

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Postbus 15
1755 ZG Petten

www.tno.nl

T +31 88 866 50 65

TNO-rapport

TNO 2019 R10568

**Hoge temperatuur stoom producerende
thermo-akoestische warmtepomp**

Datum	18 april 2019
Auteur(s)	J.A. Lycklama à Nijeholt (TNO) M.E.H. Tijani (TNO) J. van der Kamp (BHT) R. van der kaaden (BHT) R Groen (BHT) A. Langelaar (HTC) N. Albers (HTC) T.van Haasteren (SK) C. Biesheuvel (Dow)
Aantal pagina's	11
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	TASTE
Projectnummer	060.33642

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.

© 2019 TNO

Inhoudsopgave

1	Uitgangspunten en doelstellingen van het project	3
1.1	Achtergrond	3
1.2	Doelstellingen	3
1.3	Consortium	4
2	Resultaten	5
2.1	Toepassingen	5
2.2	TASTE thermo akoestische warmtepomp	5
2.3	Industrieel ontwerp	6
2.4	Economische haalbaarheid en Marktpotentieel	7
3	Knelpunten en toepassingsperspectief	8
4	Bijdrage aan doelstelling van de regeling	9
4.1	Verduurzaming	9
4.2	Versterking kennispositie	9
4.3	Spin-off binnen en buiten de sector	9
5	Publicaties	10
6	Ondertekening	11

1 Uitgangspunten en doelstellingen van het project

1.1 Achtergrond

Het totale energiegebruik in Nederland bedraagt 3040PJ (2017). Hierin neemt de industrie met 46% of 1500PJ een groot deel voor zijn rekening, zie Figuur 1. Het industriële energiegebruik kan verder opgesplitst worden in warmte (40%), elektriciteit (20%) en gebruik als grondstof (40%). Industrieel warmtegebruik vormt een aanzienlijk deel (bijna 20%) van het totale primaire energiegebruik in Nederland. Dit komt overeen met 600 PJ aan energieverbruik. Verlaging van dit warmtegebruik is dus essentieel om de Nederlandse klimaatdoelen te realiseren. Hiermee zijn tevens significante kostenbesparingen te realiseren aangezien circa 5 miljard aan brandstofkosten (vooral aardgas) worden gemaakt voor de productie van warmte.



Figuur 1 Opbouw van het nationale (links) en industriële (rechts) primaire energiegebruik.

Warmte wordt over een breed temperatuurbereik industrieel aangewend. Warmte met temperaturen tussen 100°C en 250°C wordt gebruikt om materialen op te warmen, voor droogprocessen, en voor reactie en scheidingsprocessen (destillatie). Conversie processen in staalproductie, keramiek, glas, cementproductie, en kraakprocessen vragen veel hogere temperaturen van boven de 600°C. Simultaan aan de warmtevraag komt het grootste deel van de proceswarmte weer vrij als restwarmte op lagere temperatuur tussen typisch 50°C en 150°C. Het ligt daarom voor de hand om deze restwarmte te recyclen. Hiervoor zijn warmtepompen geschikt. Restwarmte kan met een warmtepomp worden opgepompt naar proceswarmte. Huidige technisch beschikbare warmtepomp technologieën kennen echter een lagere temperatuur lift en te een te lage leveringstemperatuur waardoor de toepassing van warmtepompen in de industrie nog beperkt is. Met de ontwikkeling van de thermo-akoestische warmtepomp (TAWP) die gekenmerkt wordt door een hoge warmteleveringstemperatuur en hoge lift kan in de toekomst worden voorzien in industriële koolstofvrije proceswarmte.

1.2 Doelstellingen

De doelstelling van TASTE project is de ontwikkeling van een stoom producerende TAWP. Met de TAWP kan proceswarmte tussen 150°C en 200°C worden geproduceerd door gebruik te maken van restwarmte tussen 80-120°C. Doel van het project is om de technische en economische haalbaarheid van de TAWP te onderzoeken voor stoomproductie tussen 8-10 bar.

Doel is dat investeringskosten binnen vijf jaar door besparing in brandstofkosten worden terug verdiend. Ook zal het technische toepassingspotentieel van de TAWP binnen de industrie worden bepaald.

1.3 Consortium

Het TASTE project is uitgevoerd met technologieleveranciers Bronswerk Heat Transfer en Howden Thomassen Compressors. Dow Benelux B.V. en Smurfit Kappa Paper Services zijn als industriële eindgebruikers betrokken. ECN/TNO is als kennisinstituut en penvoerder betrokken in het TASTE project.

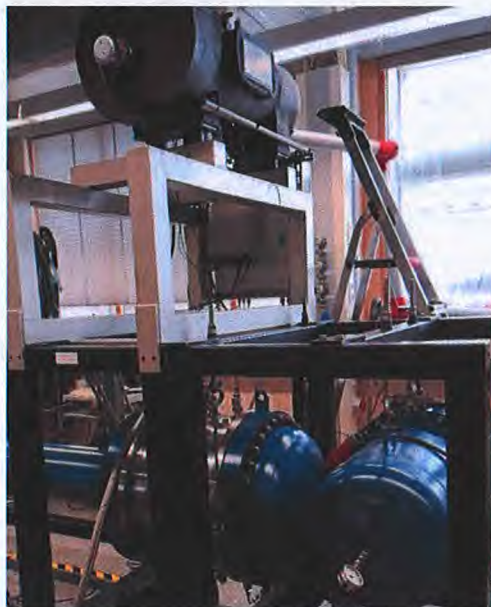
2 Resultaten

2.1 Toepassingen

De randvoorwaarden die vanuit de eindgebruikers gesteld worden aan de TAWP zijn bepaald via een tweetal case studies voor het papierproductie proces van Smurfit Kappa in Roermond en voor Dow in Terneuzen. Via deze case studies is gekeken naar de inpassing van de TAWP in een industrieel productieproces. De gewenste temperatuurniveaus, type processtromen, beschikbare restwarmte, de proces warmtevraag, en het energie- en kostenbesparingspotentieel zijn berekend aan de hand van case studies. De cases laten zien dat de TAWP goed inpasbaar is in het papierproductieproces van SK en de DOWLEX fabriek bij Dow in Terneuzen qua temperatuur niveaus en thermisch vermogen. De cases bevestigen het energiebesparingspotentieel van de stoom producerende TAWP. Besparingen tot 30% op het primaire energiegebruik zijn mogelijk. De restwarmtestromen zijn zeer verschillend in beide cases. In de DOWLEX plant vindt er een sterke afkoeling plaats van de restwarmte stroom. Dit is niet het geval bij SK. Beide cases onderstrepen het voordeel van het brede temperatuurwerkgebied van de TAWP. Zonder aanpassingen kan warmte over een groot bereik aan bron en/of afgifte temperaturen worden gepompt, zelfs met sterke afkoeling van de restwarmtestroom met behoud van een hoge coëfficiënt of performance (COP).

2.2 TASTE thermo akoestische warmtepomp

Een nieuwe bench scale testopstelling is gerealiseerd door BHT en getest bij ECN/TNO. Het thermo-akoestisch ontwerp is door middel van simulatie software en ontwerp regels ontworpen door ECN/TNO. BHT heeft met ECN/TNO dit conceptuele ontwerp uitgewerkt tot het mechanische ontwerp. BHT heeft naast de bouw van de TAWP ook het voedingswater en het stoom afvang systeem (stoomvaatje) gerealiseerd. De TASTE warmtepomp is door ECN/TNO in het laboratorium getest. Het voedingswater/stoomafvangsysteem en de lage temperatuur warmtewisselaar zijn gekoppeld aan de bestaande warmte testinfrastructuur van ECN/TNO.



Figuur 2 De TAWP (blauwe deel) met hierboven het water/stoom vaatje (zwart).

Meetresultaten laten zien dat het mogelijk is om stoom te produceren zonder tussenkomst van een thermisch circuit. De warme warmtewisselaar in het hart van de TASTE warmtepomp fungeert als verdamper van voedingswater. Belangrijke doelstelling uit het TASTE project is hiermee bereikt en internationaal is dit een unieke prestatie. De maximale gemeten stoomtemperatuur is ongeveer 170°C. Hogere temperaturen zijn mogelijk als de isolatie van het stoomvat wordt verbeterd.

De akoestische verliezen zijn sterk gereduceerd ten opzichte van de vorige bench scale TAWP (HPSEPS) maar wel hoger dan voorspeld waardoor de akoestische drukamplitude lager is dan mag worden verwacht. Ten gevolge van de hoge lift en lage akoestische druk is het thermische vermogen veel lager dan de ontwerpwaarde.

De interne warmtelek is significant en wordt veroorzaakt door convectieve warmtelek ten gevolge van akoestische streaming. Een deel van de bronzijdig toegevoerde warmte en opgepompte warmte lekt hierdoor weg. De relatieve Carnot efficiëntie op basis van de regeneratortemperatuur bedraagt 40%. Hieruit blijkt dat de thermo-akoestische efficiency behoorlijk goed is.

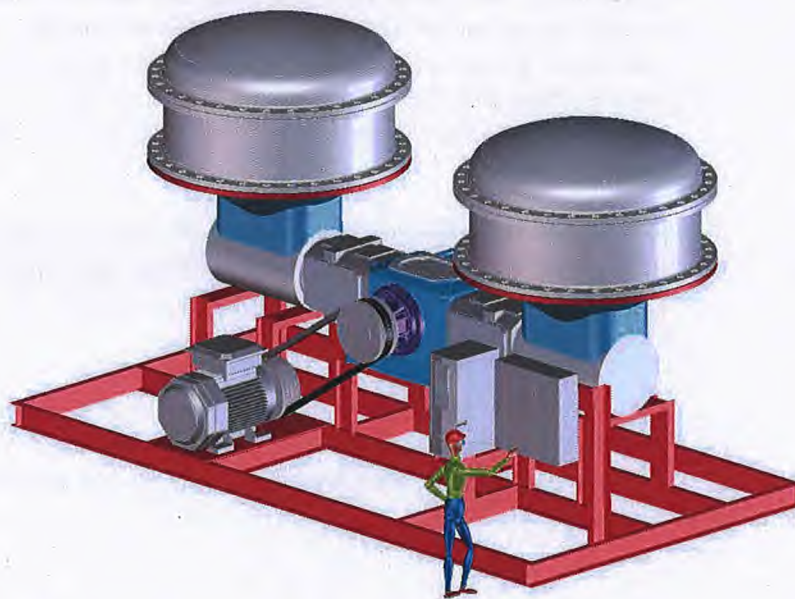
Eind conclusies van de experimenten is dat de TASTE warmtepomp onder een brede range aan temperaturen warmte kan leveren tussen 110°C en 170°C en met een hoge (interne) temperatuur lift van meer dan 100°C. Aanbeveling voor de verdere ontwikkeling van de warmtepomp is het verbeteren van de warmtewisselaars waardoor de COP stijgt. Tweede aanbeveling is het beperken van de streaming en verlagen van de akoestische verliezen in de warmtepomp.

2.3 Industrieel ontwerp

Een conceptueel ontwerp van een full scale industriële TA warmtepomp is gemaakt. Deze dient enerzijds om de schaalbaarheid van de technologie aan te tonen en anderzijds om de kosten, het rendement, en het economisch potentieel te onderzoeken. Project partner BHT heeft een kostenschatting en ontwerp informatie

voor de warmtewisselaars en het ontwerp van het drukvat gemaakt. HTC heeft kosteninformatie en de selectie en het ontwerp van de zuigercompressor aangeleverd.

De ontwerpstudie toont aan dat het technisch mogelijk is om de TAWP op te schalen tot maximaal 30 MW voor een modulair en compact systeem zonder resonator, zie Figuur 3. Conclusie van de studie is dat dit compacte ontwerp zonder resonator vanuit praktisch en economisch perspectief het meest kansrijk is. De compacte warmtepomp wordt aangedreven door een elektrisch aangedreven zuigercompressor van 2, 4, 6 of 8 zuigers.



Figuur 3 Mechanisch ontwerp (concept) van de industriële TAWP.

2.4 Economische haalbaarheid en Marktpotentieel

De marktstudie laat zien dat boven de 120 °C de warmtevraag binnen de EU minimaal 4,5 GW bedraagt. In deze studie is gekeken naar de beschikbaarheid van restwarmte op voldoende hoge temperatuur. Werkelijk potentieel is minimaal een factor 2 tot 4 hoger vanwege de beperkte beschikbaarheid van procesdata. Onder de 120 °C komen compressie warmtepompen commercieel beschikbaar tegen een naar verwachting lagere kostprijs.

Eindconclusie is dat de afzet markt voor de TAWP zeer groot is. Minimaal honderden units kunnen alleen al in de EU worden afgezet als hoge temperatuur warmtepomp (>120°C). De terugverdientijd ligt tussen de 3 en 5 jaar voor warmte levering in combinatie met een hoge lift tussen 60 en 80 graden. Verder kostenreductie zijn wenselijk, zeker in de huidige markt met lage kosten voor CO₂ en gewenste terugverdientijd van maximaal 1 tot 3 jaar.

3 Knelpunten en toepassingsperspectief

Om de TAWP tot een succesvol product door te ontwikkelen is een verbetering van de COP noodzakelijk. Uit de analyse van de meetresultaten met de TASTE bench scale warmtepomp is gebleken dat een aantal effecten de COP beperken:

1. Warmteverliezen ten gevolge van interne warmtelekkage;
2. Te lage efficiency van de warmtewisselaars;
3. Akoestische verliezen.

Ten gevolge van interne warmtelekkage lekt opgepompte warmte weg naar koudere delen van de TAWP. Dit wordt veroorzaakt door circulatie van helium in het inwendige van de warmtepomp. Een oplossing die de heliumcirculatie en warmtelek stopt is onder atmosferische condities getest (lucht) in het TASTE project. Deze oplossing wordt onder realistische condities (hoge druk) in het vervolg project (COMTA) getest.

Het warmte-overdragend oppervlak van de warmtewisselaars is te klein gebleken waardoor er een te groot temperatuurverschil tussen helium en de externe thermische media (olie en water/stoom) kon ontstaan. Aanpassingen van de huidige warmtewisselaars zijn nodig.

De akoestische druk is lager dan verwacht. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door hogere akoestische verliezen dan voorzien. Aanbeveling is om een nadere analyse op mogelijke akoestische verliesmechanismen te doen.

4 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

4.1 Verduurzaming

De ontwikkeling van de TAWP past goed in de programmalijn 'volgende generatie warmtevoorzieningssystemen'. De casestudies met Smurfit Kappa en Dow bevestigen het energiebesparingspotentieel van de stoom producerende TAWP. Besparingen tot 30% op het primaire energiegebruik zijn mogelijk op basis van het huidige elektriciteitsopwekkingsrendement. Met de toename in duurzame elektriciteitsproductie zal dit percentage snel kunnen stijgen tot eindelijke koolstof-vrije warmtelevering met de warmtepomp.

4.2 Versterking kennispositie

TASTE heeft geleid tot een verdere versterking van de kennispositie van de projectpartners op het gebied van de thermo akoestische warmtepomp voor toepassing in de industrie. De samenwerking met de compressorleverancier Howden heeft tot een nieuwe industrieel modulair TA warmtepompconcept opgeleverd. Directe stoomproductie op 170°C zonder tussenkomst van een thermisch circuit in de TASTE bench scale TAWP zijn wereldwijd uniek te noemen.

4.3 Spin-off binnen en buiten de sector

Doordat de TAWP onder een zeer brede range aan bron en afgifte temperaturen kan opereren is de potentiële toepassing binnen en buiten de industrie groot. Dit wordt tevens onderstreept door de ontwikkeling van een elektrisch aangedreven warmtepomp voor de gebouwde omgeving door TNO en BHT. Ook is in het verleden door ECN/TNO contractresearch verricht voor onder andere de automotive sector. Spin-off richting TA conversie van hoge temperatuur restwarmte naar elektriciteit behoort ook tot de mogelijkheden.

5 Publicaties

Resultaten van het TASTE project zijn tot op twee conferenties gepresenteerd:

J.A. Lycklama à Nijeholt, Recent developments at ECN on Thermoacoustic heat pump technology, 4th International Conference on Industrial Waste Heat Valorisation, Kortrijk, Belgium 23-24 May 2016.

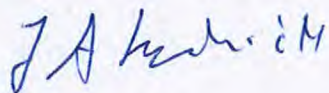
M.E.H. Tijani, Development of a thermoacoustic heat pump for distillation column, 2th IEA Heat Pump Conference Rotterdam 2017.

Voor vragen over het TASTE project kunt u zich wenden tot Jan Aiso Lycklama à Nijeholt, jan-aiso.lycklamaanijeholt@tno.nl, tel.: 088 866 25 87.

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

6 Ondertekening

Petten, 18 april 2019

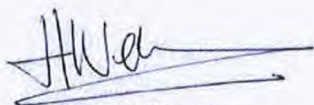


J.A. Lycklama à Nijeholt
Auteur

ECN part of TNO



S. Spoelstra
Co-reader



H.C. Welleman
Deputy Research Manager

