ventilator belasting (belangrijk voor minimalisatie van bijkomend elektriciteitsverbruik en geluid).
- Installatietechnisch: Het ontwerp maakt het mogelijk om goed gebruikt te kunnen worden door installateurs. Daarnaast ook toegankelijkheid voor onderhoud.
- Vochtbestendig: Het ontwerp is bestand tegen regeninslag en sneeuw.
- Afmetingen: Het ontwerp is passend bij de gekozen afmetingen van de gehele AWP.

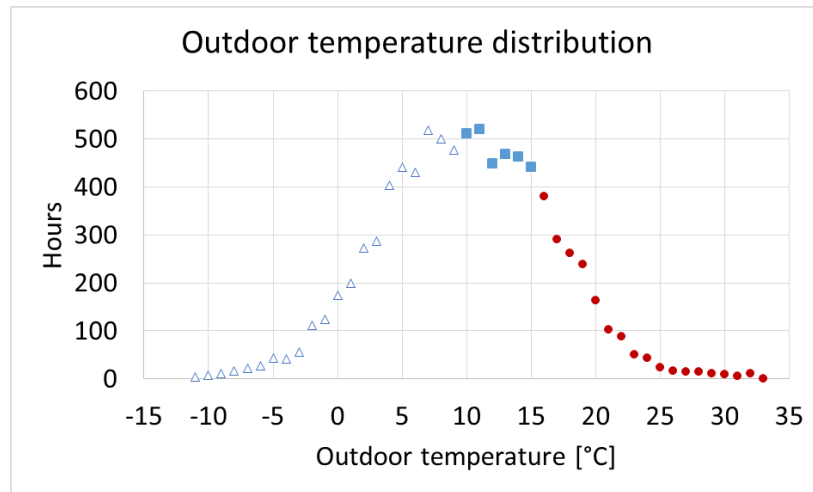
Er zijn in het project verschillende alternatieven voor de combinatie dakdoorvoer, kanaalsysteem en luchtkoeler vergeleken op bovenstaande randvoorwaarden. Er is een selectie gemaakt voor het meest veelbelovende concept, en er zijn prototypes gebouwd. Deze zijn in detail getest op alle bovenstaande criteria (inclusief metingen aan: hydraulische drukval, invloed van regen, geluid, elektrisch opgenomen vermogen, installatie-gemak, etc.). Uiteindelijk is een dakdoorvoer bij Cooll op het dak geplaatst, en in combinatie met het kanaalsysteem en de luchtkoeler beschikbaar om de warmtepomp in een realistische configuratie te laten draaien en zo de performance van de warmtepomp te karakteriseren.

Voor meer gecontroleerde metingen is het praktisch om niet alleen van de buitenlucht afhankelijk te zijn (lastig bij metingen in de zomer..), maar de luchtcondities qua temperatuur en relatieve vochtigheid ook gecontroleerd te kunnen instellen. Hiervoor is een passend luchtconditioneringssysteem (LCS) ontwikkeld waarin zowel de temperatuur als de luchtvochtigheid instelbaar is. Dit systeem kan naar wens in de plaats van de dakdoorvoer worden aangesloten op de luchtkoeler van de warmtepomp. Dit systeem heeft als functie om de afgekoelde en ontvochtigde lucht die uit de luchtkoeler komt weer op te warmen en te bevochtigen op de ingestelde temperatuur en vochtigheid. Het volledige ontwerp is hierbij toegesneden op de situatie en de wensen die horen bij de adsorptiewarmtepomp (inclusief cyclisch gedrag en bijbehorende conditioneringsbehoefte). Het resulterende systeem bevat de volgende onderdelen:

1. Bevochtiger (humidifer): deze heeft een bevochtigende en deels verwarmende functie.
2. Koeler en heater: deze koelen de lucht terug naar gesatureerde condities en verwarmen deze vervolgens naar de gewenste temperatuur- en vochtigheid-condities.
3. Mengschotten (baffles): deze schotten zorgen voor een mengende werking zodat er een luchtstroom ontstaat met homogene condities.
4. Diffusers: deze homogeniseren het snelheidsprofiel van de luchtstroom.

De keuze voor het gebruik van een luchtbron betekent ook direct dat er momenten zullen zijn dat er vocht uit de buitenlucht vastvriest op de verdamper. Deze berijping van de warmtewisselaar (die ook

voorkomt bij normale elektrische lucht-water warmtepompen) heeft een nadelig effect op de warmteoverdracht van lucht naar het koudemiddel, en zorgt ook voor een verhoogde drukval door de warmtewisselaar waardoor de ventilator zwaarder belast zal worden. Het is dus zaak om effectief met berijping om te gaan. In een belangrijk deel van het stookseizoen kan dit effect optreden; bij buitentemperaturen onder de 10 °C kan de verdampers in bepaalde situaties al een temperatuur onder het vriespunt krijgen. In onderstaande grafiek is te zien wanneer er in het Nederlandse klimaat een kans is op berijping. In de praktijk van de Cooll technologie komt berijping met name voor bij temperaturen tussen 0 en 5 °C (bij temperaturen onder het vriespunt bevat de lucht weinig vocht en bij temperaturen boven 5 °C is berijping veelal te voorkomen).



Figuur 2. Aantal uren in het stookseizoen met een vergrote kans op berijping (open blauwe driehoeken), aantal uren binnen het stookseizoen met kleine kans op berijping (dichte blauwe vierkanten) en aantal uren buiten het stookseizoen (dichte rode cirkels).

Voor de praktische inpassing van de ontdooi-cyclus is er een relatief eenvoudig mechanisme ontwikkeld, welke is ingebouwd in de huidige demonstrator warmtepomp. Experimenten met de warmtepomp (met luchtkoeler en LCS) hebben aangetoond dat deze ontdooicyclus effectief werkt.

De impact van de ontdooicyclus op het jaarronde energetische rendement van de technologie is uit te drukken door de benodigde ontdooi-energie te delen door de normale warmtestromen van de warmtepomp. Op basis van de metingen voorspellen we ongeveer 2% performance-reductie op de jaarronde gasbesparing (tov de referentie technologie, de HR-ketel).

3.1.2 Gas heater

De hoge-temperatuur heater dient de thermische aangedreven warmtepomp aan te drijven door middel van een heat transfer fluid met een temperatuur van boven de 150 °C. Hiervoor is een dedicated heater ontwikkeld die voldoet aan de zeer specifieke randvoorwaarden, en die functioneert onder verhoogde druk. Het thermische ontwerp van de heater is eerst los getest in een hoge temperatuur testinstallatie, waarbij ook thermoacoustische aspecten van het branderontwerp zijn aangepakt. Tevens zijn er barstdrukproeven gedaan. Verder is een functioneel prototype van een besturing en beveiliging (inclusief de bijbehorende hoge temperatuur sensoren) ontwikkeld, geprogrammeerd en getest. Uiteindelijk is de heater geïntegreerd in de Cooll adsorptiewarmtepomp.

Het cyclische gedrag van de warmtepomp resulteert in een cyclisch variërende vermogensvraag van deze hoge-temperatuur heater. Een goede dynamische systeembeschrijving is derhalve noodzakelijk om een regeling te realiseren die zo stabiel mogelijk de vraag naar heat transfer fluid van ruim 150 °C voorziet. Daarnaast is het voor de modelvorming van de warmtepomp bijzonder waardevol om over een accurate beschrijving van de heater te beschikken, die een realistische aanvoertemperatuur kan voorspellen. Een gemeten dataset is gebruikt om de verschillende parameters van het dynamische model te kunnen fitten. De gefitte modelbeschrijving is vervolgens gebruikt om de aansturing van de heater te optimaliseren.

3.1.3 Fabricage adsorptiecompressor array

In het project is voor het eerst het ontwerp van een full-size adsorptiecompressor array uitgewerkt. Twee van deze arrays kunnen de benodigde ammoniakflow voor het volledige vermogen van de adsorptiewarmtepomp leveren.

Als deelproject is onderzoek en ontwikkeling gedaan van enkele cruciale stappen in de fabricage van de adsorptiecompressor array. Dit betreft het integreren van de actieve kool in de individuele compressorcellen van de adsorptiecompressor array, en de processtappen voor het integreren van ongeveer 60 cellen met de headerplates tot één compressor array. Deze array is uiteindelijk in een parallel project met succes gefabriceerd en beschikbaar gekomen voor tests in de warmtepomp.

3.1.4 Tests in de warmtepomp

Integrale tests van de warmtepomp-technologie zijn met succes uitgevoerd in het eerdere TKI-1 project (TEGB113010). De volgende onderdelen van die experimenten zijn resultaat van dit project:

1. Testen van het luchtconditioneringscircuit.
2. Testen aan de luchtkoeler.
3. Testen van de ontdooicyclus
4. Testen aan de gasheater
5. (Duur)testen van de compressor arrays v4 (zie de vorige paragraaf).

De testen zijn met succes afgerond en hebben tot veel kennis geleid die van belang is voor de vervolgonwikkelingen.

4 Bijdrage aan de doelstellingen van de regeling

De adsorptiewarmtepomp technologie van Coolt voldoet goed aan de belangrijkste doelstelling van de programmaliijn: de warmtepomp maakt het mogelijk om de Primaire Energie uit fossiele of groene brandstoffen met een vermenigvuldigingsfactor van ongeveer 1.5 toe te passen in een praktisch inpasbaar systeem voor (HT) verwarming. Ten opzichte van een recent op de markt verschenen gaswarmtepomp voor buitenplaatsing is dit een concurrerend rendement. Bij toepassing van Lage Temperatuur verwarming en/of een grondbron stijgt het rendement richting 1.7, en in combinatie met zonnecollectoren en een buffervat kunnen nog hogere rendementen worden gehaald. Ook ten opzichte van op de markt beschikbare moderne elektrische warmtepompen zijn dit vanuit Primaire Energie en CO2 besparing gezien zeer concurrerende besparingsgetallen.

De technologie is geschikt voor toepassing in de bestaande bouw.

Toekomstige integratie van de technologie in één systeem voor zowel verwarming, ventilatie als koeling (in combinatie met thermische zonnecollectoren) kan op termijn een zeer energiezuinige conversietechnologie opleveren, zeker als de aandrijving in de winter via biobrandstoffen gebeurt. Dit sluit aan op de programma-doelstelling van zon-thermische innovaties.

Meerdere parallelle technologieën zijn nodig om de klimaatdoelen van 2050 te kunnen halen. Door de introductie van hoog-efficiënte gaswarmtepompen kan een (geheel of gedeeltelijk) vergroend gasnet een groter deel van de duurzame markt bedienen. Het is dus niet óf all-electric óf groen gas, maar de combinatie van beide, die hopelijk in de toekomst gekoppeld kunnen worden via power to gas.

5 Spin-off

Spin-offs binnen de Urban Energy sector zijn de eerder genoemde adsorptiewarmtepompen aangedreven door vaste of vloeibare (bio)brandstoffen voor toepassing als woningverwarming, en zon-aangedreven koeling. Buiten de Urban Energy sector kan gedacht worden aan actieve (proces)koeling op restwarmte, ook in de automotive en transportsector.

6 Publicaties

Publicaties zijn er op dit moment nog zeer beperkt, afgezien van een aantal octrooien. Publicaties zullen gedaan worden als de technologie aan een groter publiek wordt gepresenteerd, naar verwachting ergens in de komende jaren.