

Steam Compression Heat Pump

TNO 2024 R11673 – 20 September 2024

Steam Compression Heat Pump

Auteurs	S. Spoelstra
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	15 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	SPOT
Projectnummer	060.45272

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	4
2 Achtergrond en doelstellingen	5
3 Resultaten	6
4 Bijdrage aan de doelstellingen van de Topsector	10
5 Spin-off	13
6 Publicaties	14
Ondertekening	15

1 Inleiding

Dit project is uitgevoerd met behulp van subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, landelijke regeling EZ-subsidies, Topsector Energie, uitgevoerd door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).

Gegevens project

Project nummer	TIND120007
Project titel	Steam Compression Heat Pump
Coördinator en partners	TNO, Standard Fasel, SmurfitKappa
Project periode	01/10/2020- 31/03/2024

Contact- en beschikbaarheidsrapport

Kopieën van dit rapport zijn verkrijgbaar via de repository van openbare TNO-rapporten: <https://repository.tudelft.nl/tno/>.

Contactpersoon voor dit project is:

S. Spoelstra

E-mail: simon.spoelstra@tno.nl

2 Achtergrond en doelstellingen

Achtergrond

Industriële compressiewarmtepompen worden ontwikkeld op basis van synthetische of natuurlijke werkmedia. Belangrijkste reden hiervoor is de beperkte ontwikkeling die nodig is om compressoren uit de industriële koeltechniek geschikt te maken voor toepassing in industriële warmtepompen. De ontwikkeling van de eerste generatie industriële warmtepompen nadert zijn voltooiing. Echter, het gebruik van synthetische of natuurlijke werkmedia kent nadelen, met name de (mogelijke) milieubelasting van synthetische werkmedia en de brandbaarheid van natuurlijke werkmedia. Water als werkmedium ondervangt voornoemde nadelen en zou zelfs rendement- en investeringsvoordelen kunnen opleveren omdat de geproduceerde stoom direct in het industriële proces ingezet kan worden.

Probleemstelling

Water lijkt het ideale werkmedium, echter, technisch is de toepassing uitdagend:

- Bij een typische restwarmte temperatuur van $\sim 60^{\circ}\text{C}$ is de verwachte dampdruk $\sim 0,2$ bara met een dichtheid van $\sim 0,13 \text{ kg/m}^3$ en een specifieke verdampingswarmte van $\sim 2.360 \text{ kJ/kg}$. Dit betekent dat er een systeem nodig is wat onder vacuüm, met risico van inlek van niet-condenseerbare gassen, grote volumestromen moet kunnen hanteren.
- Op dit moment bestaan er geen smeermiddelen die in combinatie met water goed functioneren. Bovendien moet de geproduceerde stoom olievrij zijn omdat het industriële proces de condensor van de warmtepomp vormt. Dit betekent dat er olievrije compressoren nodig zijn.
- De maximaal haalbare drukverhouding van één compressor is circa 6. Om vanuit de beoogde zuigdruk ($\sim 0,2$ bara) stoom te produceren die voor de industrie bruikbaar is (minimaal 2 bara) zijn twee compressoren nodig waarvan er ten minste één in vacuüm kan werken.

Doelstelling

Het doel van dit project is om te onderzoeken of een Steam Compression Heat Pump (SCHP) technisch en economisch haalbaar is. De technische haalbaarheid wordt onderzocht door middel van de ontwikkeling, bouw en beproeving van een bench scale prototype ($\sim 250 \text{ kWth}$; uit) van de SCHP. Vanuit de bench scale is het mogelijk om in een vervolg project in één keer door te ontwikkelen naar een pilot op industriële schaalgrootte ($\sim 2 \text{ MWth}$; uit). De economische haalbaarheid wordt bepaald door de technische prestaties te relateren aan de economische voordelen en de benodigde investering.

3 Resultaten

Ontwerp en bouw stoomcompressiewarmtepomp

De geteste stoomcompressiewarmtepomp is een zogenaamde semi-open cycluswarmtepomp. Een stoomcompressiewarmtepomp met open cyclus zou lagedrukstoom uit een industrieel proces gebruiken en deze rechtstreeks comprimeren tot stoom onder hogere druk en deze terugvoeren in het proces. Een halfopen cyclus gebruikt restwarmte (meestal in de vorm van een vloeistof) om stoom onder zeer lage druk (vacuüm) te produceren in een warmtewisselaar/ketel. Deze stoom wordt vervolgens tot een hogere druk gecompriemd en teruggeleid.

Integratie van stoomcompressiewarmtepomp met test rig

De testopstelling om metingen uit te voeren aan een stoomcompressiewarmtepomp bestaat uit twee units. De eerste unit is de testopstelling die de randvoorwaarden bepaalt waaronder de stoomcompressiewarmtepomp functioneert. Dit betekent dat zowel restwarmtetemperatuur als stoomdruk/temperatuur vanuit deze unit wordt opgelegd aan de warmtepomp. De tweede unit is de eigenlijke stoomcompressorwarmtepomp.

De testopstelling is ontworpen voor warmtepompen met een maximaal thermisch vermogen van circa 300 kWth. De testopstelling kan gesloten cyclus warmtepompen, semi-open warmtepompcycli en mechanische damprecompressiesystemen testen. Het systeem bestaat uit een buffertank die de restwarmte op de gewenste temperatuur levert en het voedingswater voor de stoomproductie. De stoom die door de warmtepomp wordt geproduceerd, wordt naar een stoomvat gevoerd en de geproduceerde stoom wordt teruggeleid naar de buffertank. Eventuele overtollige warmte wordt met een koeler uit de buffertank verwijderd.



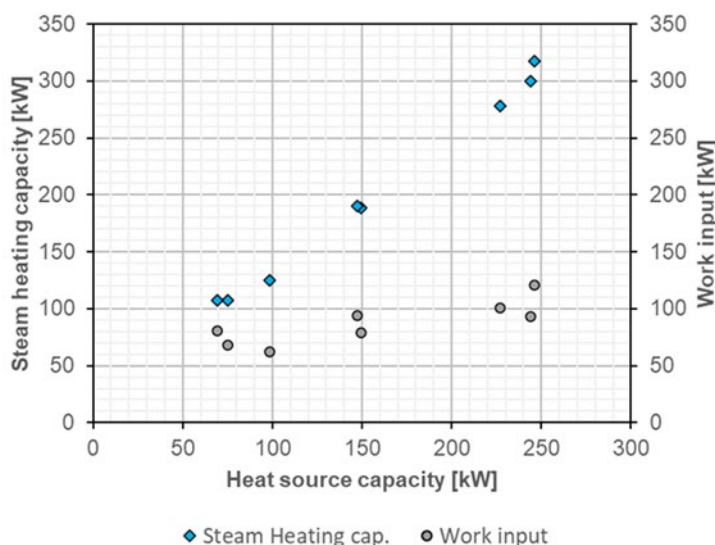
Experimentele resultaten

De meetpunten van de testcampagne bestaan uit het variëren van zowel de restwarmtetemperatuur als de temperatuur van de geproduceerde stoom. Bij de restwarmtekanal wordt de temperatuur van de vacuümboiler (VB) als referentie gebruikt. Deze temperatuur ligt enigszins lager dan de restwarmtetemperatuur die vanuit de test rig wordt aangeboden. De experimentele condities zijn weergegeven in Tabel 1. Al deze experimenten zijn uitgevoerd bij volledige belasting. De termen TvbA, TvbB en TvbC geven de temperatuurniveaus aan en worden in Figuur 2 gebruikt.

Tabel 1 Test condities voor het SChP experimentele programma

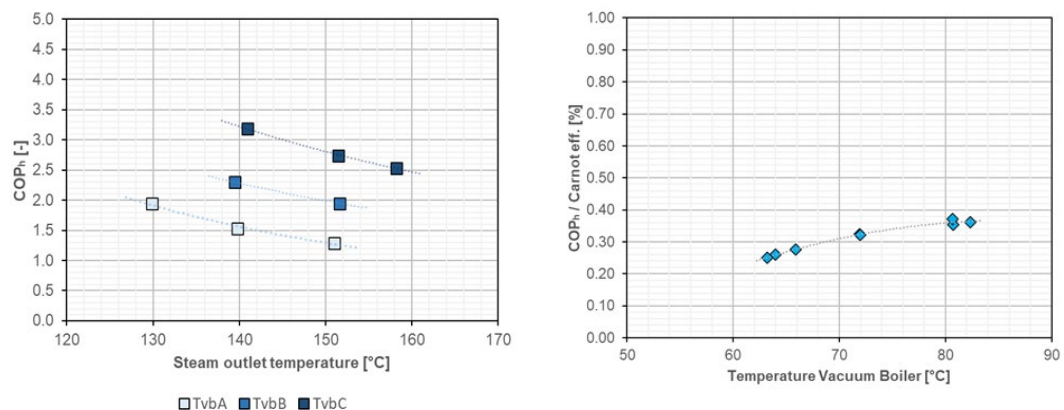
Bron (vacuüm boiler) temperatuur (°C)	Put (stoom) temperatuur (°C)
60 (TvbA)	130, 140, 150
70 (TvbB)	140, 150
80 (TvbC)	140, 150, 160

De gemeten vermogens geven een indruk van de grootte van de warmtepomp. Figuur 1 toont zowel de thermische vermogens aan bron- en proceszijde alsmede het benodigde elektrische vermogen. Het gegenereerde stoomvermogen varieert van 107 tot 317 kW. Het maximale stoomvermogen bedroeg 317 kW en werd gemeten onder een vacuüm boiler temperatuur van 82,3°C (0,5 bara) en een stoomtemperatuur van 158,2°C (5,9 bara).



Figuur 1 Thermische en elektrische vermogens van de stoomcompressiewarmtepomp

Om de prestaties van de warmtepomp te beoordelen, is de Coefficient of Performance (COP) van het systeem berekend en geëvalueerd. De COP van het systeem varieerde van 1,3 tot 3,2, zie Figuur 2, linkerzijde. Duidelijk is dat hogere vacuüm boiler temperaturen tot hogere COPs leiden. De rechterkant van Figuur 2 toont ook de COP vergeleken met de Carnot-efficiëntie (maximaal haalbaar theoretisch rendement). Deze relatieve efficiëntie varieert van 25% tot 37%. Het laagste rendement werd geregistreerd bij een VB-temperatuur van 60°C en een stoomtemperatuur van 150°C, terwijl het piekrendement optrad tijdens testen bij 80°C VB en 140°C stoom, met de laagste temperatuurlift van 46 K.



Figuur 2 Links: COP bij 3 verschillende vacuüm boiler temperaturen als functie van stoomtemperatuur. Rechts: COP ten opzichte van Carnot als functie vacuüm boiler temperatuur.

Business case

De gemeten karakteristieken en de kosten van de stoomcompressiewarmtepomp zijn gebruikt om business cases te ontwikkelen. Deze zijn opgesteld voor verschillende temperaturen van de restwarmtestroom, voor het gemiddelde prijsniveau van 2023 en voor lage en hoge prijsniveaus in 2030 zoals gepresenteerd in de Klimaat en Energieverkenningen 2023. Hierbij is ook een verbeterde en een opgeschaalde versie van de stoomcompressiewarmtepomp bekeken. Tenslotte is gebruikt gemaakt van operationele informatie van SmurfitKappa om een case te ontwikkelen waarbij de restwarmte bestaat uit een luchtstroom die uit de droogsectie van een papierfabriek komt. Daarbij is een concept geanalyseerd dat in de volledige warmtebehoefte van deze droogsectie kan voorzien. Dit concept bestaat uit een cascade van een ammoniak warmtepomp en een stoomcompressie warmtepomp. Dit systeem levert circa 18 MW stoom.

De business cases laten -niet verrassend- zien dat de opstelling zoals beproefd bij TNO in Petten economisch niet aantrekkelijk is om in te zetten. Echter als we kijken naar de cases voor een verbeterde en opgeschaalde versie van de stoomcompressiewarmtepomp, zien we aantrekkelijke terugverdientijden tussen 2,4 en 5,3 jaar ten opzichte van een gasgestookte boiler. De cascadering van een NH₃ warmtepomp en een stoomcompressiewarmtepomp leidt ook tot aantrekkelijke terugverdientijden tussen 2,6 en 6,0 jaar, dit ondanks de het grote temperatuurverschil. De verminderde prestaties door het grote temperatuurverschil worden gecompenseerd door de grotere schaalgrootte met een lagere investering per geleverde MW.

Conclusies

De ontwikkelde stoomcompressiewarmtepomp is in staat stoom (100 tot 320 kWth) te produceren onder uiteenlopende omstandigheden: de vacuümboilertemperatuur varieerde tussen 60 en 90°C (bronzijde) en de gegenereerde stoom tussen de 130 en 160°C met een COP in de orde van 1,5 tot 3,5, afhankelijk van de temperatuurlift. De efficiëntie ten opzichte van het maximale Carnot-rendement bedraagt 20 en 40%. Dit zijn bemoedigende resultaten voor een eerste prototype. De compressoren die worden toegepast zijn oorspronkelijk niet ontworpen voor stoomcompressoren maar gemodificeerde luchtcompressoren.

De business-case-analyses laten zien dat verdere opschaling en verbetering van prestaties nodig is om tot een positieve business case te komen. Ook biedt een cascade concept,

waarbij lagere temperaturen restwarmte kunnen worden gebruikt, aantrekkelijke mogelijkheden.

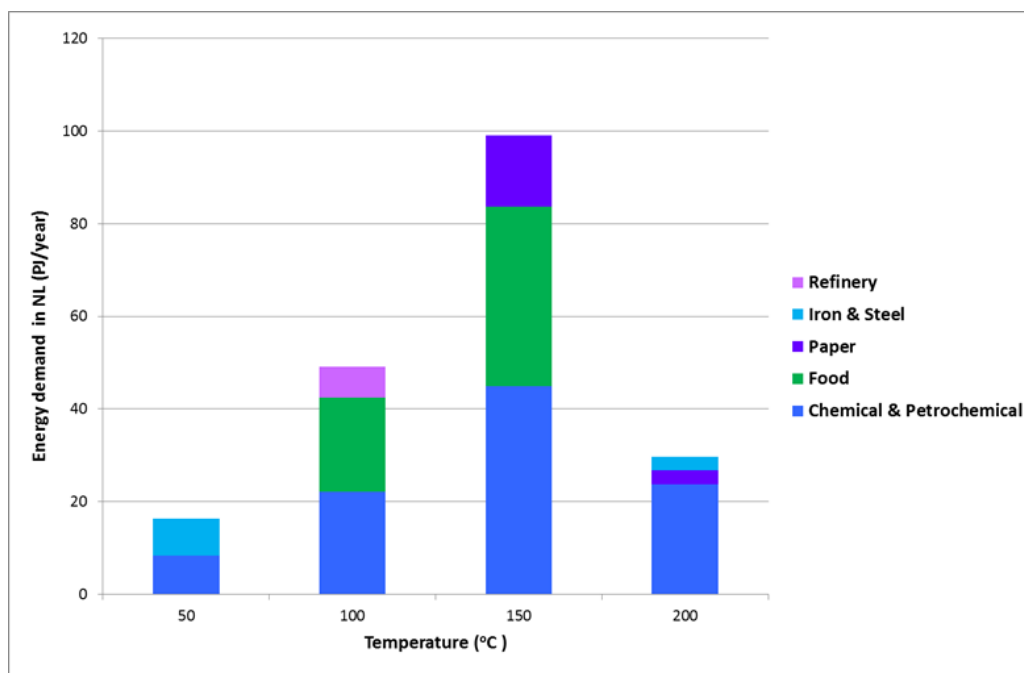
De daadwerkelijke opstelling is een laboratorium prototype en nog niet op MW-schaal. De opschaling van de warmtepomp kan relatief eenvoudig worden gerealiseerd door de vacuümboiler en de compressoren te vergroten. Een andere optie zou het toevoegen van verdere compressietrappen kunnen zijn. Voor dit prototype zijn verschillende potentiële verbeteringsopties geïdentificeerd, waaronder het aanpakken van lekkages van as-afdichtingen en het verminderen van thermische verliezen.

4 Bijdrage aan de doelstellingen van de Topsector

De Topsector Energie heeft twee doelstellingen: bijdragen aan de transitie naar een CO₂-arme energiesysteem en versterken van de internationale concurrentiepositie.

Duurzame energiehuishouding

De boogde warmtepomp ontwikkeling in dit project is gericht op opwaardering van warmte van minimaal 60°C tot maximaal circa 150°C (≈ 5 bara). Deze leveringstemperaturen komen voor in met name de voedingsmiddelen- en papierindustrie, maar ook in chemie. Figuur 3 geeft de warmtebehoefte weer in de NL industrie voor verschillende sectoren als functie van het temperatuurniveau tot een temperatuur van 200°C. De energiebehoefte voor de warmtevraag op 150°C is circa 100 PJ/jaar in Nederland.



Figuur 3 Warmtebehoefte in NL industrie als functie van temperatuur tot 200°C

Tegelijkertijd moet er restwarmte van voldoende temperatuurniveau aanwezig zijn. Informatie over de gelijktijdige beschikbaarheid van restwarmte van voldoende temperatuurniveau is alleen op procesniveau aanwezig en niet op sectorniveau. Hieronder wordt er vanuit gegaan dat er voldoende restwarmte op het gewenste temperatuurniveau aanwezig is om in de warmtebehoefte te voorzien.

Teneinde de energiebesparing uit te rekenen, worden de volgende aannames gedaan:

- In de referentiesituatie wordt een gasgestookte gasboiler gebruikt met een rendement van 85%. Dit betekent dat de energievraag van 100 PJ een warmtevraag van 85 PJ representeert.
- De elektriciteit, die nodig is voor de warmtepomp is, wordt opgewekt met een rendement van 81,1% ¹. Dit geeft de omzetting van fossiele energiedragers naar elektriciteit aan en houdt dus rekening met het grote aandeel duurzame elektriciteit in de elektriciteitsmix.

De prestatie van de warmtepomp is afhankelijk van de temperatuurcondities van de toepassing, zoals ook in de metingen is bevestigd. Uit de analyse van de metingen blijkt ook dat de prestatie nog sterk kan worden verbeterd. Voor deze analyse gaan we uit van een gemiddelde COP van 3.

In de referentiesituatie is er 100 PJ aardgas nodig voor de 85 PJ warmtebehoefte. De warmtepomp kan in dezelfde warmtebehoefte voorzien door inzet van 28,3 PJ elektriciteit. De fossiele energiebehoefte voor deze elektriciteitsbehoefte is 35 PJ. De besparing op fossiele energie bedraagt dus 50 PJ/jaar voor de NL industrie. Deze besparing neemt toe met toenemende verduurzaming van het elektriciteitssysteem en zal bij volledige duurzame elektriciteit uiteindelijk 100 PJ bedragen.

De CO₂-emissiereductie wordt uitgerekend met de volgende aannames:

- Emissiefactor van aardgas is 56,6 kg CO₂/GJ
- Emissiefactor van elektriciteit in het huidige systeem is 0,27 kg CO₂/kWh¹, corresponderend met 75 kg/GJ elektriciteit.

De huidige emissie op basis van een aardgas gestookte boiler is 5,7 Mton/jaar. De CO₂-emissie, voortkomend uit de elektriciteitsproductie, van de warmtepomp variant is 2,1 Mton/jaar. De emissiereductie voor het huidige elektriciteitssysteem bedraagt dus 3,6 Mton/jaar. Deze reductie neemt toe met toenemende verduurzaming van het elektriciteitssysteem. Het PBL geeft voor 2030 een CO₂-emissiefactor van elektriciteit van 0,07 kg/kWh². Op basis van dit getal resulteert een CO₂-emissie voor de warmtepomp van 0,55 Mton/jaar, corresponderend met een reductiepotentieel van 5,1 Mton/jaar in 2030. Een situatie met volledige duurzame elektriciteit geeft een reductie van 5,7 Mton/jaar.

Internationale concurrentiepositie

Markt

Zoals eerder aangegeven bestaat de beoogde markt voor deze ontwikkeling met name uit de voedingsmiddelen-, de papier- en de chemische industrie. Omdat de procesvoering van dit type processen overal vergelijkbaar is, geldt dit niet alleen voor deze sectoren in Nederland, maar eveneens voor Europa en wereldwijd. De energiebehoefte in deze sectoren op 150°C bedraagt momenteel 100 PJ/jaar in Nederland. Gebruikmakend van de informatie uit Figuur 3 en de omvang van deze sectoren in Nederland en Europa³ komt de EU energiebehoefte voor genoemde temperatuur uit op circa 1.700 PJ. De wereldwijde markt is vanzelfsprekend weer een orde groter. Uitgaande van een gemiddelde systeemgrootte van 5 MW_{th} bestaat de markt in de EU uit meer dan 10.000 systemen.

¹ CBS, CO₂-emissiefactor, fossiel energieverbruik en rendement voor elektriciteit bij gebruiker, integrale methode, cijfers 2022.

² PBL, Klimaat- en energieverkenning 2022, 2022

³ Dutch program for the Acceleration of Sustainable Heat Management in industry, ECN-E--17-083, April 2017.

De huidige markt voor stoombehoefte in de industrie wordt bediend door partijen die zich hebben gespecialiseerd in stoomketels en aanverwante apparatuur (appendages, leidingen, ...). Grote partijen zijn uit op het behouden van hun marktpositie en niet genegen tot grote veranderingen. Een warmtepompconcept vereist een andere benadering en een breuk met de gebruikelijke aanpak. Innovatieve, kleinere, bedrijven spelen sneller in op deze ontwikkelingen.

Standard Fasel is een speler die nu wereldwijd actief is op het gebied van heetwater en stoomketels. Het bedrijf is daarom goed bekend met de industriële stoommarkt. Middels de ontwikkeling die in dit project wordt beoogd, poogt Standard Fasel zich een positie te verwerven in een markt waarin stoom niet meer wordt geproduceerd met gasketels, maar met warmtepompen. Dit project geeft Standard Fasel de mogelijkheid een belangrijke speler te worden door combinatie van bestaande marktkennis en nieuwe technologie.

Innovatie

De eerste generatie industriële compressiewarmtepompen zijn gesloten systemen waarin een werkmedium een cyclus doorloopt en waarbij warmte via warmtewisselaars aan het systeem wordt toe- en afgevoerd. De SCHP heeft een half open cyclus waarin restwarmte, desnoods uit een vervuilende stroom, via een warmtewisselaar wordt teruggewonnen naar lage druk damp die na compressie direct als warmtevrager medium aan het proces wordt toegevoerd. Deze wijze van integratie van de warmtepomp met het proces is nieuw en het octrooi is gepatenteerd door Standard Fasel (EP 3653952 A1).

Het gebruik van water als werkmedium voor een warmtepomp is op zichzelf niet nieuw. Het meest sprekende voorbeeld is de mechanische damprecompressie zoals deze veelvuldig wordt toegepast op indampers. Wat de bestaande systeem gemeen hebben is dat er centrifugaal compressoren worden gebruikt. Een centrifugaal compressor met water als werkmedium heeft per waaier een beperkte drukverhouding -en daarmee temperatuurlift. Daarnaast zijn centrifugaal compressoren naar hun aard allen geschikt voor grote capaciteiten (meer dan tien (10) ton per uur) en zijn ze weinig flexibel, zowel in procescondities als qua capaciteit. In het SCHP project zijn water gesmeerde en -gekoelde constant displacement compressoren ontwikkeld die in staat zijn de benodigde hoge drukverhoudingen (tot ~6) te realiseren, goed regelbaar zijn en werken in de capaciteit range 2 tot 5 MW_{th,uit} waarin verreweg de grootste aantallen industriële warmtepompen worden verwacht. Deze ontwikkeling biedt kansen op verder versterking van de Nederlandse kennis en octrooipositie.

5 Spin-off

Vooruitkijkend zullen toekomstige studies zich verdiepen in de potentiële industriële procestoepassing van de stoomcompressiewarmtepomp. Momenteel overweegt Standard Fasel om een hoge temperatuur ammoniakwarmtepomp te integreren met het stoomcompressiesysteem. Uiteindelijk is het doel om een grootschalige demonstratie uit te voeren in samenwerking met startende klanten en overheidsfinanciering, waardoor de levensvatbaarheid en schaalbaarheid van de technologie in de echte industriële omgeving verder wordt versterkt.

6 Publicaties

- Een presentatie van dit project is gegeven tijdens een studiedag van het Stoomplatform, 24 November 2022.
- Ramirez, M., Otero, G., Scheepens, D., Weijer, G. van de, Spoelstra, S., *Development and testing of a Steam Compression Heat Pump for low-grade waste heat recovery*, Gepresenteerd bij Gustav Lorentzen conference on Natural Working Fluids, 11-14 August 2024, Washington.
- Dit publieke eindrapport kan worden gedownload uit de TNO bibliotheek, [Zoeken | TNO](#).

Ondertekening

TNO › Energy & Materials Transition › Petten, 20 september 2024

S. van Loo
Research Manager

S. Spoelstra
Auteur

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl