

Cost reduction industrial heat pumps (CRUISE)

Openbare eindrapportage



BRONSWERK
HEAT TRANSFER BV

 **BUNGE**
Loders Croklaan

 **Cosun**

 **DOW**
®

IBK 

 Institute for
Sustainable
Process Technology

Lamb Weston 
SEEING POSSIBILITIES IN POTATOES

Nouryon

 **Smurfit Kappa**

TATA STEEL

TNO innovation
for life

In collaboration with:

FME  **POWERED
BY DUTCH
TECHNOLOGY**

Inhoud

1. Inleiding	3
2. Achtergrond en doelstelling	4
3. Resultaten	5
3.1 Kostenreducering.....	5
3.2 Compressie warmtepomp.....	6
3.3 Thermo-akoestische warmtepomp	8
3.4 Marktstudie	9
Acknowledgement	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	TEEI116085
Projecttitel	Cost reduction industrial heat pumps (CRUISE)
Penvoerder en medeaanvragers	ISPT (penvoerder), Bronswerk, Bunge Loders Crokiaan, Royal Cosun, DOW, ECN.TNO, IBK, LambWeston, Nouryon, Smurfit Kappa, Tata Steel, FME (third party)
Projectperiode	01/10/2016 – 31/012/2019

Contact en verkrijgbaarheid rapport

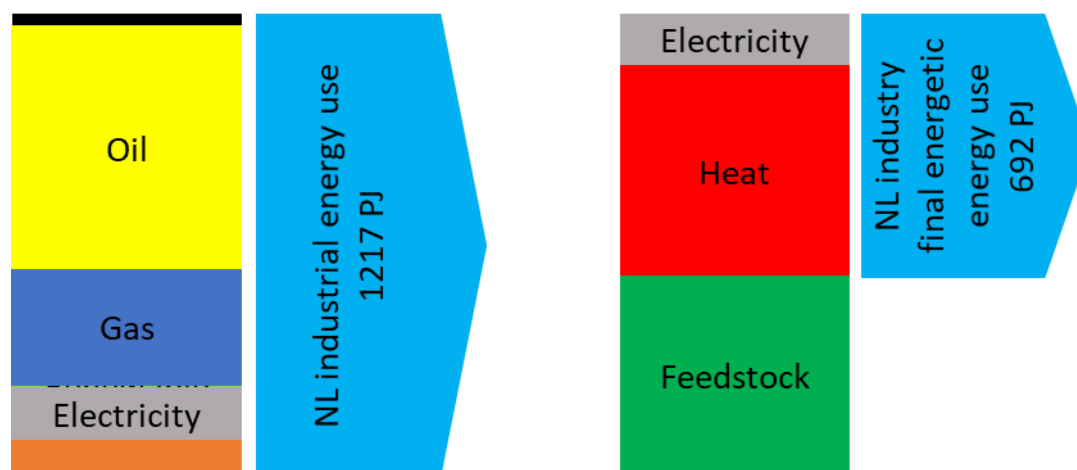
Exemplaren van dit rapport zijn te verkrijgen via <https://ispt.eu/projects/cruise/>

Contactpersoon voor dit project is:

- Penvoerder - Agata van Oosten (ISPT, agata.vanoosten@ispt.eu)
- Project Leader - Simon Spoelstra (TNO, simon.spoelstra@tno.nl)

2. Achtergrond en doelstelling

Het Nederlandse industriële energiesysteem wordt gedomineerd door het gebruik van warmte. Het finale energetische energiegebruik in de industrie bedroeg 692 PJ in 2018. Daarvan is 554 PJ (80%) nodig voor de warmtebehoefte, zie Figuur 1.



Figuur 1 Industriële energiebehoefte en functie in 2018

Tegelijkertijd lost de industrie grote hoeveelheden restwarmte in de omgeving op temperatuurniveaus die niet bruikbaar zijn in de eigen procesvoering. Een belangrijke optie om energie te besparen is om deze restwarmte te 'vangen' en weer opnieuw bruikbaar te maken. Hiervoor is het noodzakelijk warmtepomptechnologie te introduceren. Een warmtepomp is in staat om restwarmte op te waarden tot bruikbare proceswarmte. Hiermee wordt de inkoop van fossiel energiedragers teruggedrongen en bespaart op kosten en CO₂-emissies. Een warmtepomp wordt veelal aangedreven met elektriciteit. Wanneer deze elektriciteit van duurzame oorsprong is, worden de totale emissies nog verder teruggedrongen.

De verwachting is dat warmtepomptechnologie oplossingen biedt tot temperatuurniveaus tot circa 200°C. Technologieontwikkeling is gaande om het werkingsgebied van warmtepompen op te rekken tot dergelijke temperaturen.

Het nadeel van een warmtepomp ten opzicht van conventionele technologie, is dat er een veel grotere investering nodig is. Deze investering moet worden terugverdiend door verlaging van de operationele kosten. Business case analyses laten zien dat in het algemeen de terugverdientijden voor deze technologie te lang zijn voor industriële eindgebruikers. Daarom is er innovatie nodig die tot verlaging van de investeringskosten in warmtepomptechnologie gaat leiden.

Doelstelling

De overall doelstelling van het ontwikkelingstraject, waar dit project een onderdeel van uitmaakt, is om warmtepomptechnologie te ontwikkelen en te implementeren. Deze warmtepomptechnologie moet op economisch haalbare wijze warmte produceren en kunnen worden toegepast in een groot aantal sectoren, met name (petro)chemie, raffinage, voeding en papier.

Meer specifiek is dit project er op gericht om aan te tonen dat de investeringskosten van een industriële warmtepomp kunnen worden verlaagd tot 150-200 €/kWth, hetgeen meer dan een halvering is van de huidige kosten. Concreet worden hierbij 2 technologieën onderzocht, een compressie warmtepomp en een thermo-akoestische warmtepomp. Naast een kostenreductiestudie wordt ook experimentele verificatie van deze concepten uitgevoerd.

3. Resultaten

3.1 Kostenreducering

Voor het vaststellen van de mogelijke kostenreductie van een compressiewarmtepomp zijn de volgende stappen genomen:

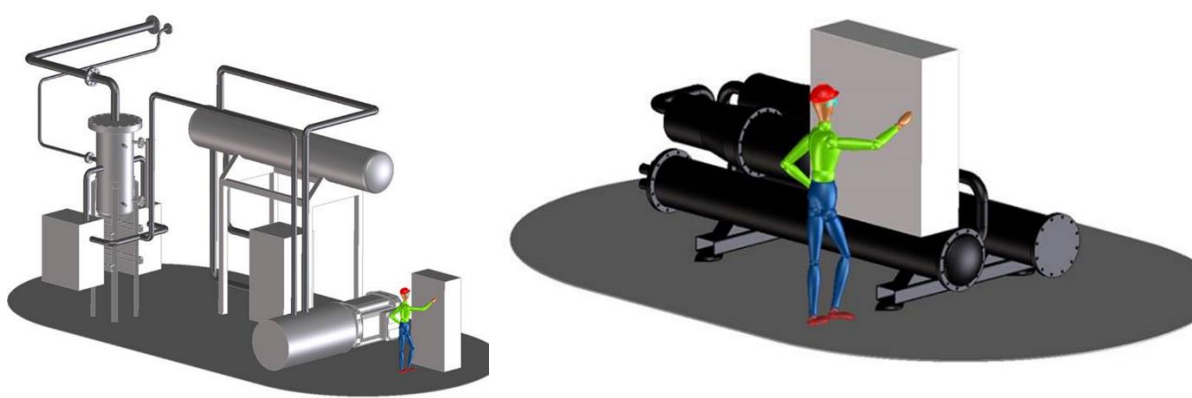
- Identificeren van de factoren die de investeringskosten van de warmtepomp bepalen. Daarbij wordt iedere fase van idee tot realisatie van een warmtepomp beschouwd.
- Vaststellen van de opties voor kostenreductie van elk van deze factoren
- Ontwerp een warmtepomp op basis van de kostenreductieopties en kwantificeer de kostenreductie

De volgende opties voor kostenreductie zijn geïdentificeerd:

- Gebruik niet-brandbaar werkmedium;
- Vereenvoudig ontwerp;
- Serieproductie;
- Reduceer compressor kosten.

De kostenreductiestudie voor de compressiewarmtepompen laat zien dat door seriematige bouw en toepassing van ander typen compressoren de investeringskosten minimaal kunnen halveren van de huidige 500 €/kWth naar 250 €/kWth voor een systeem op 2 MW schaal. Op basis van deze uitgangspunten is een conceptueel ontwerp gemaakt van een 2 MW warmtepomp.

Dit ontwerp is gemaakt op basis van een niet-brandbaar werkmedium, waarbij het ontwerp voortborduurde op industriële koelinstallaties. Conventionele shell-and-tube warmtewisselaars worden toegepast die direct als frame dienen en opslag van werkmedium. Verder wordt er directe expansie toegepast en wordt het aantal sensoren geminimaliseerd. Tenslotte wordt een semi-hermetische compressor toegepast, een veelgebruikt compressor type in andere toepassingen. Het nadeel van al deze kostenreductiemaatregelen is dat de flexibiliteit van het systeem qua bedrijfscondities en vermogen gelimiteerd is. De verschillen tussen de twee ontwerpen (voortborduren op experimentele installatie en geoptimaliseerd) is weergegeven in Figuur 2.

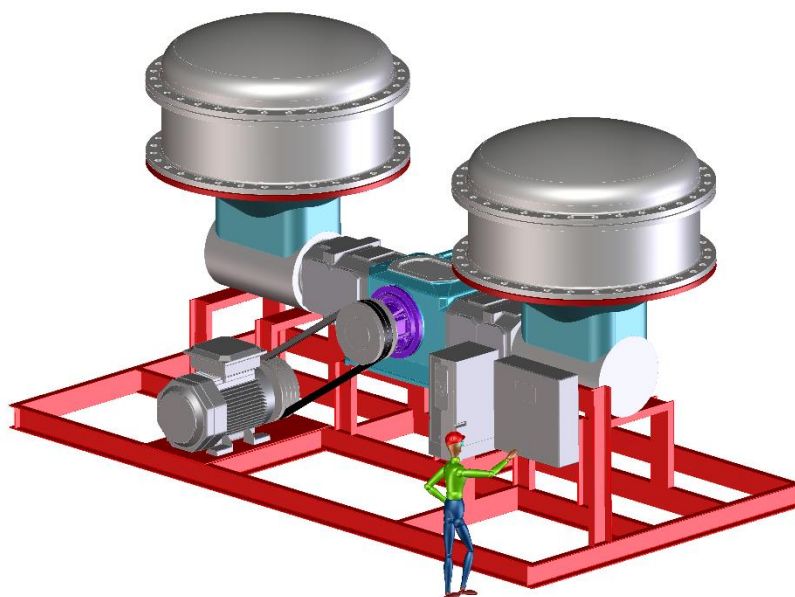


Figuur 2 Ontwerpen voor een 2 MW warmtepomp, opgeschaald vanuit pilotinstallatie (links) en vereenvoudigd ontwerp (rechts)

Voor de thermo-akoestische warmtepomp (TAWP) is met name gekeken naar het ontwerpen van een compact systeem. De thermo-akoestische systemen, die tot dusverre zijn ontworpen en gebouwd, hebben

een akoestische resonator die het mogelijk maakt op basis van een relatief kleine zuigercompressor een grote drukamplitude te genereren. Bij het opschalen van deze systemen moeten compressoren worden toegepast met een lagere frequentie, hetgeen tot langere resonatoren leidt. Deze resonatoren leiden tot zeer hoge kosten. Binnen dit project wordt een ontwerp gemaakt voor een compacte TAWP zonder resonator en het effect hiervan op de kosten geëvalueerd.

De afmetingen en het volume van dit compacte ontwerp zijn sterk gereduceerd ten opzichte van het ontwerp met resonator. Een 3D ontwerp van de compacte warmtepomp wordt getoond in Figuur 3. De warmtepomp bestaat in dit voorbeeld uit een zuiger compressor (type boxer) met twee zuigers en twee warmtepomp modules. Beide modules bestaan intern uit twee helften. Het thermische vermogen is typisch 2 tot 4 MW. De zuigercompressor wordt aangedreven door middel van een elektromotor.



Figuur 3 Ontwerp van de compacte TA ontwerp met twee warmtepomp modules

Vervolgens is de vermogensdichtheid van het systeem sterk verhoogd door de drukamplitude te verhogen en zijn verbeterde warmtewisselaars geïmplementeerd. Uiteindelijk wordt een kostenniveau van 268 €/kWth berekend. Het grootste aandeel hierin (> 50%) komt voor rekening van de compressor. Verdere kostendaling is mogelijk bij serieproductie van deze compressor.

3.2 Compressie warmtepomp

Voor het experimentele werk aan de compressiewarmtepomp is als uitgangspunt de machine genomen die in een eerder project (STEPS) door IBK is gebouwd. Dit is een compressiewarmtepomp met twee compressoren, twee verdampers en pentaan als werkmedium. Deze warmtepomp, met een thermische output van circa 200 kW, is in staat om stoom van 150°C te produceren uit restwarmte van circa 60°C. Het gebruik van pentaan noodzaakt het nemen van de nodige maatregelen om explosies te voorkomen. Deze maatregelen vergen de nodige investeringen. Binnen het huidige project is het brandbare werkmedium pentaan in de installatie vervangen door een HFO (HydroFluoroOlefin). Meer specifiek is R1336mzz-Z toegepast. Dit synthetische werkmedium wordt door Chemours op de markt gebracht en is ook door Chemours ter beschikking gesteld aan het project. Het toepassingsgebied qua temperaturen is vergelijkbaar met pentaan. Experimenten zijn uitgevoerd om de prestaties in termen van efficiency en

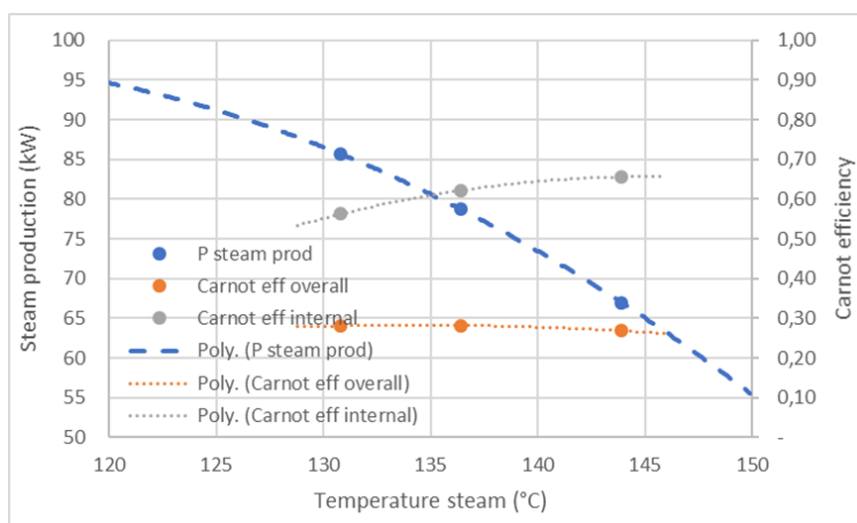
vermogensdichtheid te vergelijken met pentaan. Binnen CRUISE is één verdamper en één compressor toegepast.

Figuur 4 toont een foto van de warmtepomp, gekoppeld aan de test rig. De test rig is bedoeld om de temperatuurcondities van een industrieel proces te simuleren.



Figuur 4 Samenstel van warmtepomp en test rig

Figuur 5 toont de prestatie van de warmtepomp als functie van de leveringstemperatuur bij een restwarmtetemperatuur van 85°C. Het interne (thermodynamische) rendement is zoals verwacht. Het externe rendement blijft achter door een overgedimensioneerde elektromotor.



Figuur 5 Prestaties van compressiewarmtepomp als functie van leveringstemperatuur, restwarmtetemperatuur is 85°C

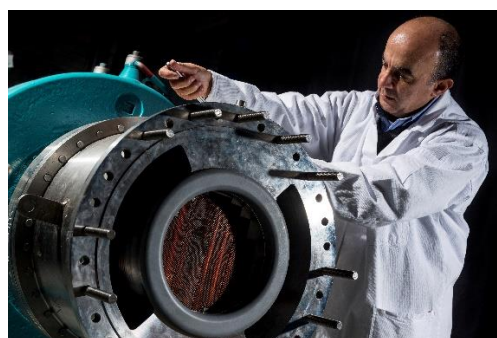
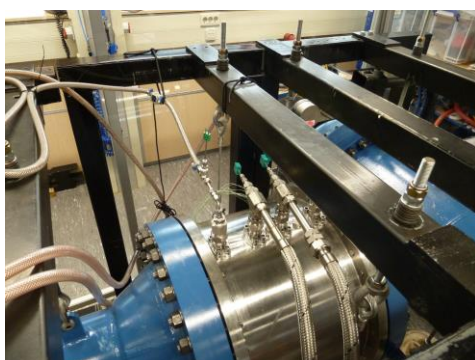
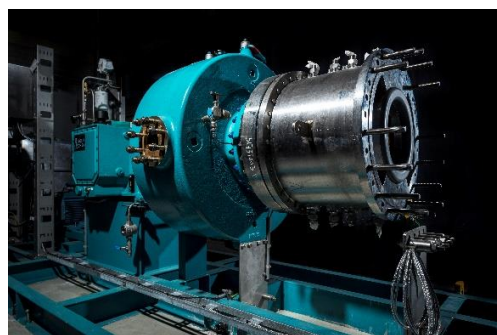
Ten opzichte van Pentaan presteert R1336mzz-Z circa 10% slechter. Alhoewel vergelijkbare prestaties waren verwacht, is dit geen slecht resultaat gezien het feit dat het systeem niet is ontworpen voor R1336mzz-Z. Het geeft in ieder geval aan dat het mogelijk is met een synthetisch werkmedium eveneens hoge-temperatuur warmte in de vorm van stoom te genereren. De verwachting is dat met het geteste werkmedium in combinatie met een geschikte olie vergelijkbare prestaties, zowel qua leveringstemperatuur als qua rendement kunnen worden behaald als Pentaan.

3.3 Thermo-akoestische warmtepomp

Een belangrijke component in een elektrisch aangedreven TAWP is de akoestische aandrijving. Dit is in essentie een heen en weer gaande zuiger die wordt aangedreven door een elektrische motor. Deze zuiger comprimeert en expandeert het gas in de resonator. Door de resonator zal de drukamplitude sterk oplopen en voldoende effectief worden om een warmtepomp aan te drijven. Indien een systeem wordt toegepast zonder resonator, loopt de drukamplitude niet meer op door resonantie en moet de uiteindelijk drukamplitude volledig door de zuiger worden geleverd. Dit betekent dat voor eenzelfde systeem er een veel grotere zuiger moet worden toegepast voor een systeem zonder resonator dan een systeem met resonator.

Binnen dit project is gekozen om een bestaande warmtepomp (TASTE project, TEEI314009) te koppelen aan een nieuwe, grotere, compressor. Deze compressor moet in staat zijn om een drukamplitude van 5-10% te realiseren bij een gemiddelde druk van 50 bar Helium. Dit stelt eisen aan de zuigerdiameter en verplaatsing om beoogde drukamplitude te halen. Door Howden Thomassen Compressors is een zuigercompressor gebouwd die in staat moet zijn de beoogde drukamplitude te realiseren in de TAWP.

Figuur 6 laat zien hoe het systeem met resonator is omgebouwd tot een compacte warmtepomp, zonder resonator. Links is het systeem met akoestische resonator te zien, terwijl rechts het compacte systeem zichtbaar is. Het groene deel is de P123 compressor van Howden. De cilinder en zuiger van de P123 compressor zijn aangepast voor deze toepassing. Het RVS deel is de daadwerkelijke warmtepomp. Deze warmtepomp wordt aangesloten op een (instelbare) warmtebron om restwarmte te simuleren. Daarnaast wordt warmte afgevoerd op een eveneens instelbare temperatuur. Bij de heersende temperatuur condities wordt de prestatie van de warmtepomp vastgesteld.



Figuur 6 Thermo-akoestische warmtepomp met resonator (links) en als compact systeem (rechts)

Aandachtspunt in het ontwerp en de operatie van de compressor betreffen het beperken van de mechanische belasting op het drijfwerk van de compressor. Hiervoor is een bypass constructie ontworpen die de belasting bij het opstarten vermindert. Zodra de compressor op toeren is, kan deze bypass worden gesloten. Nadat de compressor (na initiële lekproblemen) werd gestart, bleek bij het verhogen van het

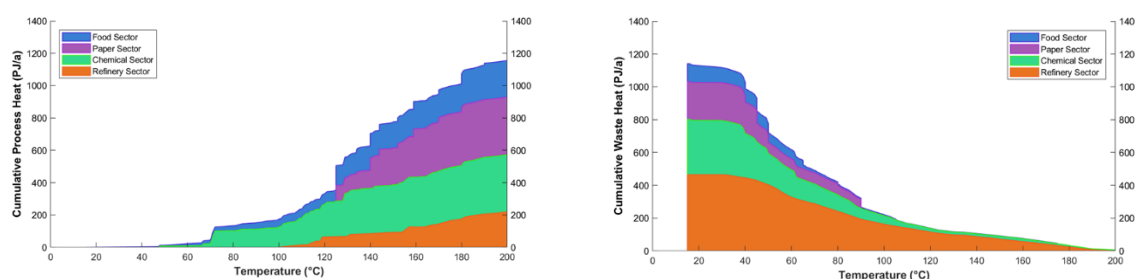
toerental dat het beoogde operationele gebied niet kon worden bereikt. Oorzaak hiervan blijkt een kleine opening in de (tijdelijke) bypass leiding te zijn. Deze geeft zeer veel verliezen en moet worden verwijderd. Ondanks de lage drukamplitude was een duidelijk pompwerking zichtbaar. De thermokoppels in het systeem lieten een snelle opbouw van een temperatuurgradiënt over de regenerator zien, waaruit blijkt dat er warmtepompwerking plaatsvindt.

3.4 Marktstudie

Om de markt voor industriële warmtepompen te bepalen is een bottom-up analyse gemaakt van toepassingen in de EU-28. De volgende stappen zijn daarin genomen:

- Verzamelen van specifieke procesgegevens van verschillende industriële processen. Daarbij gaat het om gegevens over de warmtebehoefte per eenheid van product en het temperatuurniveau van deze warmtebehoefte. Tevens wordt de vrijkomende restwarmte geïnventariseerd. Daarnaast wordt ook de typische capaciteit van een fabriek voor dit proces opgegeven. Procesdata is verzameld voor de papier industrie en de voedingsmiddelenindustrie. Voor de chemie & raffinage sector is gebruik gemaakt van een database aan destillatiekolommen.
- Op basis van deze informatie kan worden vastgesteld of in dit proces een warmtepomp toepasbaar is. Daarbij is gekeken of de proceswarmte temperatuur $< 200^{\circ}\text{C}$ is en de temperatuurlift $< 100^{\circ}\text{C}$. Tevens wordt onderzocht of de warmtepomp aan weerszijden van de pinch temperatuur ligt.
- De prestatie van de warmtepomp onder gegeven condities wordt berekend. Hierbij wordt een vereenvoudigde aanname gedaan dat de warmtepomp 50% van het maximaal haalbare rendement haalt.
- De gegevens die worden verkregen voor een individueel proces worden opgeschaald naar sectoren, landen en EU-28 op basis van productiestatistieken van de EU (Prodcom database). Hierbij is als referentiejaar 2016 gebruikt.

In Figuur 767 is de cumulatieve proceswarmte tot 200°C (links) en restwarmte (rechts) weergegeven voor de processen die opgenomen zijn in deze studie. De overall behoefte is lager dan resultaten uit top-down studies. Dit komt met name door het beperkte temperatuurbereik van de huidige studie en het ontbreken van een aantal processen in de huidige studie (met name in voedingsmiddelenindustrie).



Figuur 76 Cumulatieve proceswarmte tot 200°C (links) en restwarmte (rechts) in geselecteerde sectoren binnen de EU-28

Vervolgens is het marktpotentieel van industriële warmtepompen per sector in de EU-28 bepaald. De bottom-up marktstudie toont waardevolle resultaten betreffende het toepassingspotentieel van industriële warmtepompen in de EU-28 tot een leveringstemperatuur van 200°C . Op basis van beschikbare gegevens wordt een marktpotentieel van 24.6 GW berekend, welke 655 PJ warmte leveren aan industriële processen. De studie heeft tevens het inzicht vergroot in de gewenste capaciteiten van een industriële warmtepomp. De grote aantallen, en dus mogelijkheden voor serieproductie, zitten bij vermogensgroottes < 10 MW. De marktstudie kan verder worden verbeterd door betere beschikbaarheid van procesgegevens.

4. Bijdrage aan doelstelling van de regeling

Duurzame energiehuishouding

De beoogde markt voor de industriële warmtepomp is de warmtevraag in het temperatuurinterval tot 200°C in energie-intensieve sectoren zoals (petro)chemie, raffinage, voeding en papier. De warmtebehoefte in dit temperatuurgebied zou in principe volledig kunnen worden gedekt vanuit door de combinatie warmtepompen en restwarmte. De warmtebehoefte in genoemde sectoren tot een temperatuur van 200°C bedraagt naar schatting 170 PJ/jaar.

Het energiebesparingspotentieel door toepassing van warmtepompen wordt berekend op basis van 8000 bedrijfsuren per jaar. Als referentietechnologie wordt een gasgestookte ketel met een rendement van 85% beschouwd. Het parkrendement voor elektriciteit bedraagt 54,5%¹. Het rendement van een warmtepomp, de COP (Coefficient of Performance), is sterk afhankelijk van de temperatuurscondities van de toepassing. Voor een aantal cases wordt de COP en daarmee besparing uitgerekend en geëxtrapoleerd naar de totale potentieel voor genoemde sectoren. In Tabel 1 is de primaire energiebesparing uitgerekend voor een drietal industriële cases. De primaire energiebesparing bedraagt bij alle cases meer dan 60%.

Tabel 1 Primaire energiebesparing industriële warmtepomp voor een drietal cases

	Boiler		Warmte pomp		Boiler		Warmte pomp	
Restwarmte temperatuur (°C)	80		90		120			
Proceswarmte temperatuur (°C)	120		150		180			
Warmtevraag (MW)	10		2.7		1			
Bedrijfsuren (uren/jaar)	8000		8000		8000			
Efficiency/COP (-)	0.85	4.4	0.85	4.1	0.85	4		
Elektriciteitsvraag (MW)		2.3		0.66		0.25		
Primair energiegebruik (TJ/yr)	339	120	91	35	34	13		
Primaire energiebesparing (%)		65		62		62		

De maximale energiebesparing voor de Nederlandse industrie kan worden berekend door het hiervoor vastgestelde besparingspercentage toe te passen op de warmtebehoefte onder de 200°C in beoogde sectoren. Deze 60% besparing toegepast op een warmtevraag van 170 PJ/jaar, levert een besparing op van circa **100 PJ/jaar**.

De directe verduurzaming in termen van reductie van CO₂ emissies kan worden berekend door de CO₂-emissie van de gasgestookte boiler (56 kg/GJ) te vergelijken met de CO₂-emissie van de elektriciteitsproductie voor de warmtepomp (0,45 kg/kWh²). Indien de volledige warmtevraag wordt vervangen door elektrisch aangedreven warmtepompen, resulteert een CO₂-emissie reductie van circa **5 Mton/jaar**. Deze emissiereductie neemt verder toe bij het verduurzamen van de elektriciteitsproductie.

¹ CBS, CO₂-emissiefactor, fossiel energieverbruik en rendement voor elektriciteit bij gebruiker, cijfers 2017, integrale methode

² CBS, CO₂-emissiefactor, fossiel energieverbruik en rendement voor elektriciteit bij gebruiker, cijfers 2017, integrale methode

5. Spin off

Al voor de afloop van dit project heeft dit project geresulteerd in meerdere follow-up projecten.

- **LOW CAPEX.** Kennis uit het CRUISE project is ook gebruikt voor het opzetten van het TKI-JIP project LOW-CAPEX (TEEI117006), waarbij het doel is om op industriële schaal en tegen lage kostprijs stoom te produceren van 120°C. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een synthetisch werkmedium.
- **FUSE.** Het TKI-JIP project FUSE (TEEI118008) bouwt voort op het tweetraps concept zoals dat binnen STEPS is ontwikkeld voor hoge temperaturen. Doelstelling is verdere opschaling en vereenvoudiging in het ontwerp. Tevens wordt een natuurlijk koudemiddel toegepast.
- **COMTA.** De thermo-akoestische activiteiten worden vervolgd in het TKI-JIP project COMTA (TEEI118003) waarbij een compact thermo-akoestisch systeem, met perspectief op significante kostendaling wordt ontwikkeld.
- **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.

6. Openbare publicaties

- Project webpagina: <https://ispt.eu/projects/cruise/>
- Poster gepresenteerd op ISPT annual conference in November 2017, 2018 en 2019 (zie ook <https://ispt.eu/projects/cruise/>)
- *Wetenschappelijke publicatie*: Er is een paper ingediend bij **Renewable & Sustainable Energy Reviews** getiteld “An estimation of the European industrial heat pump market”. Hierin wordt een beschrijving gegeven van de Europese warmtepompmarkt in termen van aantallen applicaties, procestemperaturen en benodigde vermogens.
- Publieke samenvatting beschikbaar op de webpagina's van ISPT (<https://ispt.eu/news/innovation-tuesday-offers-perspective-reduction-co2-footprint-energy-costs-industry/>), TNO (<https://www.tno.nl/en/focus-areas/energy-transition/roadmaps/towards-co2-neutral-industry/making-industrial-heat-management-more-sustainable/cruise-cost-reduction-industrial-heat-pumps/>), TKI E&I (<https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/cost-reduction-industrial-heat-pumps-00027522>) en RVO (<https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/projecten/cost-reduction-industrial-heat-pumps>).
- Workshops: Twee Innovation Thursdays georganiseerd in samenwerking met FME.
- Openbaar CRUISE rapport beschikbaar op <https://ispt.eu/projects/cruise/>
- Newsitems:
 - Over de Innovation Thursday (<https://ispt.eu/news/innovation-tuesday-offers-perspective-reduction-co2-footprint-energy-costs-industry/>)
 - Over et afsluiten van project en publicatie openbaar eind rapport (wordt beschikbaar op <https://ispt.eu/projects/cruise/>)
- LinkedIn post over et afsluiten van project en publicatie openbaar eind rapport (wordt beschikbaar op <https://www.linkedin.com/company/institute-for-sustainable-process-technology/>)

Acknowledgement

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



TOPSECTOR ENERGIE
Empowering the new economy

