

Openbare eindrapportage

Full Scale Industrial Heat Pump Using Natural Refrigerants

TNO 2023 R11355 – 13 juli 2023

Full Scale Industrial Heat Pump Using Natural Refrigerants

Openbare eindrapportage

Auteurs	S. Spoelstra
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	18 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0

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.

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	4
2 Achtergrond en doelstellingen	5
3 Resultaten	7
3.1 Conceptueel ontwerp	7
3.2 Warmtepomp ontwerp & bouw	7
3.3 Proces emulator	8
3.4 Warmtepomp testen	9
3.5 Gestandaardiseerd ontwerp warmtepomp	11
3.6 Business plan voor Nederlandse industriële warmtepomp bouwer	12
4 Bijdrage aan de doelstellingen van de Topsector	13
5 Spin off	16
6 Publicaties	17
Ondertekening.....	18

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	TEE118008
Project titel	Full Scale Industrial Heat Pump Using Natural Refrigerants
Coördinator en partners	TNO, IBK, Heinen & Hopman, Dow, ISPT, Emmtec
Project periode	01/11/2018 – 01/05/2023

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
Tel: 06 5100 2828

2 Achtergrond en doelstellingen

Achtergrond

Hoge-temperatuur industriële warmtepompen is een technologie die een belangrijke rol zal spelen bij het bieden van een duurzame oplossing voor de industriële warmtevraag tot 200°C (en misschien zelfs hogere temperaturen). In een aantal nationaal gesubsidieerde projecten sinds 2012 zijn TNO (voorheen ECN), IBK en tal van industriële partners betrokken bij de ontwikkeling van industriële compressiewarmtepompen, met het oog op een brede marktintroductie. Er is gekozen voor compressiewarmtepomptechnologie om een snelle marktintroductie te garanderen door voort te bouwen op kennis uit de koeltechnologie en zoveel mogelijk bestaande componenten te gebruiken en aan te passen aan de nieuwe toepassing.

Tijdens deze ontwikkeling is aangetoond dat stoomproductie mogelijk is met een warmtepomp en is het drukniveau van de geproduceerde stoom verhoogd van initieel 3,5 bara naar 6 bara. Tevens bleek dat de CAPEX van een warmtepomp een struikelblok kan vormen voor een succesvolle business case voor de eindgebruiker. Marktstudies tonen aan dat het grootste aantal warmtepompen in de industrie een vermogen zal hebben tussen de 1-10 MW. Standaardisatie voor deze vermogensrange zal tot het gewenste kostenniveau moeten leiden. Verdere innovaties en ontwikkelingen zijn nodig om de uitdagingen van de huidige warmtepomptechnologie het hoofd te bieden.

Deze uitdagingen kunnen als volgt worden samengevat:

- Hoewel de nieuw ontwikkelde synthetische werkmedia (HFO's) wenselijke eigenschappen vertonen in termen van ontvlambaarheid, toxiciteit en broeikaseffect (GWP), is er nog steeds de zorg dat deze synthetische koelmiddelen mogelijk geen duurzame oplossing op de lange termijn vormen. De huidige uitdaging met natuurlijke koelmiddelen betreft maatregelen ten aanzien van de explosieveiligheid van het systeem, welke resulteren in hogere kapitaalkosten in vergelijking met niet-ontvlambare alternatieven.
- Er is een gestandaardiseerde warmtepompskid nodig om economisch haalbare systemen te realiseren. Op dit moment zijn er beperkt bedrijven die dergelijke eenheden kunnen leveren. Deze eenheden zijn geen van allen specifiek ontworpen voor industriële toepassingen en de productie van stoom.
- Eindgebruikers van de technologie missen in veel gevallen voldoende gegevens en kennis om de interactie tussen de warmtepomp en hun processen volledig te doorgronden. Er is meer aandacht nodig op dit gebied, zodat deze eindgebruikers weloverwogen beslissingen kunnen nemen met betrekking tot het gebruik van warmtepompen als alternatief voor traditionele industriële verwarmingstechnologieën.

Geconcludeerd kan worden dat de weg naar implementatie van warmtepompsystemen in de industrie bestaat uit:

- het demonstreren van MW schaal systemen;
- ervaring opdoen met het implementeren van natuurlijke koudemiddelen;
- ontwikkeling van gestandaardiseerde of modulaire warmtepompunits, en;
- het verkrijgen van meer kennis over de interactie tussen de warmtepomp en het betreffende industriële proces.

Doelstellingen

Het algemene doel van dit project is om de ontwikkeling en implementatie van compressiewarmtepomp-technologie te versnellen richting toepassing in industriële sectoren zoals de voedsel-, papier-, chemische en raffinage-industrie.

De specifieke doelen die binnen de looptijd van het FUSE-project moeten worden bereikt, zijn

1. Ontwikkel een industriële schaal, stoom producerende, warmtepomp met behulp van een natuurlijke werkmedium die:
 - specifieke investeringskosten heeft van < 200 €/kWth (exclusief integratie);
 - middendrukstoom (bereik van 2-5 bar) produceert uit restwarmtebronnen in het bereik van 60°C-90°C met een thermisch vermogen van 1-2 MW met een COP van meer dan 50% van het maximale Carnot rendement.
2. Ontwikkel een modulair ontwerp voor compressiewarmtepompen met een beperkt aantal gestandaardiseerde componenten die op tal van manieren kunnen worden geconfigureerd om > 70% van de markt voor industriële warmtepompen te dekken. Dit maakt serieproductie mogelijk en daarmee lage kosten (< 200 €/kWth) en biedt toch flexibiliteit met betrekking tot bedrijfsomstandigheden (vermogen, temperatuur).
3. Richt een Nederlandse fabrikant (IBK/Heinen & Hopman) op voor de gestandaardiseerde, modulaire, flexibele compressiewarmtepomp.
4. Stel de prestaties van warmtepompen vast onder diverse gesimuleerde statische en dynamische omstandigheden bij TNO, op basis van industriële procesgegevens.
5. Demonstreer de prestaties van deze warmtepomp onder veldtestomstandigheden op de locatie van DOW Terneuzen. Deze doelstelling is vervallen vanwege budgettaire verschuiving richting de warmtepomp.
6. Zorg voor commitment voor vervolgprojecten waarbij de in bedrijf gestelde warmtepomp op locatie op meerdere industriële locaties wordt gedemonstreerd.

3 Resultaten

3.1 Conceptueel ontwerp

Er is een conceptueel warmtepompontwerp gemaakt op basis van ontwerprandvoorwaarden en functionele eisen van de eindgebruiker. Door middel van gedetailleerde stationaire modellering zijn een aantal thermodynamische cyclus lay-outs en werkmedium combinaties onderzocht om de meest geschikte combinatie te bepalen. De restwarmte zal in de orde van 60-90°C zijn en de minimaal vereiste stoomdruk is 4 bara (144°C). Het outputvermogen is vastgesteld op 1-2 MW.

De base case berekening gaat uit van een verdampingstemperatuur van 70°C en een condensatietemperatuur van 150°C. Het temperatuurverschil over de warmtewisselaars is 5 K en het isentrope rendement van de compressor wordt aangenomen op 75%. Als werkmedium wordt pentaan toegepast. De berekende Coëfficiënt of Performance (COP) onder deze (geïdealiseerde) condities is 3.5. De COP die in de praktijk kan worden gerealiseerd zal lager liggen dan deze waarde.

3.2 Warmtepomp ontwerp & bouw

Voor het ontwerp en de bouw van de warmtepomp is contact gezocht met Mayekawa. Deze partij was in staat en bereid deze unieke warmtepomp te realiseren. Hiervoor is een compleet nieuw ontwerp gemaakt en een bestaande compressor zodanig aangepast dat deze kan functioneren onder de beoogde condities. tabel 1 geeft een overzicht van de ontwerpspecificaties die voor deze warmtepomp zijn gedefinieerd. Deze wijken enigszins af van de condities voor het conceptuele ontwerp omdat er een hogere verdampingstemperatuur is gekozen. De ontwerp COP ligt bij 80°C verdamping- en 150°C condensatietemperatuur op 2.9.

Tabel 1 Ontwerpspecificaties voor de FUSE warmtepomp

Compressor		Systeem	
Model	PTN250MFC-LE	Olie koeler	Water gekoeld
Werkmedium	Pentane	Vloeistof onderkoeler	DX type
Toerental	1500-3000 rpm	Control	Siemens S7-1200 PLC
Vermogen		Drive motor	
Koelcapaciteit	856 kW	Vermogen & spanning	500 kW, 400 V, 50 Hz
Elektrisch verm	414 kW	Merk	Siemens
COP koeling	2,07	Frame	1LE5603-3BA5
Verwarmingscapaciteit	1192 kW		
COP verwarming	2,88		
Temperaturen		Drukken	
Verdamping	80 °C	Zuigdruk	3,7 bar(a)
Oververhitting	39 °C	Tussendruk	7,3 bar(a)
Condenserend	150 °C	Persdruk	15,9 bar(a)
Onderkoeling	25 °C		

figuur 1 toont de gerealiseerde warmtepomp na plaatsing in het Carnot lab van TNO in Petten.

Omdat de warmtepomp het brandbare pentaan bevat, zijn veiligheidsmaatregelen nodig om te voldoen aan de ATEX-regelgeving. Dit is gerealiseerd middels het aanbrengen van een soort omkasting en een hoog ventilatiedebiet. Het benodigde leidingwerk is geïnstalleerd om de warmtepomp aan te sluiten op de infrastructuur. Deze infrastructuur (test rig) voorziet de warmtepomp van de benodigde restwarmte op de gewenste temperatuur. Tevens zal de test rig de druk bepalen van de geproduceerde stoom. Zowel de toegeleverde warmte als de geproduceerde stoom worden gemeten om de prestaties van de warmtepomp te bepalen.

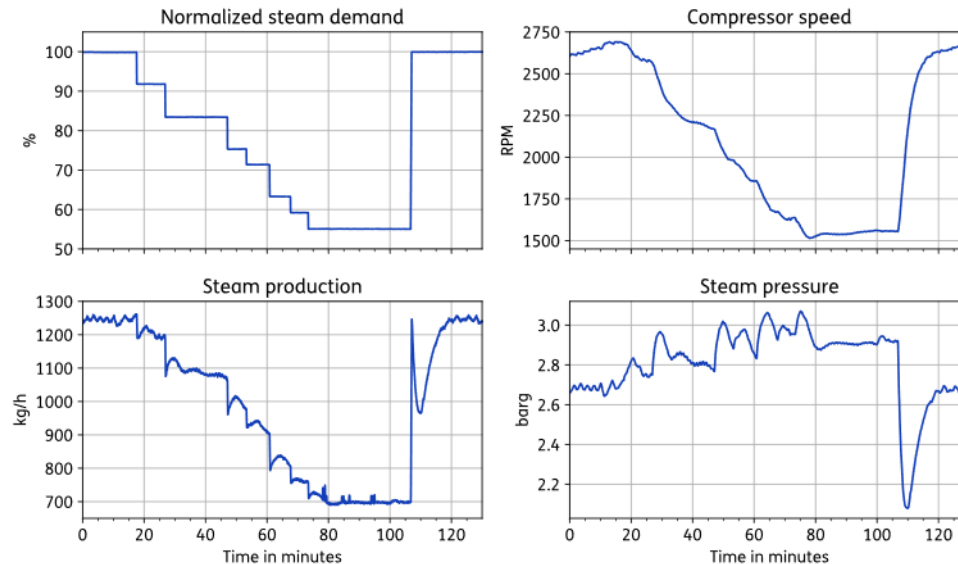


Figuur 1 FUSE warmtepomp geplaatst in het Carnot lab

3.3 Proces emulator

De infrastructuur van de test rig is gebruikt om een industrieel proces te emuleren. Hiertoe is een experiment uitgevoerd waarbij de stoomvraag van het proces geleidelijk afneemt van tot bijna 50% van de nominale waarde. Na circa een half uur op 50% wordt de stoomvraag weer opgevoerd naar 100%. De warmtepomp moet hierop reageren door eerst geleidelijk minder stoom te produceren en daarna plotseling weer meer. De warmtepomp reageert hierop door het toerental van de compressor te variëren. De stoomdruk moet tijdens dit proces constant blijven. figuur 2 geeft de experimentele resultaten weer. De grafiek linksboven toont de (gesimuleerde) stoomvraag van het industriële proces. De grafiek linksonder toont de productie van stoom door de warmtepomp als reactie hierop, die vrij goed de vraag volgt. Er is een plotselinge stijging gevolgd door een daling van de stoomproductie wanneer de vraag teruggaat naar 100%. Dit wordt veroorzaakt door het plotseling verdampen van water in de stoomgenerator van de warmtepomp. Dit leidt tot een stoompiek, gevolgd door een herstelperiode. De respons van het compressortoerental wordt weergegeven in de grafiek rechtsboven, in overeenstemming met de stoomproductie. De

stoomdruk wordt weergegeven in de grafiek rechtsonder. Deze druk is niet perfect, maar redelijk constant. De drukdaling die leidt tot het verdampen van het water in de stoomgenerator, zoals hierboven beschreven, is duidelijk zichtbaar.



Figuur 2 Dynamische respons van de warmtepomp op een variërende stoomvraag

Deze experimenten geven aan dat dit systeem zich binnen 15 minuten kan aanpassen aan grote veranderingen in de stoomvraag.

3.4 Warmtepomp testen

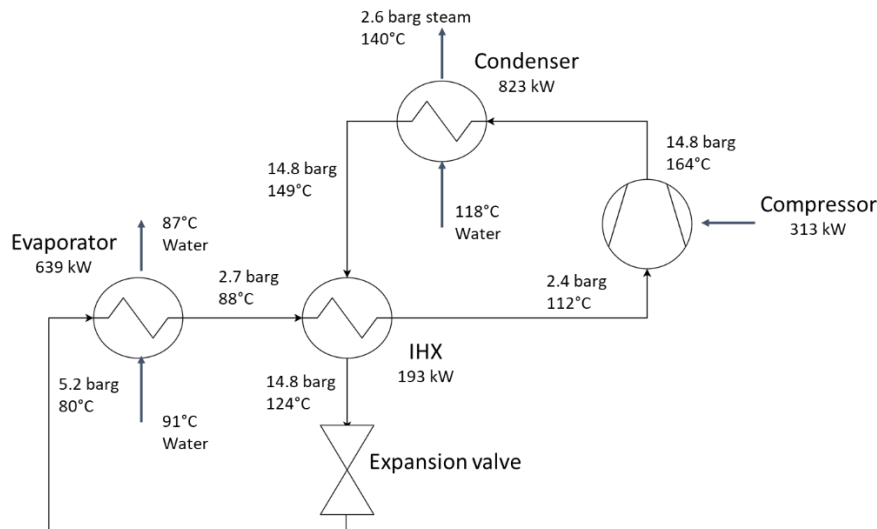
In overleg met de leverancier is een testprogramma opgesteld. tabel 2 geeft een overzicht van het uitgevoerde programma. Hierin staan de verdampings- en condensatie-temperaturen vermeld. De eerste test wordt uitgevoerd onder ontwerpcondities. De overige testen zijn bedoeld om het totale werkgebied te verkennen. Alle testen zijn uitgevoerd bij 90% van het maximale toerental van de compressor.

Tabel 2 Testprogramma voor de warmtepomp

Test no.	$T_{\text{verd}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{cond}} (^{\circ}\text{C})$
1	80	150
2	55	150
3	85	150
4	80	145
5	80	140
6	85	145
7	55	130
8	55	110

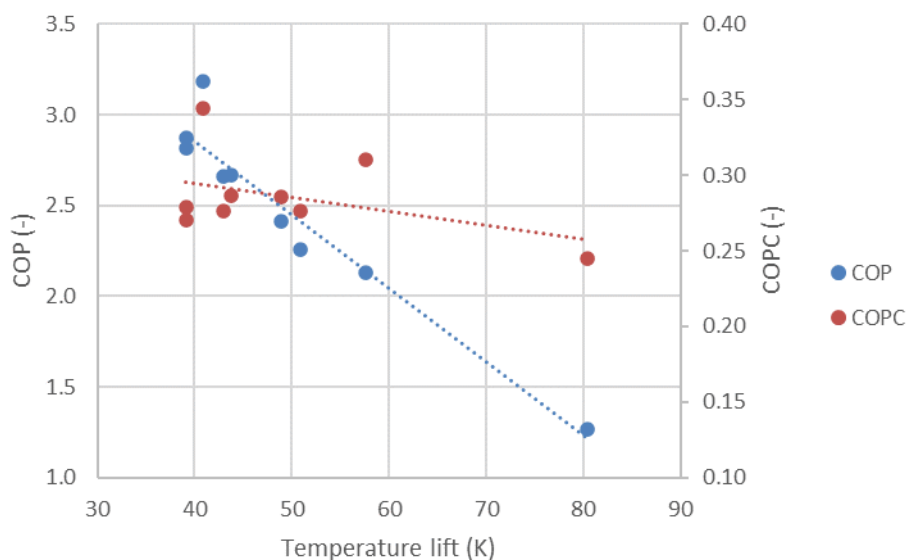
figuur 3 laat de gemeten temperaturen, drukken en vermogens zien voor de ontwerpcondities (80/150°C). Het pentaan verlaat de verdamper met een oververhitting van ongeveer 8 K. De oververhitting wordt door de IHX verder verhoogd tot 35 K. Deze hoge oververhitting is nodig om condensvorming in de compressor te voorkomen. De oververhitting die overblijft na compressie is 14 K. Het berekende asvermogen naar de compressor is 313 kW. Het elektrisch vermogen dat wordt gemeten bij de frequentieregelaar die de elektromotor van de compressor aandrijft, is 342 kW. De condensatie van het

pentaan produceert 823 kW stoom, wat overeenkomt met een stoomproductie van 1,3 t/h. De COP in figuur 3 is 2,6. Wordt het totale elektrische vermogen richting de frequentieregelaar gebruikt, dan resulteert een iets lagere waarde van 2,4. Dit rendement kan worden vergeleken met het maximaal haalbare rendement voor deze systemen, het Carnot rendement. Hiervoor wordt een relatief rendement van 29% berekend.



Figuur 3 Gemeten temperaturen en druken voor de 80/150 situatie

Een overzicht van de prestaties van de warmtepomp voor het volledige testprogramma is terug te vinden in figuur 4. Hierin staan zowel de COP als de COPC (COP ten opzichte van Carnot rendement) weergegeven als functie van de temperatuurlift. Dit betreft de externe temperatuurlift. De interne temperatuurlift is hoger vanwege de temperatuurverschillen over de warmtewisselaars.



Figuur 4 COP en COP ten opzichte van Carnot rendement als functie van de temperatuurlift

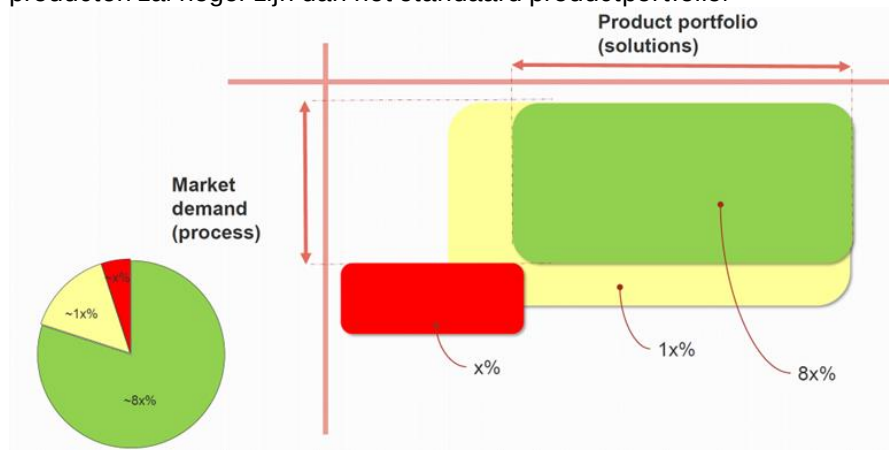
De COPC is relatief laag ten opzichte van de gangbare waarde van 50%. Dit komt voor een groot deel door het relatief hoge temperatuurverlies in zowel verdamper als condensor. Het temperatuurverlies in de condensor is ongeveer 10 K waar 3 K werd verwacht. De

aanwezigheid van kleine hoeveelheden van niet-condenseerbare gassen kan dit veroorzaken. Het interne rendement ten opzichte van Carnot, gebaseerd op interne temperatuurlift, bedraagt ongeveer 40-50%.

Uit analyse van het compressormetingen blijkt dat het compressor rendement lager ligt dan verwacht. Vanwege de nog niet bekende persgas temperatuurcondities waaronder deze compressor moest functioneren is voor een conservatief rotorontwerp gekozen. Met de ervaring van dit project kan een meer optimaal rotorontwerp worden gemaakt wat tot significant hogere prestaties zal leiden.

3.5 Gestandaardiseerd ontwerp warmtepomp

Deze activiteit is uitgevoerd met hulp van het bureau Post & Dekker. Het doel was om een meest waarschijnlijke Configure to Order (CtO)-strategie voor industriële warmtepompen te demonstreren. Huidige warmtepompen worden op maat geproduceerd, leidend tot een hoog kostenniveau. Een CtO-proces zou er idealiter toe leiden dat een groot deel van de klantvraag kan worden gedekt door een standaard productportfolio. Dit is weergegeven in figuur 5. In dit proces zijn er groene opdrachten die 90% van de aanvragen dekken en weinig/geen risico met zich meebrengen. Ongeveer 90% van de bouwstenen is Assembled to Order (AtO), terwijl 10% van de bouwstenen nog EtO moet zijn. De rode orders vallen buiten de standaard portefeuille en zijn volledig op maat gemaakt. Het prijsniveau van deze producten zal hoger zijn dan het standaard productportfolio.

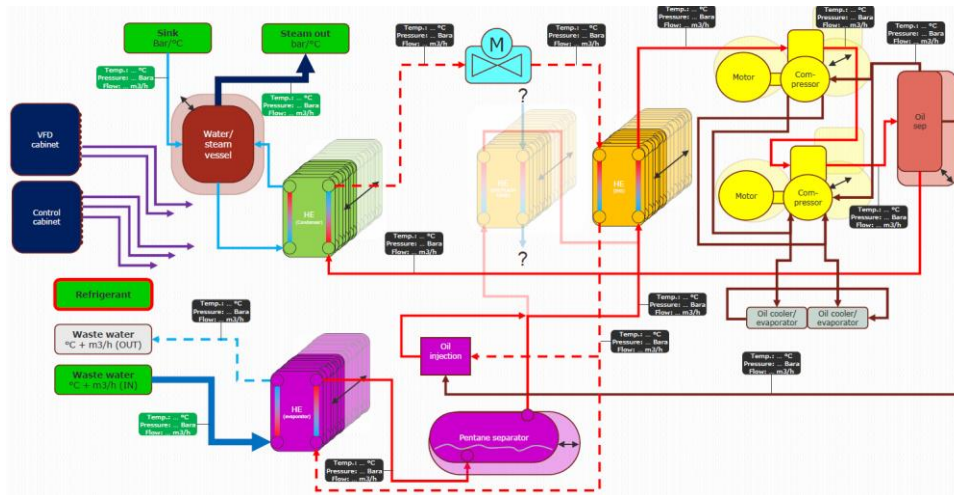


Figuur 5 Product portfolio versus marktvraag voor een CtO systeem

De volgende stap is het ontwerpen van een industriële product configurator voor de warmtepomp. Huidig doel is om te laten zien hoe zo'n systeem eruit zou kunnen zien. Een daadwerkelijke configurator wordt niet ontwikkeld. De product configurator zou technische invoerinformatie van de eindgebruikerstoepassing en verkoopinformatie gebruiken. De output van de product configurator is een set tekeningen, te bestellen componenten en een offerte.

De warmtepomp wordt opgedeeld in verschillende modules. Elke module heeft een gedefinieerde interface en vervult één of meer functies. Modules bestaan meestal uit meerdere onderdelen en hebben mogelijk meerdere varianten. De verschillende modules voor een ééntraps compressiewarmtepomp worden weergegeven in figuur 6. Voor elk van de modules kan een groot aantal varianten worden opgesteld. Deze varianten worden

gekozen op basis van de klantspecificaties. Samenstellen van de modules leidt tot een compleet warmtepompsysteem.



Figuur 6 Modules voor een ééntraps compressie warmtepomp

3.6 Business plan voor Nederlandse industriële warmtepomp bouwer

Ruim 10 jaar geleden (2012) is IBK, samen met een aantal partners gestart met de ontwikkeling van de stoom producerende warmtepomp met gebruikmaking van technieken die dagelijks worden toegepast in traditionele compressie koudetechniek. Stoomproductie tot en met 150 °C werd daarmee aangetoond. Tegelijkertijd was er opschaling nodig en kostprijsdaling.

Binnen het FUSE project bleek het niet mogelijk de gewenste installatie binnen het beschikbare budget te realiseren. Het kostentarget van 200 €/kWth kon zelfs niet worden benaderd. Dit heeft geleid tot verschuiving van budgetten en de inhuur van Mayekawa door TNO. Dat betekent niet dat IBK en haar moederbedrijf Heinen & Hopman (H&H) geen toekomst zien voor industriële warmtepompen. Integendeel, de engineers van IBK en Heinen & Hopman werken aan de verdere ontwikkeling van het product. Het streven is om medio 2024 een commercieel model klaar te hebben.

IBK en H&H zijn al tientallen jaren een belangrijk verkoopkanaal voor de onderdelen die gezamenlijk een warmtepomp vormen. Die leidt tot langlopende leveringscontracten die naast de standaard koel-/vriescompressoren ook leveringszekerheid bieden voor de hoog temperatuurcompressoren. Naast deze leveringscontracten heeft H&H productiecapaciteit voor de productie van industriële warmtepompen. De te ontwikkelen warmtepomp wordt onderdeel van het standaard productieportfolio. De huidige productiecapaciteit is voldoende voor de nabije toekomst en kan worden opgeschaald met aanvullende investeringen indien nodig.

De verkoop zal in eerste instantie met name vanuit IBK geschieden. IBK heeft account-managers actief op dit vlak met uitgebreid industrieel netwerk. Als de aantoonbare interesse en vraag uit de markt verder groeit, kan IBK de vermarktingsactiviteiten uitbreiden via haar zusterbedrijven.

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

Warmtepomptechnologie die binnen het FUSE project is ontwikkeld, is gericht op het leveren van warmte die tot circa 150°C. De meest geschikte (en grootste) sectoren voor dit temperatuurgebied zijn papier en karton, (petro)chemie en voedingsmiddelenindustrie. Deze sectoren zijn zeer geschikt voor de integratie van warmtepompen vanwege het feit dat ze energie-intensief van aard zijn en de meeste van deze processen voltijds in bedrijf zijn, wat zorgt voor de benodigde draaiuren.

In een TNO gepubliceerde marktstudie¹ is een bottom-up analyse gemaakt van het potentieel van industriële warmtepompen binnen EU-28. Hierbij zijn temperatuurprofielen van individuele processen geanalyseerd op de mogelijke toepassing van een warmtepomp. De prestatie van de warmtepomp is per individueel proces bepaald. Dit is gedaan voor een viertal sectoren (papier, chemie, raffinage, voedingsmiddelen) en voor twee temperatuurgebieden, tot 150°C warmtelevering en tot 200°C. tabel 3 presenteert het eindresultaat hiervan voor 150°C. Deze getallen geven een onderschatting van het werkelijke marktpotentieel omdat niet van alle processen voldoende gegevens bekend zijn.

Tabel 3 EU28 warmtepomp potentieel tot 150°C warmtelevering

Sector	Thermisch vermogen (GW)	Aantal units (-)	Warmteproductie (PJ/a)	Electriciteitsvraag (PJ/a)
Papier	6,6	938	203	78
Chemie	8,1	1164	2523	59
Voeding	5,0	1107	83	25
Raffinage	0,3	20	9	4
Totaal	20,0	3229	547	166

Op basis van dit marktpotentieel kunnen de vermeden hoeveelheden fossiel energie en de CO₂-emissiereducties worden bepaald. Dit wordt gedaan voor twee scenario's. Scenario 1 is een scenario gebaseerd op het huidige elektriciteitssysteem. Daarbij worden de getallen voor de Nederlandse energiesysteem gehanteerd en toegepast op de EU-potentiëlen.

Scenario 2 een is waarbij de elektriciteit volledig duurzaam is.

Om de vermeden fossiele energie te berekenen worden de volgende aannames gedaan:

- In de referentiesituatie wordt een gasgestookte ketel toegepast met een rendement van 90%;

¹ Marina, A., et al, An estimation of the European industrial heat pump market potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 139 (2021).

- De elektriciteit die nodig is voor een warmtepomp wordt in scenario 1 opgewekt met een rendement van 73,8%². Deze hoge waarde is gebaseerd op een mix van zowel fossiele brandstoffen als duurzame elektriciteitsopwekking.

In tabel 3 wordt een warmteproductie van 547 PJ/a gesteld voor de warmtepompen in de EU-28. Om eenzelfde hoeveelheid warmte te produceren met een gasgestookte ketel met een rendement van 90% is 608 PJ/a aardgas nodig. De elektriciteitsbehoefte voor de warmtepompen is 166 PJ/a, volgens tabel 3. De fossiele energiebehoefte voor deze elektriciteit komt in scenario 1 uit op 225 PJ/a. In scenario 2 loopt dit terug naar 0 PJ/a. De vermeden fossiele energiebehoefte in scenario 1 is dus **383 PJ/a** en in scenario 2 komt dit uit op **608 PJ/a**.

Naast vermindering van het fossiele energieverbruik, wordt ook de CO₂-uitstoot teruggebracht door toepassing van industriële warmtepompen. Om dit te berekenen, worden de volgende aannames gedaan:

- CO₂-emissie van aardgas is 56,4 kg/GJ;
- CO₂-emissie van de huidige elektriciteitsmix (scenario 1) is 83,3 kg/GJ³.

De CO₂-emissie in de uitgangssituatie vanuit aardgas is 34 Mton/a. De elektriciteit die nodig is voor toepassing van warmtepompen leidt in scenario 1 tot een emissie van 14 Mton/a. De reductie in CO₂-uitstoot is dus **20 Mton/a** in scenario 1. In scenario 2 wordt geen CO₂ meer uitgestoten en bedraagt de reductie **34 Mton/a**.

Internationale concurrentiepositie

De concurrentiepositie kan worden verbeterd door toepassing van warmtepompen door bedrijven waardoor hun energiekosten omlaag gaan en hun concurrentiekracht wordt vergroot. Hiertoe wordt een eenvoudige business case analyse gemaakt voor een eindgebruiker in termen van terugverdientijd. Deze zal altijd afhangen van de procesomstandigheden van de individuele eindgebruiker, omdat dit de prestatie van de warmtepomp bepaalt. Daarnaast zijn de investeringskosten en met name de integratiekosten zeer site specifiek. De kosten voor de warmtepomp skid die speciaal is gebouwd voor dit project waren 720 €/kW⁴. De integratiekosten zijn zodanig aangenomen dat de totale kosten gelijk zijn aan de SDE++ bedragen. De volgende aannames worden gemaakt:

- Totale investeringskosten (inclusief integratie) zijn € 1035/kWth⁵;
- De elektriciteitsprijs is € 100/MWh;
- De aardgasprijs is € 50/MWh;
- Het rendement van de conventionele aardgasketel is 90%;
- De COP van de warmtepomp is 2,4, gebaseerd op het experimenteel resultaat voor de base case;
- De CO₂-prijs is 80 €/ton;
- Aantal draaiuren is 8000 uur per jaar.

tabel 4 toont de business case voor een 1 MW systeem bij een industriële eindgebruiker. De simpele terugverdientijd wordt berekend op **4.1 jaar**. Het spreekt voor zich dat

² CBS, CO₂-emissiefactor, fossiel energieverbruik en rendement voor elektriciteit bij gebruiker, integrale methode, cijfers 2021

³ CBS, CO₂-emissiefactor, fossiel energieverbruik en rendement voor elektriciteit bij gebruiker, integrale methode, cijfers 2021

⁴ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58fc-compressor.pdf>

⁵ PBL, Eindadvies basisbedragen SDE++ 2023, 10 februari 2023.

prijzontwikkelingen een sterke invloed zullen hebben op deze terugverdientijd. De verwachting is dat investeringskosten zullen dalen bij groter productieaantallen. Aardgasprijzen zullen op lange termijn een grotere stijging te zien geven dan de elektriciteitsprijs, gezien alle duurzame productiemiddelen die worden geïnstalleerd. De CO₂-prijs tenslotte zal toenemen richting de toekomst. Al deze ontwikkelingen leiden tot een gunstiger business case voor de warmtepomp.

Tabel 4 Eenvoudige business case voor een 1 MW systeem bij een eindgebruiker

Investering (k€)	1035
Stoomproductie (MWh/a)	8000
Aardgaskosten conventionele ketel (k€/a)	440
Elektriciteitskosten warmtepomp (k€/a)	333
Vermeden CO ₂ kosten (k€/a)	143
Netto opbrengst warmtepomp(k€/a)	250
Terugverdientijd (jaren)	4.1

Een tweede thema voor de concurrentiepositie is de kennispositie die met dit project dit opgebouwd. Nederland heeft door de jaren heen een leidende positie gehad op het gebied van R&D aan industriële warmtepompen. Dit project heeft tot verdere versterking van die positie geleid. De warmtepomp die is gerealiseerd is een eerste prototype dat aantoont dat stoomproductie tot 150°C op MW schaal mogelijk is. Hierbij is veel kennis opgedaan omtrent het prestaties en gedrag van een dergelijk systeem, maar ook welke integratieaspecten belangrijk zijn. Data die is verkregen uit dit project wordt gebruikt om modellen te valideren zodat in de toekomst betere voorspellingen kunnen worden gedaan omtrent de prestaties, maar ook dynamische gedrag van industriële warmtepompen. Deze kennis maakt het weer mogelijk om integratie in een daadwerkelijk industrieel proces beter te kunnen voorspellen.

De resultaten van dit project zullen verder worden gedissemineerd en hebben al geleid tot interesse van zowel eindgebruikers als technologieleveranciers.

De kennis die is opgedaan in dit project zal verder worden ontwikkeld in vervolgprojecten, zowel op nationaal als EU-niveau.

5 Spin off

Dit project heeft al geleid tot vervolgprojecten op zowel nationaal als internationaal niveau.

- ENCORE, dit landelijk door RVO gefinancierde project onderzoekt de mogelijkheid om met compressiewarmtepompen naar hogere uitgangstemperaturen te gaan. Het doel is om 180°C te bereiken.
- KickStart, dit landelijk door RVO gesubsidieerde project, gecoördineerd door IBK, ontwikkelt twee full-scale warmtepompen voor twee industriële toepassingen, om na dit project in de industrie te implementeren.
- SPIRIT, dit onlangs gestarte door de EU gesubsidieerde project, gecoördineerd door TNO, zal drie grootschalige industriële warmtepompen in 3 toepassingen in Europa ontwikkelen en demonstreren.

6 Publicaties

- Website pagina @ ISPT: <https://ispt.eu/projects/fuse/>
- Website pagina @IBK: <https://www.ibknl.com/news/fuse-full-scale-industrial-heat-pump-using-natural-refrigerants/>
- Artikel over industriële warmtepompen in RCC K&L, <https://www.koudeenluchtbehandeling.nl/106326/tno-ontwikkelt-breed-toepasbare-industriele-warmtepompen>
- Het FUSE-project wordt genoemd in het witboek dat is opgesteld door een consortium van Europese instituten om de ontwikkeling en implementatie van industriële warmtepompen in Europa te bevorderen, zie <https://publications.tno.nl/publication/34636827/LyEUaZ/TNO-2020-heatpump.pdf>
- Artikel op warmte365.nl, zie [Warmte365 - TNO wil industrie verduurzamen met zijn Pentaan warmtepomp](#)

Ondertekening

TNO) Energy & Materials Transition) Petten, 13 juli 2023

S. van Loo
Research Manager

S. Spoelstra
Auteur

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl