

Next generation compression heat pump

TNO 2024 R12159 – 14 november 2024

Next generation compression heat pump

Auteurs	S. Spoelstra
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	19 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	ENCORE
Projectnummer	060.34473

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	7
3.1 Randvoorwaarden en modellering	7
3.2 Werkmedia	10
3.3 Prestatie hoge-temperatuur warmtepomp	10
3.4 Dynamisch bedrijf van een industriële warmtepomp	11
3.5 Kosten van een full-scale warmtepomp	12
4 Bijdrage aan de doelstellingen van de Topsector	14
5 Spin-off	17
6 Publicaties	18
Ondertekening	19

1 Inleiding

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

Gegevens project

Project nummer	TEEI118001
Project titel	Next generation compression heat pump
Coördinator en partners	TNO, Recoy, Bronswerk, ISPT
Project periode	01/01/2019 - 30/06/2024

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

Aandacht voor warmte is nodig om de nationale doelstellingen op het gebied van energie-efficiëntie, duurzame energie en CO₂-emissiereductie te realiseren. Ruim 80% van het uiteindelijke industriële energieverbruik houdt verband met het gebruik van warmte (500 PJ in 2022). Een transitie naar een duurzaam energiesysteem is onmogelijk zonder een transitie van het industriële warmtesysteem. Het aandeel duurzame warmte in Nederland bedroeg in 2022 8,8%. Het aandeel hernieuwbare warmte in de industrie is verwaarloosbaar. Het is duidelijk dat er een grote uitdaging voor ons ligt.

Hergebruik en opwaardering van restwarmte wordt beschouwd als een belangrijke optie om het gebruik van fossiele energie door procesindustrieën te verminderen. Industriële warmtepompen worden als een veelbelovende optie beschouwd en winnen aan interesse uit de markt. De verwachting is dat industriële warmtepompen de komende jaren via demonstratieprojecten steeds meer geïntegreerd zullen worden in industriële processen. De technologie die wordt toegepast is meestal een Reverse Rankine of gesloten cyclus compressiewarmtepomp. Deze technologie komt voort uit de koeltechniek en is aangepast om te voldoen aan de eisen voor verwarmingstoepassingen. Ondanks de veelbelovende vooruitzichten zijn er nog steeds een aantal onderzoeks- en ontwikkelingsgebieden die het potentieel hebben om de technische kenmerken van deze systemen te verbeteren.

Probleemstelling

De huidige compressiewarmtepomptechnologie is beperkt wat betreft het werkingssbereik vanwege het gebrek aan kennis over de prestaties van deze systemen met nieuwe werkmedia. Omdat deze technologie gebaseerd is op koeltechnologie, is het concept bovendien nog niet volledig geoptimaliseerd met betrekking tot de prestaties in verwarmingstoepassingen. Er is weinig werk verricht om het volledige potentieel te benutten. Tenslotte zullen er, wanneer de compressiewarmtepomp een groter aandeel van de verwarmingsmarkt heeft verworven, vragen rijzen met betrekking tot de dynamiek van het systeem. Wanneer aardgasgestookte back-upketels afnemen, zullen de flexibiliteitseisen aan warmtepompsystemen toenemen. Naast deze technische problemen blijven de initiële investeringskosten nog steeds een probleem waarmee rekening moet worden gehouden bij de ontwikkeling van deze systemen.

Doelstelling

Met betrekking tot de prestaties van de warmtepomp die binnen dit project moeten worden bereikt, zijn de volgende doelstellingen gesteld:

- Vergroot de bedrijfstemperatuuromstandigheden van industriële warmtepompen door innovatieve werkmedia te overwegen. Het doel is om een leveringstemperatuur van >180°C en een temperatuurlift van >80°C te bereiken;

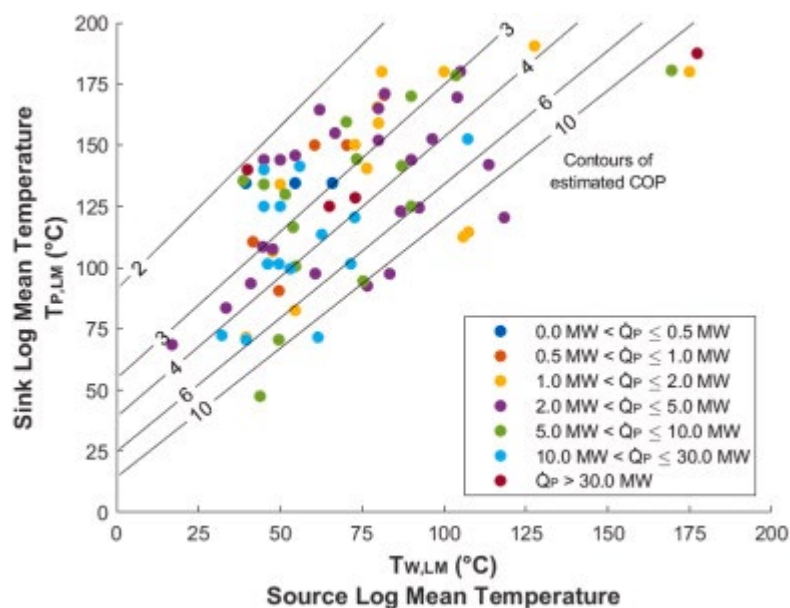
- Demonstreer een industriële warmtepomp als een flexibele technologie die in staat is te reageren op de veranderende vraag naar proceswarmte en temperaturomstandigheden. Het doel is om de jaarlijkse economische voordelen van dynamische respons te bepalen in k€ per MWth;
- Verlaag de kosten van industriële compressiewarmtepompen door verlaging van de CAPEX en een groter vermogen. Het doel is om een eenheidsprijs voor een compressiewarmtepomp te bereiken van < 200 k€ per MW warmteafgifte voor een industriële warmtepomp van 1-2 MWth, op basis van een volledig ontwerp en kostenberekening.

3 Resultaten

3.1 Randvoorwaarden en modellering

Dit projectdeel heeft tot doel mogelijke werkmedia en thermodynamische cycli te selecteren om aan de eisen van de industrie te voldoen. Meer specifiek wordt een selectiekaart voor compressiewarmtepompen afgeleid, in termen van de werkmedium en de cyclus configuratie als functie van de externe procesomstandigheden, voor de productie van stoom bij temperaturen tot 200°C. De nadruk ligt op maximale thermodynamische prestaties.

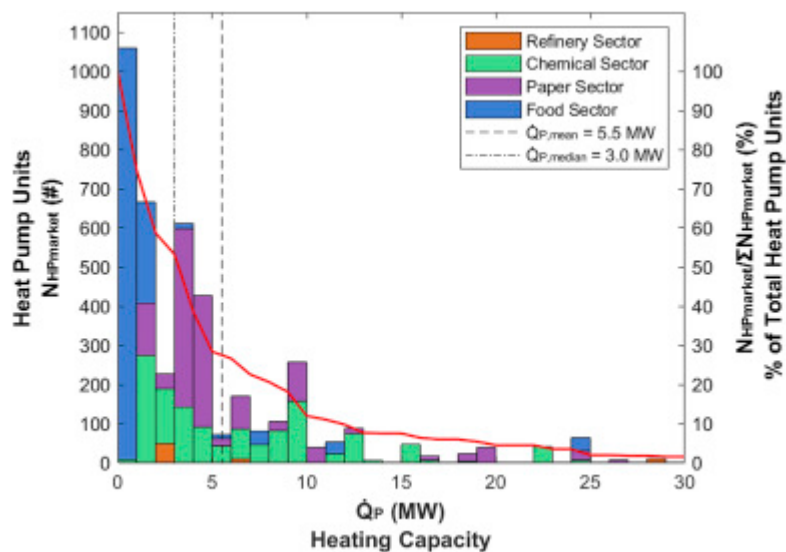
De bedrijfstemperatuur van huidige en toekomstige warmtepompen is gebaseerd op eerder onderzoek van TNO¹. In dit onderzoek zijn bottom-up procesgegevens verzameld tot een overzicht van mogelijke warmtepomptoepassingen in Europa. Figuur 3.1 toont de resulterende gegevens over temperatuurniveaus.



Figuur 3.1 Restwarmte- en procestemperaturen voor individuele warmtepomp toepassingen in EU-28

De conclusies uit deze figuur zijn dat de meeste brontemperaturen (afvalwarmte) onder de 100°C liggen en de meeste (maar niet alle) leveringstemperaturen (proceswarmte) tussen 100 - 200°C liggen. Een ander resultaat van hetzelfde onderzoek is de dimensionering van warmtepompen. Figuur 3.2 toont een histogram van de thermische capaciteiten van de individuele industriële warmtepompen. Conclusie uit deze figuur is dat de meeste warmtepompen een thermisch vermogen < 10 MW zullen hebben.

¹ Marina, A.J., Spoelstra, S., Zondag, H.A., & Wemmers, A.K. "An estimation of the European industrial heat pump market potential." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139 (2021): 110545



Figuur 3.2 Verdeling van verwarmingsvermogen (< 30 MW) van totale warmtepomp potentieel in EU-28

Op basis van een numeriek model zijn meer dan twintig werkmedia (zowel natuurlijk als synthetisch) en zes verschillende cyclus configuraties voor vier warmtecapaciteiten (0,5-5 MW), vier leveringstemperaturen (120-200°C) en vier temperatuurliften (40-100 K) doorgerekend. Hiermee wordt een groot deel van het gewenste operatievenster bestreken. In totaal zijn 80 combinaties van externe randvoorwaarden (vermogens, temperaturen) geëvalueerd.

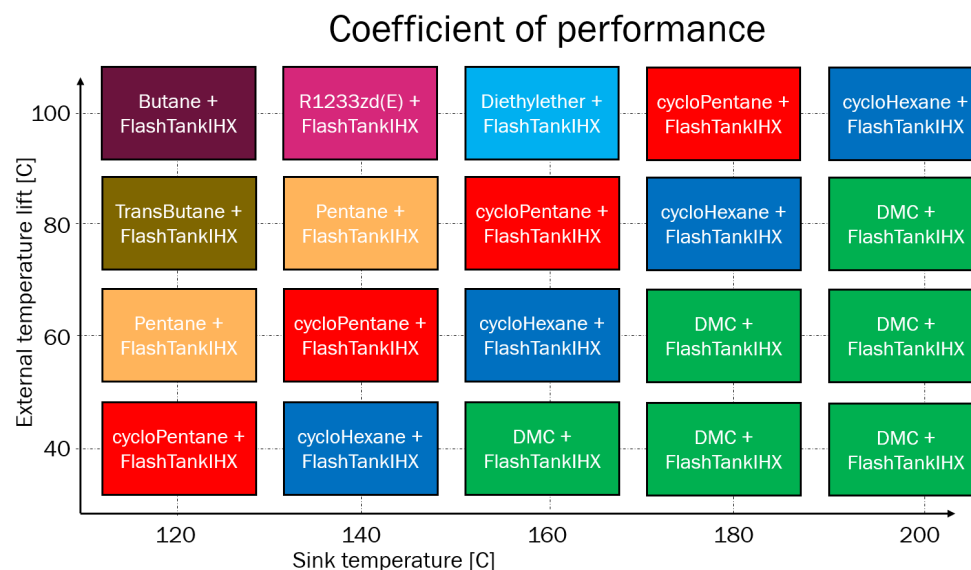
Tabel 3.1 geeft de lijst weer van alle onderzochte werkmedia (gesorteerd op hun kritische temperatuur). De meeste media in de lijst zijn in de literatuur genoemd/bestudeerd als mogelijke werkmedia voor hoge-temperatuurwarmtepompen. Andere media zijn toegevoegd vanwege hun mogelijke prestatiepotentieel bij hoge temperaturen (bijv. Dimethylcarbonaat, cyclohexaan, cyclopentane). Bepaalde combinaties van werkmedia en externe randvoorwaarden zijn buiten beschouwing gelaten omdat de condensatietemperatuur van de cyclus hoger is dan de kritische temperatuur van het werkmedium of als de verdampingsdruk van de warmtepomp lager is dan atmosferische druk.

Tabel 3.1 Lijst met mogelijke werkmedia

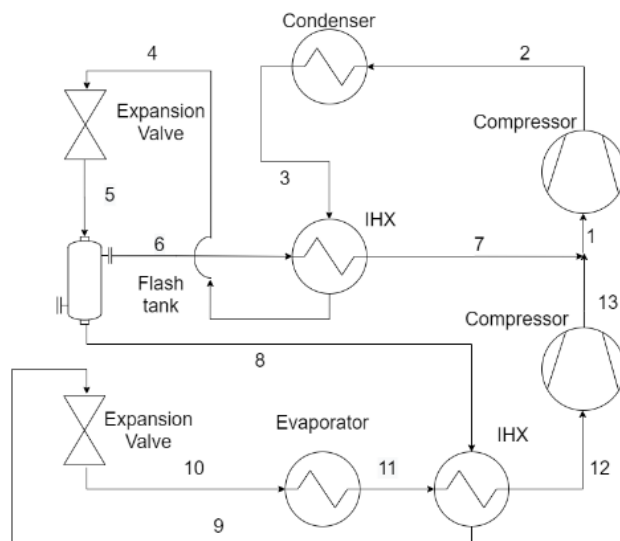
	Werkmedium	Type	Tcrit (°C)
1	Water	Natural	373.95
2	Dimethyl Carbonate (DMC)	Carbonate	283.85
3	Cyclohexane	HC	280.45
4	Methanol	HC	240.23
5	Cyclopentane	HC	238.57
6	Acetone	HC	234.95
7	Hexane	HC	234.67
8	Isohexane	HC	224.55
9	Pentane	HC	196.55
10	Diethyl Ether	Ether	193.55
11	Isopentane	HC	187.20

	Werkmedium	Type	Tcrit (°C)
12	R1336mzz(Z)	HFO	171.35
13	Novec 649, 1230		168.66
14	R1233zd(E)	HCFO	166.45
15	Neopentane	HC	160.59
16	R1224yd(Z)	HCFO	155.54
17	Trans-Butene	HC	155.46
18	Butane	HC	151.98
19	R1234ze(Z)	HFO	150.12
20	Butene	HC	146.14
21	Isobutene	HC	144.94
22	Isobutane	HC	134.66
23	Ammonia	Natural	132.41
24	Dimethyl ether	Ether	127.23
25	R1234ze(E)	HFO	109.36

Figuur 3.3 toont de resulterende selectiekaart voor de combinatie van werkmedium and cyclus configuratie, afhankelijk van de leveringstemperatuur en de externe temperatuurlift.. Een flashtank met interne warmtewisselaar (FlashTankIHX) is de cyclus configuratie die de beste thermodynamische prestaties levert. Figuur 3.4 geeft deze cyclus configuratie weer. Uit de selectiekaart wordt duidelijk dat er een correlatie bestaat tussen de optimale oplossing en de brontemperatuur. Cyclopentaan is het beste werkmedium bij een verdampingstemperatuur van circa 80°C. Ook een temperatuurlift van 100°C behoort tot de mogelijkheden. De verwachte COP bij die condities is circa 2,6.



Figuur 3.3 Warmtepomp cyclus configuratie en werkmedium voor maximaal rendement afhankelijk van externe temperatuurcondities



Figuur 3.4 Cyclus configuratie met een flash tank en een interne warmtewisselaar (IHX)

3.2 Werkmedia

Om de thermische stabiliteit van sommige van de hiervoor genoemde werkmedia te beoordelen, zijn deze gedurende 2 weken in een gesloten kunststof container in een oven op 200°C geplaatst. Deze tests zijn uitgevoerd met cyclopentaan, DMC, methanol en pentaan. De eindconclusie van deze laboratoriumexperimenten is dat dit geen geschikte manier is om werkmedia bij verhoogde temperaturen te testen.

In plaats daarvan is samenwerking gezocht met leveranciers van smeeroil voor hoge-temperatuur warmtepompen. Een belangrijk uitdaging bij deze hoge temperaturen is namelijk het vinden van een geschikte olie voor smering van de compressor in combinatie met het toegepaste werkmedium, in dit geval cyclopentaan.

De eis van de compressorfabrikant is een minimale kinematische viscositeit van 10 cSt in het oliecarter van de compressor. Deze viscositeit zal afhangen van de temperatuur en de hoeveelheid cyclopentaan in de olie. Metingen zijn uitgevoerd om deze afhankelijkheid vast te stellen en de juiste olie voor deze toepassing te selecteren. Uiteindelijk is hier een geschikte olie ontwikkeld die de gewenste viscositeit vertoont onder de beoogde operationele condities, zelfs indien er veel cyclopentaan in de olie terecht komt. De geselecteerde olie is een zogenoemde PAG (PolyAlkylene Glycol).

3.3 Prestatie hoge-temperatuur warmtepomp

Er is een nieuwe warmtepomp ontworpen en gebouwd die kan voldoen aan de vereisten van een uitgangstemperatuur van 180°C en een lift > 80°C. Op basis van de vorige werkpakketten is gekozen om cyclopentaan als werkmedium te gebruiken. Grote uitdaging bij de realisatie van het systeem het vinden van een geschikte compressor die kan functioneren onder de beoogde condities. Het Italiaanse bedrijf Dorin heeft op verzoek een zuigercompressor aangepast en geschikt gemaakt voor deze warmtepomp. Figuur 3.5 toont een foto van de complete warmtepomp. Deze warmtepomp is verbonden aan een test rig waarmee de temperatuur condities aan zowel de restwarmte kant als aan de proceswarmte

kant worden opgelegd aan de warmtepomp. De warmtepomp is ontworpen voor de levering van 50 – 100 kW aan proceswarmte tot een temperatuur van 180°C.



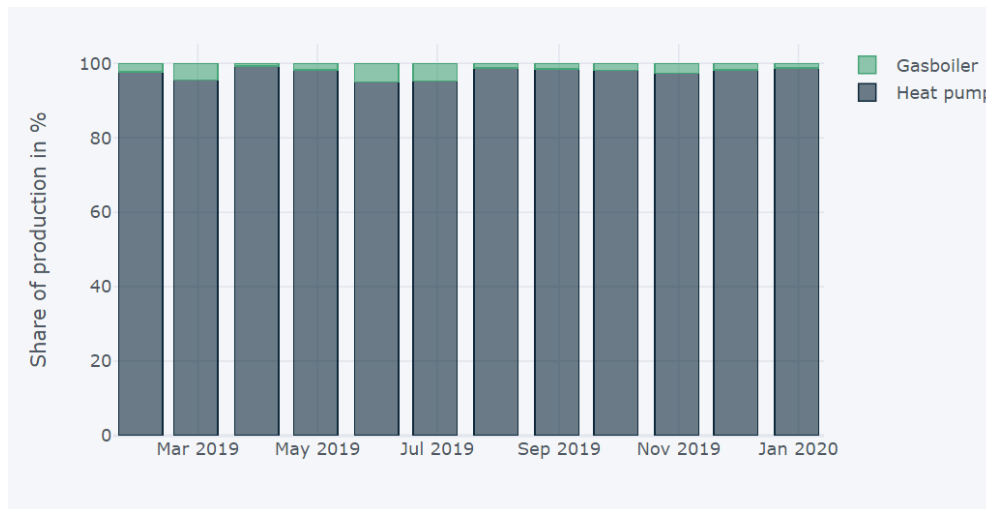
Figuur 3.5 Hoge-temperatuur warmtepomp In het Carnot-laboratorium TNO

Vanwege de brandbaarheid van cyclopentaan is rondom de warmtepomp een behuizing aangebracht die sterk wordt geventileerd. Op die manier wordt, zelfs in het geval van een lek, vermeden dat er een explosieve atmosfeer ontstaat.

Ondanks alle inspanningen om dit systeem binnen het tijdsbestek van het project in bedrijf te krijgen, is dit niet gelukt. Het systeem zal wel in vervolgprojecten worden ingezet om dit resultaat alsnog te behalen.

3.4 Dynamisch bedrijf van een industriële warmtepomp

Om mogelijke voordelen van het dynamisch bedrijven van een industriële warmtepomp te onderzoeken is onderzocht welk financieel voordeel hiermee is te halen. Achterliggende idee is dat een warmtepomp profijt kan trekken van lage elektriciteitsprijzen, maar ook kan worden uitgezet bij hoge elektriciteitsprijzen (ten opzichte van gas). Hiervoor is een model gemaakt waarin zowel een gasgestookte boiler als een warmtepomp beschikbaar zijn en wordt een variërende elektriciteitsprijs gedurende een jaar (2019) gehanteerd. De warmtevraag varieert eveneens gedurende het jaar. Het model rekent uit hoe de benodigde warmte met de boiler en de warmtepomp kan worden ingevuld tegen minimale kosten. Uit de analyse blijkt dat de warmtepomp meer dan 95% van de warmtevraag dekt. Figuur 3.6 laat dit zien voor het hele jaar. De warmtepomp is vrijwel altijd goedkoper dan de boiler. Het absolute voordeel dat kan worden behaald met het flexibel bedrijven van de warmtepomp is minimaal.



Figuur 3.6 Warmteproductie per bron voor 2019

3.5 Kosten van een full-scale warmtepomp

In dit werkpakket wordt een kostenraming van een volledige warmtepomp ontwikkeld. Dit wordt uitgevoerd voor dezelfde situaties als geanalyseerd in paragraaf 3.1.

De analyse start met de kosten van de belangrijkste componenten in het systeem (compressor, warmtewisselaars, motoren, vaten, kleppen). De kosten hiervan zijn gecorreleerd met de capaciteit of de grootte van de apparatuur. Dit hangt weer af van de gekozen thermische capaciteit. Voor elke systeemgrootte is de capaciteit van de componenten bepaald. De warmtewisselaars zijn ontworpen op basis van warmteoverdrachtsberekeningen.

Kostencorrelaties zijn ontwikkeld op basis van offertegegevens die intern bij TNO beschikbaar zijn en van samenwerkingspartners en/of van informatie die beschikbaar is in het DACE-boekje². De geldigheid van de kostenmodellen is gecontroleerd aan de hand van binnen TNO beschikbare offertes. De gebruikte referenties zijn afkomstig van eerdere en/of lopende projecten waarbij apparatuur is aangeschaft.

Naast de belangrijkste componenten zijn er nog meer directe kosten. De resterende directe kostencomponent bestaat uit montagekosten, het leidingwerk en de elektrische en instrumentatie apparatuur. De montage kosten worden ingeschat op basis van montage tijd en uurtarief. Kosten voor het leidingwerk is gebaseerd op kosten per meter leiding en schatting van leidinglengte. Voor de instrumentatie wordt gekeken naar het aantal benodigde sensoren.

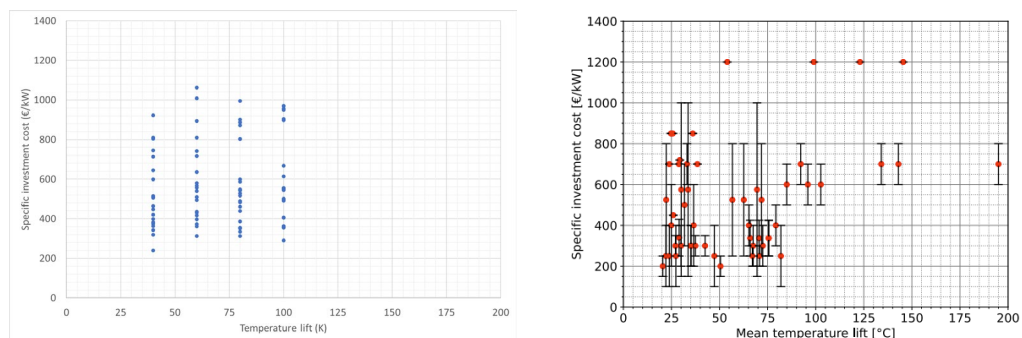
Tenslotte zijn er indirecte kosten die nodig voor de voltooiing van het project. In de huidige analyse zijn de indirecte kosten (bijvoorbeeld engineering, extra kosten als gevolg van de explosieve omgevingsveiligheid voor brandbare koelmiddelen en andere onvoorziene omstandigheden) in één post meegenomen.

² www.dace.nl

De belangrijkste onbekende binnen de aanschafkosten van een warmtepomp zijn de kosten van de compressor. Offertes zijn verzameld van verschillende projecten en er is een aanzienlijk verschil tussen de verschillende fabrikanten. In dit rapport is er van uitgegaan dat iedere compressor, ongeacht het werkmedium, hetzelfde kostenmodel volgt.

Een andere onzekerheid zit in de integratiekosten van de warmtepomp in het proces. Aangezien deze sterk afhangen van de specifieke locatie en proces, worden deze kosten niet meegenomen in deze analyse. Geschat wordt dat de integratiekosten even hoog kunnen zijn als de totale aanschafkosten van de apparatuur voor de warmtepomp.

De totale investeringskosten zijn berekend voor verschillende thermische capaciteiten, verschillende temperatuurliften en verschillende leveringstemperaturen, zoals eerder beschreven. Figuur 3.7 toont aan de linkerkant het resultaat van de modellering in dit rapport, terwijl aan de rechterkant de resultaten uit IEA Annex 58³ worden weergegeven. De modelleringsresultaten laten een grote spreiding zien, omdat deze voor verschillende thermische capaciteiten en verschillende leveringstemperaturen zijn berekend.



Figuur 3.7 Specifieke investeringskosten als functie van temperatuurlift (links: dit rapport, rechts: IEA Annex 58)

De overeenkomst tussen de resultaten van dit rapport en het IEA-rapport is redelijk, gezien de grote spreiding in de beschikbare gegevens. Deze analyse toont ook aan dat de beoogde specifieke investering van 200 k€/MW_{th} als zeer ambitieus kan worden betiteld. Dit kan wellicht worden bereikt voor zeer grote warmtepompen > 10 MW.

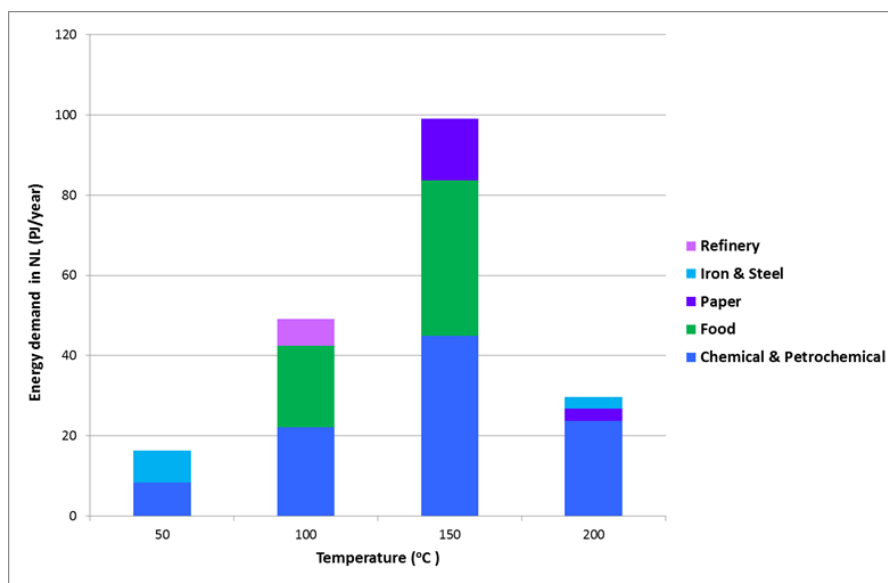
³ Zühlsdorf, B. et al, *IEA HPT Annex 58: High-Temperature Heat Pumps. Task 1 report: Technologies*, Report no HPT-AN58-2, August 2023.

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 80°C tot maximaal circa 180°C (≈ 10 bara). Deze leveringstemperaturen komen voor in met name de voedingsmiddelen- en papierindustrie, maar ook in chemie. Figuur 4.1 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 vanaf 150°C is circa 130 PJ/jaar in Nederland.



Figuur 4.1 Energievraag in NL industrie als functie van temperatuurniveau

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 110 PJ representeert.
- De elektriciteit, die nodig is voor de warmtepomp is, wordt opgewekt met een rendement van 81,1% ⁴. 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. Hier wordt de verwachte COP gebruikt bij een restwarmtetemperatuur van 80°C en een temperatuurlift van 100 K. Deze waarde is 2,6.

In de referentiesituatie is er 130 PJ aardgas nodig voor de 110 PJ warmtebehoefte. De warmtepomp kan in dezelfde warmtebehoefte voorzien door inzet van 42,3 PJ elektriciteit. De fossiele energiebehoefte voor deze elektriciteitsbehoefte is 52 PJ. De besparing op fossiele energie bedraagt dus 78 PJ/jaar voor de NL industrie. Deze besparing neemt toe met toenemende verduurzaming van het elektriciteitssysteem en zal bij volledige duurzame elektriciteit uiteindelijk 130 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/kWh⁴, corresponderend met 75 kg/GJ elektriciteit.

De huidige emissie op basis van een aardgas gestookte boiler is 7,4 Mton/jaar. De CO₂-emissie, voortkomend uit de elektriciteitsproductie, van de warmtepomp variant is 3,2 Mton/jaar. De emissiereductie voor het huidige elektriciteitssysteem bedraagt dus 4,2 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/kWh⁵. Op basis van dit getal resulteert een CO₂-emissie voor de warmtepomp van 0.55 Mton/jaar, corresponderend met een reductiepotentieel van 6,6 Mton/jaar in 2030. Een situatie met volledige duurzame elektriciteit geeft een reductie van 7,4 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 tussen 150°C en 200°C bedraagt momenteel 130 PJ/jaar in Nederland. Uit Eurostat gegevens⁶ blijkt dat het energiegebruik in de EU industrie 18 keer zo groot is als in Nederland. Onder de aanname dat de industriële structuur vergelijkbaar is, vertaalt het Nederlandse gebruik zich naar 2340 PJ in de EU in betreffende temperatuurinterval. 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 10000 systemen.

⁴ CBS, CO₂-emissiefactor, fossiel energieverbruik en rendement voor elektriciteit bij gebruiker, integrale methode, cijfers 2022.

⁵ PBL, Klimaat- en energieverkenning 2022, 2022

⁶ <https://ec.europa.eu/eurostat>

Er zijn veel veranderingen gaan op de markt voor industriële warmtepompen. Grote partijen, afkomstig uit de koelmarkt, passen hun producten aan zodat deze geschikt zijn voor warmtepomp toepassingen. Tegelijk komen er allerlei kleinere spelers op de markt die met een specifiek ontwikkeld product willen inspelen op de behoefte aan warmtepompen bij de eindgebruikers. Integratie van warmtepompen in een industriële setting brengt specifieke uitdagingen met zich mee. Kennis bij eindgebruikers en 'system integrators' is niet altijd voldoende om tot de meest innovatieve oplossing te komen.

Innovatie

Er zijn een aantal innovatieve ontwikkelingen gedaan binnen dit project. Zo is er na uitgebreide analyses het werkmedium cyclopentaan geselecteerd dat geschikt is voor hoge-temperatuur toepassingen. Helaas is het binnen dit project niet gelukt om dit ook experimenteel aan te tonen. Wel is, in samenwerking met smeerolieleveranciers, onderzoek gedaan naar een geschikt olie voor dit werkmedium bij de beoogde temperaturen. Hieruit is een PAG olie naar voren gekomen.

Op basis van modelberekeningen is een selectiekaart ontwikkeld die aangeeft welke cyclusconfiguratie en werkmedium tot de laagste kosten leidt, afhankelijk van de temperatuurcondities van de toepassing.

De analyses ten aanzien van het dynamisch inzetten van een warmtepomp in een markt met variërende elektriciteitsstarieven laten zien dat meeropbrengst ten opzichte van continu bedrijf van de warmtepomp zeer gering is op dit moment. Dit neemt niet weg dat er in de toekomst behoefte zal ontstaan aan de combinatie van warmtepomp en warmteopslag om de continuïteit van warmtelevering te garanderen onafhankelijk van de situatie op de elektriciteitsmarkt.

Tenslotte zijn kostenmodellen ontwikkeld die een schatting geven van de kosten van een warmtepomp skid, afhankelijk van toepassingscondities en schaalgrootte. Hierbij blijkt dat de spreiding in resultaten zeer groot is. Er is weinig detailinformatie bekend over de kosten van componenten (met name de compressor) en de productie. Industriële warmtepompen worden momenteel niet in serie gebouwd, waardoor de productiekosten nog steeds hoog zijn. De verwachting is dat deze kosten zullen afnemen wanneer seriematige productie met standaard product portfolio tot stand kan komen. Grote onzekerheid blijft er met de integratiekosten die zeer specifiek zullen zijn per locatie.

5 Spin-off

Het onderzoek naar deze systemen zal worden gecontinueerd in een aantal vervolgprojecten, zoals:

- KickStart, een nationaal project voor de ontwikkeling van industriële warmtepompen.
- SPRIT, een HEU project waarin ontwikkeling en demonstratie van industriële warmtepompen wordt beoogd.

6 Publicaties

- Otero Rodriguez, G.J., et al, *A Thermo-economic Analysis of Working Fluid and Cycle Combinations for Industrial Heat Pump Applications*, 15th Gustav Lorentzen Conference, Trondheim, 2022.
- Dit publieke eindrapport kan worden gedownload uit de TNO bibliotheek, [Zoeken | TNO](#)

Ondertekening

TNO › Energy & Materials Transition › Petten, 14 november 2024

Valid Signed by Sjaak van Loo
on 2024-11-15 19:14:04

S. van Loo
Research Manager

Valid Signed by Simon Spoelstra
on 2024-11-14 14:10:53

S. Spoelstra
Auteur

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl