

TNO 2026 R10721

HIGH temperature FLEXible thermoacoustic heat pump development and testing (HighFlex)

Openbaar eindrapport HighFlex project

Datum	27 maart 2026
Auteur	Jan-Aiso Lycklama à Nijeholt
Met bijdrage van	Hassan Tijani (TNO) Wouter Jansen (Howden) Jaap Bulsink (K3D) Dhruva Marathe (Cargill)
Classificatie rapport	TNO Publiek
Aantal pagina's	10
Sponsor	RVO
Projectnaam	HighFlex
Projectnummer	060.57245
RVO referentie	TIND23-03473950

*Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van
Economische Zaken en Klimaat, subsidieregeling Top Sector Energie
uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.*

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op enige andere wijze zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht is opgesteld, zijn de rechten en plichten van de contractpartijen onderworpen aan de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel aan de tussen de contractpartijen gesloten overeenkomst. Het is toegestaan het rapport ter inzage voor te leggen aan partijen die een rechtstreeks belang hebben.

© 2026 TNO

Inhoudsopgave

1	Uitgangspunten en doelstellingen van het project	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Doelstellingen	4
2	Resultaten	5
2.1	HighFlex testopstelling.....	5
2.2	Warmtepomp metingen	5
2.3	Studie opschaling	6
2.4	Casestudie	6
3	Knelpunten en toepassingsperspectief	7
4	Bijdrage aan doelstelling van de regeling	8
4.1	Verduurzaming	8
4.2	Versterking kennispositie.....	8
4.3	Spin-off binnen en buiten de sector	8
5	Publicaties	9
6	Ondertekening	10

1 Uitgangspunten en doelstellingen van het project

1.1 Achtergrond

Het totale primaire energieverbruik in Nederland bedroeg in 2025 totaal 2621 PJ. Industrieel warmtegebruik neemt hiervan een substantieel aandeel voor zijn rekening, met ongeveer 483 PJ (inclusief raffinage) per jaar. Het verduurzamen van deze warmtevraag is cruciaal voor het behalen van de nationale klimaatdoelstellingen. Tegelijkertijd biedt dit aanzienlijke kostenbesparingen, aangezien jaarlijks ongeveer 5 miljard euro aan brandstofkosten – voornamelijk aardgas – wordt besteed aan warmteproductie.

Industriële processen vragen warmte over een breed temperatuurspectrum. Temperaturen tussen 100 °C en 250 °C worden onder andere toegepast voor verwarmen, drogen en scheidingsprocessen zoals destillatie. Andere sectoren, waaronder staal-, glas-, keramiek- en cementproductie, vereisen temperaturen boven 600 °C. Een groot deel van deze proceswarmte komt echter weer vrij als restwarmte op lagere temperatuur, typisch tussen 50 °C en 150 °C. Het hergebruik van deze restwarmte via warmtepompen ligt daarom voor de hand. De huidige warmtepomptechnologie kent echter beperkingen in temperatuurlift en leveringstemperatuur, waardoor industriële toepassing beperkt blijft. De thermo-akoestische warmtepomp (TAWP) biedt perspectief door haar vermogen om hoge temperaturen en grote liften te realiseren, en vormt daarmee een veelbelovende route naar koolstofvrije industriële proceswarmte.

1.2 Doelstellingen

Het doel van het HighFlex-project is het beoordelen van de technische en economische haalbaarheid van de thermo-akoestische warmtepomp voor stoomproductie bij drukken van 8-10 bar. Hiervoor zijn verbeteringen nodig om het rendement (COP) te verhogen. Binnen het project is ingezet op de ontwikkeling van geavanceerde componenten die bijdragen aan een hogere efficiëntie.

Het HighFlex-project is uitgevoerd in samenwerking met technologieleveranciers Howden en K3D. Cargill Gouda trad op als industriële eindgebruiker. TNO vervulde de rol van technologieontwikkelaar en projectcoördinator.

2 Resultaten

2.1 HighFlex testopstelling

De HighFlex-warmtepomp is een elektrisch aangedreven thermo-akoestische warmtepomp die helium gebruikt als werkmedium. Het werkingsprincipe is gebaseerd op de Stirling cyclus. De installatie bestaat uit een drukvat met helium onder hoge druk (circa 30 bar), gemonteerd op een zuigercompressor die elektrisch wordt aangedreven. De oscillerende zuiger veroorzaakt een drukamplitude van ongeveer 3 bar. Laagwaardige restwarmte wordt toegevoerd via een thermische-oliecircuit en opgewaardeerd tot hoge temperatuur. De geproduceerde warmte wordt afgegeven aan een hoge temperatuur warmtewisselaar waarin voedingswater wordt verdampt tot stoom.

Binnen het HighFlex project zijn meerdere innovatieve componenten ontwikkeld, geïntegreerd en getest in de TAWP. De testopstelling is opgebouwd en beproefd in het Carnot-laboratorium van TNO in Petten en is hieronder weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 HighFlex testopstelling in TNO Carnot laboratorium in Petten

2.2 Warmtepomp metingen

Tijdens de experimenten is stoom geproduceerd bij temperaturen van 120, 150 en 180 °C, uitgaande van bronwarmtetemperaturen tussen 80 en 90 °C. Deze resultaten tonen de hoge flexibiliteit van de thermo-akoestische warmtepomp aan. Zowel het thermisch vermogen als de vermogensdichtheid zijn aanzienlijk verbeterd in HighFlex; door toepassing van het gepatenteerde boostermembraan kon een verdubbeling worden gerealiseerd in stoomproductie.

Howden heeft aanvullende metingen en analyses uitgevoerd aan het compressorvermogen, waarmee verschillende verliesmechanismen inzichtelijk zijn gemaakt. Daarnaast is gewerkt aan een conceptueel ontwerp voor een verbeterde pakkingbus.

2.3 Studie opschaling

De toepassing van 3D metaal printen voor industriële warmtewisselaars voor de TAWP is onderzocht door K3D. De studie laat zien dat het huidige ontwerp van de warmtewisselaars en de printer instelling kunnen worden geoptimaliseerd waardoor kosten sterk afnemen.

2.4 Casestudie

Bij Cargill Bioindustrial in Gouda is een eindgebruikerscasestudie uitgevoerd. De technische en economische haalbaarheid van integratie van een thermo-akoestische warmtepomp in een bestaand proces is onderzocht. De studie toont aan dat integratie in een bestaande olie-splitsingskolom technisch haalbaar is, maar onder de huidige randvoorwaarden economisch zeer uitdagend is. De economische perspectieven zijn het gunstigst voor nieuwbouwsituaties, grootschalige installaties ($\geq 0,5$ MW) en toepassingen die hogere leveringstemperaturen vereisen dan met conventionele warmtepompen mogelijk is.

3 Knelpunten en toepassingsperspectief

Om de TAWP tot een succesvol product door te ontwikkelen is een verdere opschaling en demonstratie van de TAWP tot een hoger thermisch vermogen een vereiste, op basis van een dubbelwerkende zuiger welke aan weerszijde een TA module aandrijft. Hiernaast is het van belang om de compressor te optimaliseren voor de TA werkcondities.

De COP van de TAWP kan verbeterd worden door interne warmtelekkage te verminderen. Opgepompte warmte lekt weg naar koudere delen van de TAWP. Dit wordt veroorzaakt door circulatie van helium in het drukvat van de warmtepomp.

4 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

4.1 Verduurzaming

De ontwikkeling van de TAWP past goed in de programmalijn EKOOP. 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 koolstofvrije warmtelevering met de TA warmtepomp.

4.2 Versterking kennispositie

HighFlex 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.

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. Bijkomend voordeel van de TAWP is dat er geen aanpassingen nodig zijn (werkmedium, smeermiddel, compressor, etc.) om efficiënt onder verschillende temperatuurcondities te opereren. TNO heeft een licentie verstrekt aan start-up Blue-Heart -Energy voor toepassing van de TAWP in de gebouwde omgeving voor lagere vermogens.

5 Publicaties

The results of the project have been presented at the HTHP conference in 2024 in Copenhagen, [HTHP Symposium 2024](#).

Thermoacoustic heat pumps for high temperature and industrial applications,
*Jan-Aiso Lycklama à Nijeholt, Hassan Tijani, Gerard de Jong, 2024
Copenhagen.*

6 Ondertekening

Petten, 27 maart 2026

TNO

Digitaal ondertekend door Rita Almeida
op 2026-03-30 09:44:44

Rita Almeida
Deputy Research Manager

Digitaal ondertekend door Jan Aiso Lycklama a Nijeholt
op 2026-03-30 08:18:23

Jan-Aiso Lycklama à Nijeholt
Auteur