

TNO PUBLIEK

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Postbus 15
1755 ZG Petten

www.tno.nl

T +31 88 866 50 65

TNO-rapport**TNO 2022 R10487 | Eindrapport****Low CapEx industrial heat pump
Openbare eindrapportage**

Datum	30 maart 2022
Auteur(s)	S. Spoelstra
Aantal pagina's	12 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	Low CapEx
Projectnummer	060.33879

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

TNO PUBLIEK

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Uitgangspunten en doelstelling	4
3	Resultaten	6
4	Bijdrage aan doelstelling van de regeling	8
5	Spin off	10
6	Openbare publicaties	11
7	Ondertekening	12

1 Inleiding

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Gegevens project

Projectnummer	TEEI117011
Projecttitel	LowCapex industrial heat pump
Penvoerder en medeaanvragers	TNO, Bunge Loders Croklaan, Cargill, DOW, IBK, ISPT, Smurfit Kappa
Projectperiode	01/10/2017 – 01/10/2021

Contact en verkrijgbaarheid rapport

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

Contactpersoon voor dit project is:

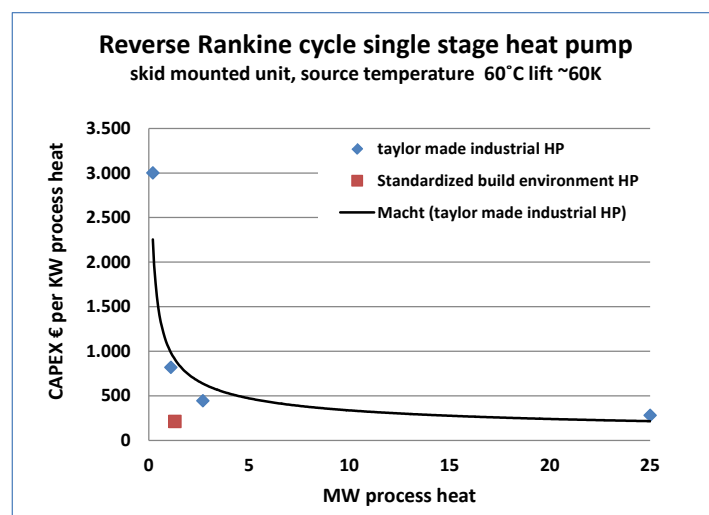
S. Spoelstra
E-mail: simon.spoelstra@tno.nl

2 Uitgangspunten en doelstelling

In het CATCH-IT (2012 .. 2015) project is een stoom producerende compressie warmtepomp ontwikkeld waarmee restwarmte van 50°C tot 80°C kan worden opgewaardeerd tot lage druk stoom (tot 2,5 barg). De schaalgrootte was 200 kW_{th} en er werd gebruik gemaakt van butaan als werkmedium. De warmtepomp is bij Smurfit Kappa Roermond Papier met het productieproces geïntegreerd en beproefd. De gemeten prestaties kwamen goed overeen met de berekende prestaties. Doorontwikkeling naar full scale (circa 2 MW_{th}) en toepassing in de papierindustrie werd belemmerd door de te lange terugverdiëntijd (6 tot 7 jaar, prijspeil 2015).

Naar aanleiding van de bevindingen in het CATCH-IT project is het STEPS project (TEEI115010) opgezet. In het STEPS project werd de warmtepomp uit het CATCH-IT project uitgebreid naar een tweetraps systeem met pentaan als werkmedium. Het tweetraps systeem in combinatie met het gebruik van Pentaan maakte hogere stoomdrukken, tot 5 barg, mogelijk.

Een andere route naar het verkorten van de terugverdiëntijd is het verlagen van de investeringskosten. Het verlagen van de investeringskosten werd onderzocht in het CRUISE project (TEEI116085). In Figuur 1 wordt het effect van schaalgrootte op de specifieke investeringskosten weergegeven. Hieruit blijkt dat de specifieke investeringskosten sterk afnemen bij toenemende schaalgrootte. Opvallend is echter ook het effect van standaardisatie en een eenvoudig ontwerp (Standardized build environment HP).



Figuur 1 CapEx van skid mounted warmtepompen

Een tweede resultaat uit het CRUISE project is dat de grote aantallen warmtepompen worden gevonden in capaciteiten tot 10 MW_{th}. Uit voornoemde twee bevindingen wordt de conclusie getrokken dat standaardiseren op units van 2 MW_{th} en 5 MW_{th} de route tot CapEx reductie is. Grotere capaciteiten kunnen dan worden gerealiseerd door parallel schakeling van 5 MW units of door op maat gemaakte oplossingen.

Een derde en laatste bevinding in het CRUISE project was dat de kostprijs van de warmtepomp wordt verhoogd door het gebruik van een brandbaar werkmedium. Het gebruik van een brandbaar werkmedium maakt veiligheidsmaatregelen op de warmtepomp unit zelf noodzakelijk, het verhoogt de kosten bij implementatie door extra veiligheidsmaatregelen on site en leidt tot extra benodigde vergunningen. Dit bezwaar is het grootst in de voedingsmiddelen- en papierindustrie.

De integratie van een warmtepomp met het productieproces vergt de nodige aandacht doordat de warmtepomp zowel via de restwarmte als via de proceswarmte met het proces wordt verbonden. Daar komt bij dat de klassieke configuratie, vanuit een centraal punt (veelal gasgestookte boilers) stoom aanbieden op de hoogst benodigde druk en dan per procesonderdeel smoren naar de gewenste druk, een sterk negatief effect op de COP heeft.

De doelstelling van het LowCapex project is tweeledig:

1. Het ontwikkelen van een warmtepomp die in staat is om stoom te produceren uit restwarmte van 50°C tot 80°C met een capaciteit van ongeveer 2 MW_{th} tegen een kostprijs van minder dan € 200 per kW_{th} met een COP groter dan 50% van het Carnot rendement en een niet brandbaar werkmedium.
2. Het identificeren van economisch haalbare integraties en deze uitwerken tot voorstellen voor demonstratieprojecten.

3 Resultaten

Technologielyn

In de technologische lijn wordt warmtepomptechnologie uit de gebouwde omgeving doorontwikkeld tot een stoom producerende industriële warmtepomp. De grootste warmtepompen uit de gebouwde omgeving hebben voldoende capaciteit voor industrieel gebruik (meer dan 1,5 MW_{th}) en worden seriematig en daardoor kosteneffectief gebouwd. Hiertoe is een samenwerking aangegaan met de firma OCHSNER Wärmepumpen GmbH uit Oostenrijk. De bestaande condensor voor de productie van heet water is vervangen door een stoom producerende variant en als werkmedium is R1233zd(E) toegepast. De warmtepomp is geleverd conform het kostendoel van dit project op basis van de berekende specificaties.

De berekende prestaties van deze warmtepomp zijn hieronder weergegeven. Hierbij worden getallen gegeven voor een inlaattemperatuur restwarmte van 63°C en uitlaattemperatuur proceswarmte van 115°C (0,7 barg stoom).

- Thermisch output vermogen : 1640 kW
- Elektrisch vermogen : 496 kW
- COP : 3,3
- Aansluitspanning : 400 V/ 50 Hz
- Nominale stroomsterkte : 842 A

Het systeem bestaat uit 2 parallelle circuits met elk een schoefcompressor met variabele snelheid. Figuur 2 toont de constructie van deze warmtepomp, transport naar TNO en de aansluiting op de TNO Full Scale Test Rig in Petten.



Figuur 2 LowCapex warmtepomp bij Ochsner (linksboven), op transport (rechtsboven), arriverend bij TNO (linksonder) en aangesloten op de TNO Full Scale Test Rig (rechtsonder)

De warmtepomp wordt aangesloten op de Full Scale Test Rig middels water- en stoomleidingen. Tevens zijn beide systemen softwarematig geïntegreerd. De Full

Scale Test Rig voorziet de verdamper van de warmtepomp van water van de gewenste temperatuur om de bronwarmte te leveren. De warmtepomp waardeert deze warmte op naar lage druk stoom die weer aan de Full Scale Test Rig wordt geleverd. Dit wordt voor een deel weer hergebruikt. Het overschot aan warmte wordt via een buiten opgestelde warmtewisselaar afgestaan aan de atmosfeer. Zowel het thermisch vermogen als het elektrisch vermogen worden gemeten om de prestatie van de warmtepomp vast te stellen.

Ten gevolge van COVID-19 heeft het zeer lang geduurd voordat de commissioning van de warmtepomp door Ochsner kon worden opgestart. Na de nodige problemen met werkmedium, olie, instrumentatie en regelingen, heeft het systeem kort gedraaid.

De resultaten laten zien dat de beoogde temperaturen voor restwarmte opname en stoomproductie worden bereikt. De drukverhouding over de compressor komt goed overeen met de verwachtingen, evenals het opgenomen vermogen van de compressor. Wat sterk achterblijft, zijn de verdamper en condensor vermogens. Het output vermogen van 1 circuit bedraagt circa 250-300 kW. De COP van het huidige systeem bedraagt slechts circa 1,5 – 2, veel lager dan de 3,3 ontwerpwaarde.

Inspectie van het inwendige van de van de warmtepomp heeft geleid tot de meest waarschijnlijke oorzaak. Het vermoeden is dat de verdamper lek is, waardoor water vanuit de Full Scale Test Rig in de warmtepomp terecht is gekomen. Nader onderzoek door de leverancier Ochsner moet dit bevestigen. De vertraging door COVID-19 en de geconstateerde problemen hebben er toe geleid dat de warmtepomp binnen de looptijd van het project niet volledig in bedrijf is genomen en het testprogramma niet kon worden afgewerkt.

Integratiestudies

Door de eindgebruikers in het consortium, (Bunge Loders Croklaan, Cargill, DOW, SmurfitKappa) is gekeken naar integratie van dit type warmtepomp in hun processen. Per bedrijf is naar de integratie gekeken en berekend wat toepassing van deze warmtepomp in hun proces betekent qua energiebesparing en terugverdiëntijd.

Uit de integratiestudies blijkt dat de geteste warmtepomp qua temperatuur- en vermogensspecificaties goed past bij een aantal eindgebruikers. De potentiële energiebesparing is significant, in de orde van 30%-50% afhankelijk van het specifieke proces. Terugverdiëntijden liggen beneden de 5 jaar, op basis van de relatief lage energieprijzen (4 – 6 €/GJ) en kostenniveau tijdens dit project. Voor DOW ligt de procestemperatuur van de Ochsner warmtepomp te laag.

Eindgebruikers geven aan door dit project meer te hebben geleerd over industriële warmtepompen en de integratie hiervan in hun processen.

4 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

Duurzame energiehuishouding

De markt waar deze warmtepomptechnologie voor wordt ontwikkeld betreft de warmtevraag voor scheidingsprocessen en het opwarmen van processtromen in de raffinage-, chemische-, voedings- en papierindustrie. Deze industriële warmtevraag bestaat vrijwel uitsluitend uit stoom tot 200°C en wordt gezien als het bruto potentieel voor warmtepompen. Gebaseerd op CBS-statistieken en aanvullende informatie, wordt het bruto potentieel voor warmtepompen berekend op 205 PJ per jaar, zie Tabel 1.

Tabel 1 Warmtepomp markt op het temperatuur tot 200°C in NL

Sector	Warmtevraag (PJ/a)	Aandeel < 200°C (%)	Potentiële warmtepomp markt (PJ/a)
Chemie	262	35	92
Raffinage	136	15	20
Voeding	74	100	74
Papier	20	96	19
Total	492		205

De warmtepomp in dit project heeft een maximale leveringstemperatuur van naar verwachting 120°C. Aangenomen wordt dat deze warmtepomp toepasbaar is voor 30% van de warmtebehoefte < 200°C, zijnde 62 PJ/a.

De case studies van de eindgebruikers in dit project laten een primaire energiebesparing zien van 30-50% op basis van opwekkingsmix van het huidige elektriciteitssysteem. Een conservatieve inschatting levert dan een primaire energiebesparing in Nederland op van 18 PJ/a. Dit is de vermeden inzet van fossiele brandstoffen op basis van het elektriciteitssysteem van enkele jaren geleden. De vermeden CO₂-emissie is meer dan 1 Mton/a. De inzet van volledig duurzame elektriciteit voor industriële warmtepompen zou fossiele brandstoffen volledig vermijden en 62 PJ/a besparen, met navenant grotere CO₂-emissie reductie.

Kennispositie

In dit project zijn de volgende stappen worden gezet met betrekking tot de kennisopbouw:

- Van 200 kW_{th} pilot schaal naar 2 MW_{th} industriële schaal;
- Van brandbaar koudemiddel naar een nieuw, niet brandbaar, niet giftig synthetisch koudemiddel met een lage ODP (Ozon Depletion Potential), een lage GWP (Global Warming Potential) en geschikt voor stoomproductie (HFO R1233zd(E));
- Gestandaardiseerd 'lean' warmtepomp ontwerp is overgenomen uit de warmtepompen voor de gebouwde omgeving en omgebouwd tot een stoom producerende warmtepomp.

Hoewel de commissioning en inbedrijfname van de Ochsner warmtepomp uiteindelijk binnen de looptijd van het project niet succesvol is verlopen, is wel de

nodige kennis opgedaan ten aanzien van het bedrijven en integreren van dit soort systemen. De Full Scale Test Rig, ontwikkeld om warmtepompen van MW schaal te testen, functioneert goed en kan in de toekomst worden toegepast om industriële warmtepompen op relevante schaalgrootte op gedrag en prestatie te beoordelen.

5 Spin off

Het Low CapEx project heeft reeds tijdens de uitvoering tot vervolgprojecten geleid.

- FUSE. Het TKI-JIP project FUSE (TEEI118008) bouwt voort op het gebruik van natuurlijke werkmedia zoals dat binnen STEPS (TEEI115010) is ontwikkeld voor hoge temperaturen. Doelstelling is verdere opschaling en vereenvoudiging in het ontwerp. Tevens wordt een natuurlijk werkmedium toegepast.
- ENCORE. De ontwikkeling naar warmteproductie voor hogere temperaturen wordt voortgezet in het TKI-JIP project ENCORE (TEEI118001). Doelstelling hier is om minimaal 180°C warmte te kunnen produceren met een compressiewarmtepomp op basis van nieuwe werkmedia. Tevens worden alternatieve concepten voor prestatieverbetering en kostendaling beproefd.
- KickStart. Dit project (MOOI42002) heeft tot doel tot veldtesten te komen voor twee full-scale warmtepompen bij twee eindgebruikers. Daarnaast worden proces geïntegreerde warmtepomp concepten ontwikkeld en worden niet-technologische barrières onderzocht.

6 Openbare publicaties

De volgende openbare publicaties zijn verschenen.

- Industrial heat pumps in the Netherlands, 2nd Conference on High-Temperature Heat Pumps, 9 September 2019, Copenhagen, Denmark
- High temperature heat pump developments, European Heat Pump Association (EHPA) – WEBINAR, 30-9-2020.

Op de TNO website is een projectpagina gewijd aan dit project

[Low Capex industriële warmtepomp | TNO](#)

De bevindingen uit dit project zijn ook meegenomen in een White paper dat TNO, samen met collega instituten in Europa heeft uitgebracht om meer aandacht te vragen voor de mogelijkheden van industriële warmtepompen in de verduurzaming van de industrie.

<https://publications.tno.nl/publication/34636827/LyEUaZ/TNO-2020-heatpump.pdf>

Na afloop van het project zullen de resultaten worden gebruikt voor verdere verspreiding van kennis en toepassingen van industriële warmtepompen.

7 Ondertekening

TNO

S. van Loo
Research Manager

S. Spoelstra
Auteur