

Energy

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Postbus 15
1755 ZG Petten

www.tno.nl

T +31 88 866 50 65

TNO-rapport

TNO 2019 R10251

Energiebesparing in de industrie - AP2013

Openbare eindrapportage

Datum	18 februari 2019
Auteur(s)	S. Spoelstra, M. van der Pal, A. Sweere, J.A. Lycklama a Nijeholt
Aantal pagina's	27
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	EBI - Actieprogramma 2013
Projectnummer	060.33632

© 2018 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Vortex kamer technologie.....	4
2.1	Uitgangspunten en doelstelling	4
2.2	Resultaten.....	5
2.3	Bijdrage aan doelstelling van de regeling	7
2.4	Spin off.....	7
2.5	Openbare publicaties.....	7
2.6	Contactpersonen	7
3	Thermochemische recuperatie	8
3.1	Uitgangspunten en doelstelling	8
3.2	Resultaten.....	8
3.3	Bijdrage aan doelstelling van de regeling	15
3.4	Spin off.....	16
3.5	Openbare publicaties.....	16
3.6	Contactpersonen	16
4	Elektrische warmtepomp bij destillatie	17
4.1	Uitgangspunten en doelstelling	17
4.2	Resultaten.....	17
4.3	Bijdrage aan doelstelling van de regeling	23
4.4	Spin off.....	23
4.5	Openbare publicaties.....	23
4.6	Contactpersonen	23
5	Full scale test infrastructuur voor warmtepompen.....	24
5.1	Uitgangspunten en doelstelling	24
5.2	Resultaten.....	24
5.3	Bijdrage aan doelstelling van de regeling	26
5.4	Spin off.....	26
5.5	Openbare publicaties.....	26
5.6	Contactpersonen	26
6	Ondertekening	27

1 Inleiding

Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken. Subsidieregeling energie en innovatie (SEI), Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Gegevens project

Project nummer:	TEMW130004
Project titel:	Energiebesparing in de industrie Actieprogramma 2013
Penvoerder en medeaanvragers:	ECN part of TNO, TUD, UT
Project periode:	01/01/2014 – 31/12/2018

Contact en verkrijgbaarheid rapport

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

Dit project bestaat uit 4 deelprojecten, die in het vervolg van dit rapport afzonderlijk worden gerapporteerd. De contactpersonen per deelproject staan in de afzonderlijke rapportages vermeld.

2 Vortex kamer technologie

2.1 Uitgangspunten en doelstelling

Uitgangspunten

Droogprocessen zijn over het algemeen zowel energie als kapitaal intensief en komen in vele industrietakken voor. In een analyse van het industrieel energiegebruik in de EU-27 die momenteel door ECN part of TNO wordt gemaakt, worden 12 sectoren geïdentificeerd waarin droogprocessen worden toegepast met een totaal (geschat) energiegebruik van 1450 PJ per jaar. Ongeveer 80% (1150 PJ/a) van dit industrieel energiegebruik voor drogen vindt plaats in drie sectoren: pulp & papier, voedingsmiddelen en chemie.

Er bestaat een zeer grote variëteit aan droogprocessen. In de eerder genoemde analyse worden ongeveer 20 verschillende type droogprocessen gevonden zoals bandrogers, sproeidrogers, cilinderdrogers, fluidized bed drogers et cetera. Droogprocessen zijn toegesneden op het product wat wordt gemaakt. Gebruik makend van dit gegeven wordt geschat dat het energiegebruik voor drogen voor ongeveer 30% (430 PJ/a) plaatsvindt in het cilinderdroogproces in de pulp& papier industrie en voor 25% tot 40% (360 PJ/a tot 580 PJ/a) in het sproeidroogproces voornamelijk in de voedingsmiddelen en de chemische industrie.

Dit project wordt uitgevoerd met, en gedeeltelijk door, eindgebruikers in de voedingsmiddelen en de chemische industrie (FrieslandCampina, Unilever en Corbion (Purac)) en richt zich op het sproeidroogproces. Het verhogen van de energie-efficiency van het sproeidroogproces is in principe mogelijk door een combinatie van verschillende maatregelen zoals het verhogen van het droge stof gehalte van de voedingsstroom, verbeteringen in het sproeidroogproces zelf en een efficiënte aandrijving, bijvoorbeeld door proces geïntegreerde warmtepompen. Met de huidige stand van de techniek is verhoging van de energie-efficiency van het sproeidroogproces en de integratie met een energie-efficiënte aandrijving nauwelijks mogelijk. Dit project spitst zich toe op een step-change verbetering van het sproeidroogproces de 'Vortex chamber' sproeidroogtechnologie waarmee substantiële energie-efficiency verbeteringen, verbeterde kwaliteitsbeheersing en lagere CAPEX mogelijk worden.

Sproeidrogen is een proces wat al vele decennia lang wordt toegepast. Gedurende deze periode zijn telkens incrementele verbeteringen doorgevoerd die hebben geleid tot de huidige techniek. De markt van dit type installaties is verdeeld onder een beperkt aantal grote leveranciers (GEA NIRO, Tetrapack, Wittmann (Europa), Nordson (USA), SSP en CEE (India)) die weinig bereid zijn tot grote innovaties, zelfs niet wanneer individuele eindgebruikers zoals Friesland Campina daar om vragen.

Doelstelling

- Proof of Concept van de Vortex Chamber sproeidroogtechnologie;
- Het vormen van een consortium wat in staat moet zijn de nieuwe technologie verder te ontwikkelen en op de markt te brengen.
- Het vergelijken van de investerings- en operationele (energie)kosten van vortex kamer technologie ten opzichte van conventionele sproeidroogtechnologie voor de productie van 5 ton/h melkpoeder.

Samenwerkende partijen

Aan dit project namen deel FrieslandCampina, Unilever, Corbion (Purac), ECN part of TNO, Université Catholique de Louvain la Neuve en BODEC.

2.2 Resultaten

In een eerste fase van het onderzoek werd de invloed van de positionering van de verstuiwer onderzocht, experimenten met water en melk combinerend. Een centraal gepositioneerde verstuiwer, zoals eerder gebruikt voor het coaten in vortexkamers, veroorzaakt sterke turbulentie wat ertoe leidt dat fijne druppeltjes te snel naar de eindwanden verspreid worden.

Gezien de zeer kleine lengte van de vortexkamer bereiken de druppeltjes dan de zijwanden alvorens voldoende gedroogd te zijn. Met een verstuiwer geïntegreerd in de cilindrische zijwand wordt de turbulentie sterk verminderd. Druppeltjes moeten echter tegen de centrifugaalkracht in de vortex penetreren. De verdamping van verstuiwd water liet toe de invloed van de belangrijkste werkingscondities te onderzoeken, met name van de inlaattemperatuur van de warme lucht, het luchtdebiet en de voedingsdruk van het water.

Door middel van een digitale camera en luchtvochtigheidssondes werden zowel de invloed op de druppelpenetratie als op de verdamping bestudeerd. Meer gedetailleerde 3D metingen door middel van fijne thermokoppels werden uitgevoerd in een tweede fase van het onderzoek. Door de gemeten temperatuurprofielen zonder en met waterinjectie te vergelijken werd een duidelijk beeld bekomen van het stromingsprofiel en van waar verdamping van de geïnjecteerde druppeltjes plaatsgrijpt.

In een derde luik van het onderzoek werden experimenten met melk uitgevoerd bij condities waar waterevaporatie succesvol was zonder dat te hoge temperaturen in de vortexkamer werden gemeten. Bijzondere aandacht diende te worden besteed aan de opstartprocedure. Met het sproeidrogen van melk werden bemoedigende resultaten bekomen, waarbij tot 78% van de geïnjecteerde melk in niet-verbrande en kwalitatief hoogstaande melkpoeder werd omgezet. De vereiste droogtijd (of het corresponderende vereiste droogvolume) was daarbij significant kleiner dan bij gebruik van conventionele technologie voor sproeidrogen. Het vermijden van verbrande aanslag op de cilindrische wand vereist verdere optimalisatie van het concept en de werkingscondities.

De positieve resultaten en het verkregen inzicht vormden de basis voor het indienen van een vervolgproject waarbij opschaling en optimalisatie van vortexkamer sproeidrogers wordt behandeld. Uitgebreide numerieke en experimentele studies in een nieuwe pilootinstallatie worden in dit vervolgproject uitgevoerd.

Techno-economische analyse

De vergelijking tussen conventionele sproeidroogtechnologie en de vortex kamer technologie is uitgevoerd voor een melkpoederproductie van 5 ton/h, waarbij tevens 5 ton/h water wordt verdampt. De installatie wordt verondersteld gedurende 7000 uren per jaar te draaien. De kosten zijn gesplitst tussen investeringskosten en operationele kosten.

Investeringskosten voor een conventionele sproeidroger zijn verkregen van FrieslandCampina. UCL en ECN part of TNO hebben vervolgens de consequenties van de introductie van vortex kamer technologie op de investeringskosten van de diverse procesonderdelen ingeschat. Betreffende de operationele kosten is het nog te vroeg om een inschatting te maken van de personeels- en onderhoudskosten. Daarom is de vergelijking alleen gemaakt voor de energiekosten.

Een generiek model voor het droogproces is gebruikt om de benodigde energie te bepalen en daaruit de energiekosten. Het model berekent het primaire energiegebruik op basis van de ingaande en uitgaande stromen en efficiency getallen voor de diverse conversies. Het primaire energiegebruik van de vortex kamer is sterk afhankelijk van de drukval die gaat optreden over de droogkamer. Daarom zijn er twee scenario's doorgerekend, waarbij een minimum en een maximum drukval wordt gehanteerd.

De analyses laten zien dat er een reductie in investeringskosten wordt verwacht van circa M€ 3,7 ten opzichte van een investering van M€ 10,8 in een conventionele sproeidroger. Het beeld voor de energiekosten is gemengd. Wanneer de drukval over de vortexkamer hoog uitvalt, dan zullen de energiekosten naar schatting M€ 0,6/jaar hoger uitpakken dan in de referentiecasse. De energiekosten zullen M€ 0,2/jaar lager uitvallen, indien de drukval over de vortex kamer beperkt blijft. In elk geval vindt er een verschuiving plaats van het gebruik van aardgas voor de warmtelevering van het drogen naar elektriciteit als drijvende kracht.

Deze analyse is uitgevoerd voor de huidige situatie ten aanzien van rendementen van het elektriciteitssysteem en huidige energieprijzen (gas, elektriciteit). Wijzigingen in deze situatie hebben een sterke invloed op de uitkomst van deze berekeningen en vergen dus een nieuwe evaluatie.

2.3 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

De analyses aan het energiegebruik van de vortex kamer ten opzichte van de conventionele sproeitors laten zien dat het primaire energiegebruik vooralsnog niet afneemt. Dit wordt vooral veroorzaakt door de toename in het elektriciteitsgebruik van de vortex kamer. Er vindt dus een verschuiving plaats van het gebruik van gas voor verwarming van drooglucht naar de toepassing van elektriciteit als aandrijving. Een toenemende verduurzaming van het elektriciteitssysteem zal tot gunstiger resultaten voor de vortex kamer leiden. Verder verdient het de aanbeveling om bij de doorontwikkeling van de vortex kamer specifieke aandacht te besteden aan de drukval over de kamer teneinde deze te minimaliseren.

2.4 Spin off

Dit project heeft een vervolg gekregen in meerdere ontwikkelingsprojecten in het kader van de TKI-JIP call en TKI-toeslag projecten.

2.5 Openbare publicaties

- Philippe ELIAERS (promotor Juray DE WILDE), "Intensification of interfacial mass, heat & momentum transfer in high-G fluidized beds in vortex chambers: experimental & theoretical study of potential applications", PhD thesis, Université catholique de Louvain (UCL), Louvain-la-Neuve, Belgium, July 2014.
- Romain PECHER (promotor Juray DE WILDE), "Computational Fluid Dynamics study of the design of a vortex chamber spray dryer", MSc thesis, Université catholique de Louvain (UCL), Louvain-la-Neuve, Belgium, August 2015.

2.6 Contactpersonen

Meer informatie kan verkregen worden bij:

- Juray De Wilde (UCL).
- Anton Sweere (FrieslandCampina), anton.sweere@frieslandcampina.com.

Voor de techno-economische analyse kan meer informatie worden verkregen bij:

- Anton Wemmers (ECN part of TNO), anton.wemmers@tno.nl.

3 Thermochemische recuperatie

3.1 Uitgangspunten en doelstelling

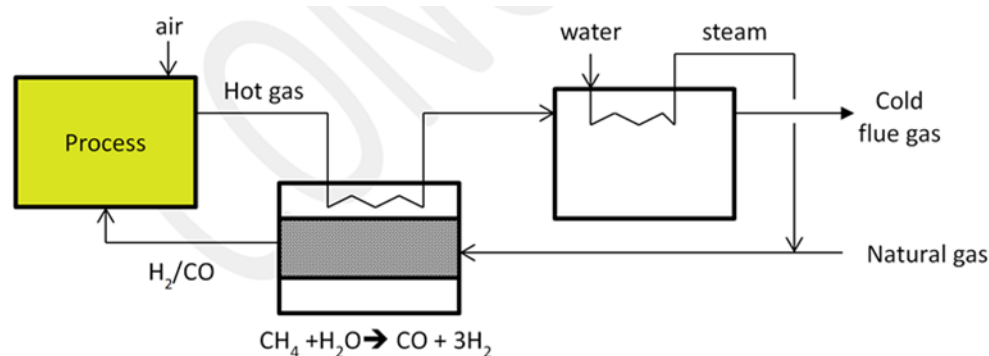
Binnen de sector industrie zijn er diverse processen die hoge temperatuur warmte vereisen en zodoende ook mogelijk hoge temperatuur restwarmte produceren. Het efficiënt gebruiken van deze warmte blijkt in de praktijk vaak lastig.

Thermochemische recuperatie (TCR) is een proces dat gebruik kan maken van deze hoge temperatuur industriële restwarmte door middel van de chemische omzetting van relatief laagcalorische brandstoffen naar hoogwaardige, zoals de omzetting van methaan en stoom naar syngas. TCR kan voordeel bieden op het gebied van energie efficiëntie maar mogelijk ook helpen bij andere aspecten zoals productkwaliteit of productiesnelheid. Focus van dit onderzoek is op TCR processen waarbij opwaarderen van restwarmte naar meer hoogcalorische brandstoffen centraal staat. De inzet van hoge temperatuur restwarmte voor het aandrijven van endothermische reacties voor het opwerken van grondstoffen valt buiten de scope van dit onderzoek. Aangezien thermochemische recuperatie typisch hoge temperaturen vereist ($>200^{\circ}\text{C}$) zal de warmte vooral uit rookgassen moeten worden onttrokken.

Doelstelling van dit project is om het toepassingspotentieel van TCR, zowel technisch als economisch, in kaart te brengen en helderheid te verschaffen over de impact van TCR op het productieproces.

3.2 Resultaten

Thermochemische recuperatie is een proces waarin (hoge temperatuur) warmte wordt gebruikt voor het aandrijven van een chemische reactie waarmee vervolgens de warmte effectief kan worden ingezet. Figuur 1 geeft een voorbeeld van thermochemische recuperatie (TCR) schematisch weer voor het omzetten van aardgas en stoom in syngas. Hoge temperatuur rookgassen (Hot gas) afkomstig uit het proces worden door een reformer geleid. Hierin wordt warmte onttrokken aan het rookgas voor de thermochemische reactie, in dit voorbeeld de omzetting van methaan en stoom naar waterstof en CO (syngas). De benodigde stoom is gegenereerd met behulp van de resterende warmte in het rookgas. Omdat het resulterende syngas (H_2/CO) een hogere calorische waarde heeft dan aardgas (Natural gas), kan het proces worden bedreven met minder aardgas en is zodoende energie efficiënter ten opzichte van een situatie zonder TCR.



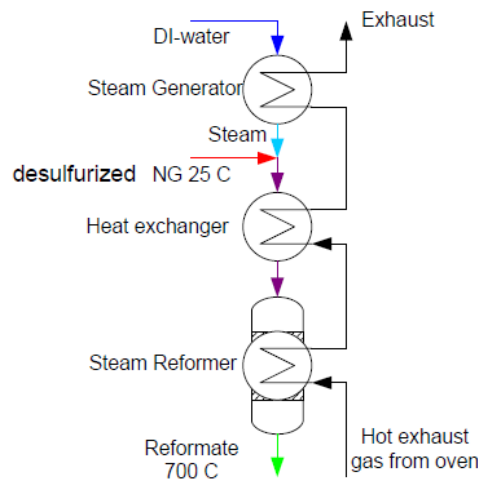
Figuur 1 Schematische weergave thermochemische recuperatie waarin aardgas wordt omgezet in syngas

Cruciaal voor de mate van energie terugwinning is de minimale temperatuur vereist voor de reformer. Voor bovenstaande omzetting van methaan in syngas is de toepassing van een katalysator en het al dan niet onttrekken van reactieproducten om het reactie-evenwicht te beïnvloeden hierop van grote invloed. Onttrekking van reactieproducten zou kunnen plaatsvinden door middel van membranen en/of sorbentia. Door toepassing van katalysatoren kan de reactietemperatuur worden teruggebracht tot ongeveer 600°C, mogelijk lager wanneer reactieproducten worden onttrokken.

Ook de wijze waarop de warmte uit de rookgassen wordt onttrokken kan verschillen. Het systeem zoals voorgesteld door Celsian¹ voor toepassing in de glasindustrie (zie Figuur 2), maakt gebruik van directe warmte uitwisseling. Het systeem zoals dat door PraxAir wordt gebruikt (zie Figuur 3), slaat de warmte uit de rookgassen batch-gewijs op in keramische elementen waarna vervolgens de warmte uit de keramische elementen wordt gebruikt voor het opwarmen van het gas in de reformer.

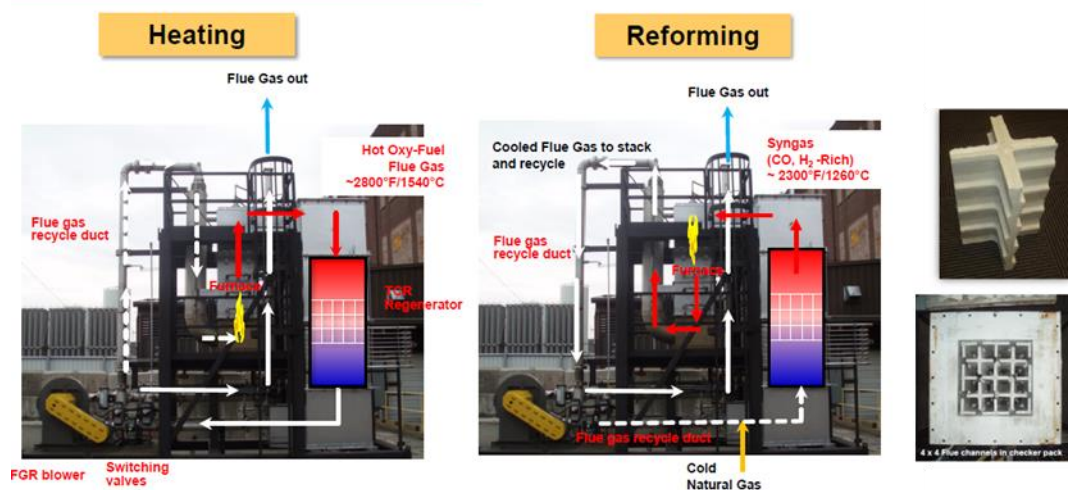
¹ Celsian Glass & Solar B.V. is een spin-off van TNO Glass Group en levert onafhankelijk technologische en wetenschappelijk diensten en werkt samen met industrie om te komen tot proces innovaties, technologische oplossingen en nieuwe product toepassingen.

Flow diagram TCR



Figuur 2 Schematisch overzicht systeem CelSian met directe overdracht warmte in Steam Reformer

Praxair TCR Single Bed Pilot System

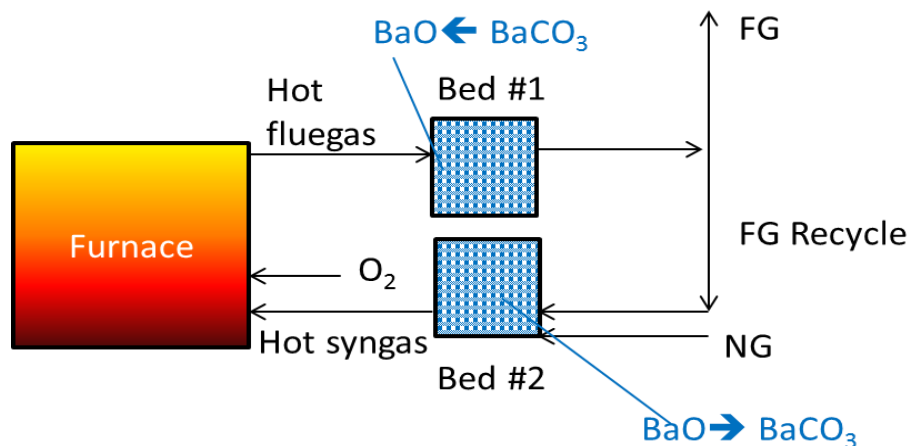


Figuur 3 Schematisch overzicht Praxair systeem met indirecte warmteoverdracht: batch-gewijs wordt een stapel keramische elementen (rechts) verwarmd met rookgassen (links) en vervolgens gebruikt voor opwarmen en productie van syngas (midden).

Effect van sorbentia op efficiëntie van TCR

Binnen ECN part of TNO is gekeken naar de mogelijkheden voor het gebruik van sorbentia in het PraxAir concept zoals weergegeven in Figuur 4. Hierbij is gefocust op het verwijderen van CO₂ als reactieproduct in het syngas. Randvoorwaarde is dat de CO₂ kan worden verwijderd van het sorbent door verhitting van de keramische elementen. Op basis van de gekozen condities (rookgassen met een temperatuur van 1500°C met uitkoeling tot 800°C) blijken CaO en BaO over de vereiste sorptie eigenschappen te beschikken om reversibel te kunnen reageren tot carbonaat, zoals $\text{BaO} + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{BaCO}_3$. Verdere analyse toonde aan dat op basis van smeltgedrag, sorptie-evenwicht en sorptie-enthalpie BaO duidelijk te prefereren is ten opzichte van CaO.

Door de adsorptie van CO_2 door het BaO verschuift het reactie evenwicht naar een hogere concentratie syngas en wordt (onder dezelfde condities) een hogere conversie van methaan bereikt. Omdat de sorptie van CO_2 gepaard gaat met warmte-effecten worden de temperatuurcondities van het rookgas beïnvloedt en om dat effect correct mee te nemen zijn berekeningen in ASPEN uitgevoerd.



Figuur 4 Gebruik van sorbent (BaO) voor het verschuiven van het reactie evenwicht

Tabel 1 toont de resultaten voor de ASPEN berekeningen voor een TCR systeem gebruikmakend van de warmte in rookgasen tussen 1500°C en 800°C met en zonder sorptie-effect van BaO . Hieruit blijkt dat het toevoegen van een sorbent in de vorm van BaO niet leidt tot verhoogde conversie en efficiëntie maar juist tot een lagere conversie. De reden hiervoor is dat warmte die gebruikt wordt voor desorptie van de CO_2 onvoldoende wordt gecompenseerd door het verschuiven van het reactie-evenwicht. De conclusie is dan ook dat sorbentia geen positief effect hebben op de mate van conversie van methaan. Omdat membranen geen last hebben van warmte-effecten, is toepassing ervan een goed alternatief. Membranen kennen echter weer een uitdaging in toepassing bij hoge temperaturen, voldoende selectiviteit, mogelijke vervuiling in combinatie met voldoende lage kosten. HyGear heeft een systeem met membraanmodules ontwikkeld voor het scheiden van waterstof die mogelijk kunnen worden toegepast in een TCR systeem, zie Figuur 5.

Tabel 1 Vergelijking tussen TCR base case met BaO sorption enhanced TCR

	800°C TCR Base case	800°C SE-TCR case
CH_4 conversie	31%	21%
Temperatuur syngas	657°C	920°C
Efficiëntie	85.7%	83.6%



Figuur 5 Prototype membraanmodule van HyGear voor scheiding van waterstof

Gebruik alternatieve thermochemische reacties

Binnen dit project is ook gekeken naar de mogelijkheid om andere thermochemische reacties te gebruiken, met name die op basis van andere brandstoffen zoals (bio)ethanol. Terugkerend probleem hierbij is dat voor toepassingen waar TCR kan worden ingezet, hoge temperatuur warmte is vereist. Dit wordt typisch bereikt door gebruik te maken van een hoge verhouding waterstof – koolstof vanwege de hoge warmtecapaciteit en lage bindingsenergie van koolstofverbindingen ten opzichte van waterstofverbindingen. Na waterstofgas is methaan de brandstof met de hoogste ratio en daardoor het meest geschikt voor hoge temperatuur verbrandingsprocessen. Bovendien vinden er meer nevenreacties met bijbehorende (ongewenste) reactieproducten plaats naarmate de koolstofketens langer worden. Het gebruik van conversie van methaan lijkt dan ook de meest geschikte reactie voor gebruik in thermochemische recuperatie voor hoge temperatuur toepassingen. De nevenreacties is tevens de reden om TCR voor productie van chemicaliën niet nader te beschouwen aangezien dit betekent dat naast de TCR installatie er een uitgebreide scheidingstrein benodigd is.

Toepassingspotentieel industrie

TCR vindt zijn toepassing in sectoren met hoge temperatuur restwarmte. Enerzijds omdat een relatief hoge temperatuur is vereist voor de thermochemische reactie, anderzijds omdat voor het hergebruik van hoge temperatuur restwarmte het gebruik van traditionele warmtewisselaars niet mogelijk is en TCR een mogelijk aantrekkelijk alternatief vormt.

Tabel 2 toont de belangrijkste sectoren in Nederland met hoge temperatuur warmtevraag. De grootste sector is de staalindustrie met 58 PJ per jaar aan hoge temperatuur warmte. Daarnaast leveren de sectoren glas en keramiek een bijdrage van respectievelijk 8 en 7 PJ per jaar. De hoeveelheid hoge temperatuur warmte in andere sectoren is beperkt tot minder dan 5 PJ per jaar.

Tabel 2 Energiegebruik sectoren met hoge temperatuur warmte vraag

Sector	PJ per jaar
Glas	8
Staal	58
Keramiek	7
Diversen	<5

Op basis van deze gegevens is het niet mogelijk om direct een toepassingspotentieel voor TCR te bepalen. De besparing die wordt bereikt met TCR hangt namelijk af van:

- de verbrandingstemperatuur: des te hoger des meer warmte kan worden gebruikt voor TCR;
- het verbrandingsregime: verbranding met lucht levert meer restwarmte voor TCR dan oxyfuel;
- huidige warmte terugwinningsmethoden;
- proces gerelateerde aspecten die toepassing van TCR bemoeilijken, zoals bijvoorbeeld noodzaak tot andere type branders of aanwezigheid van vervuilingen die gebruik van een katalysator verhinderen.

Om het toepassingspotentieel voor TCR te bepalen is het daarom noodzakelijk voor elke sector in kaart te brengen in welke processen er hoge temperatuur restwarmte beschikbaar en in welke mate TCR deze warmte kan benutten.

Sector staal

Tabel 3 toont het energie gebruik van TATA Steel in de diverse processen. Het hoogovengas uit de hoogoven vormt de grootste warmtebron. De restwarmte van het hoogovengas (Hoogoven) wordt echter al grotendeels teruggewonnen. Dit leidt ertoe dat de gastemperatuur bij de uitlaat nog slechts 120°C bedraagt. TCR biedt voor dit proces dan ook geen toegevoegde waarde.

Tabel 3 Indicatief restwarmte stromen van diverse processen van TATA Steel waarop TCR mogelijk kan worden toegepast

Proces	Restwarmte bron	Energie inhoud (PJ/jaar)
Kooksfabriek	Kooksovengas	16
Hoogoven	Hoogovengas	32
Staalfabriek	Oxygas	5

Het kooksovengas is wel beschikbaar op voldoende hoge temperatuur, te weten 900°C. Naar schatting kan 25% van de warmte worden gebruikt voor TCR en daarmee zou 4 PJ per jaar aan energiebesparing haalbaar zijn. Uitdaging is dat het kooksovengas is vervuild met onder andere teren. Vraag is in hoeverre dit de werking van de katalysator nadelig beïnvloedt. Tot 400°C zou condensatie van de teren geen problemen moeten opleveren. Daaronder is een reinigingsstap nodig om verdere warmteterugwinning mogelijk te maken.

Het oxygas is meest kansrijk als bron voor TCR. In dit proces komt het gas vrij bij 1500°C. Uitdaging is het batch-gewijze karakter van dit proces met typisch 20 minuten heet gas afgewisseld met 20 minuten hervullen maar mogelijk dat dit proces goed kan worden gecombineerd met de indirecte warmte uitwisseling van het PraxAir proces (zie Figuur 3). Met behulp van TCR zou zo'n 50% van de warmte kunnen worden hergebruikt, oftewel 2.5 PJ per jaar. Totaal binnen de staal sector is er dan een toepassingspotentieel voor TCR van ongeveer 6.5 PJ per jaar.

Sector glas

Binnen de glassector is CelSian (TNO spin-off) actief op het gebied van TCR. Zij schatten dat TCR op 30% van de glasovens kan worden toegepast. CelSian heeft

samen met HyGear een prototype TCR unit gebouwd, zie Figuur 6. Deze unit beschikt over een stoomgenerator (midden), reformer (rechts) en ontzwavel unit (links). Deze laatste is noodzakelijk omdat zwavel de gebruikte katalysator deactiveert en de levensduur van de installatie verkort. Tests tonen aan de TCR toepasbaar is in het glasproces en met name voor oxyfuel ovens en recuperatieve ovens energiebesparing kan opleveren². Vergelijkbare ontwikkelingen op het gebied van TCR in glasovens vinden plaats bij het Gas Technologie Instituut (GTI) in de Verenigde Staten³.



Figuur 6 Links: prototype TCR unit ontwikkeld door CelSian en HyGear. De cilinder links zorgt voor verwijderen zwavel, midden (achterin) is de stoomgenerator en de cilinder rechts bevat de reformer unit. Rechts: binnenwerk van de reformer unit

Omdat veel restwarmte in het glas achterblijft en niet in de rookgassen terecht komt, is de geschatte energiebesparing met TCR beperkt tot 20 tot 35%⁴. Door de gewijzigde samenstelling van de brandstof kan worden verwacht dat voor sommige glasprocessen aanpassingen aan de brander onvermijdelijk zijn. Naast additionele kosten kan dit echter ook kansen bieden in de vorm van proces- en productverbeteringen. Deze zijn namelijk sterk gerelateerd aan het brander proces. Het toepassingspotentieel voor TCR in de glassector wordt derhalve geschat op 1 tot 1.5 PJ per jaar.

Sector keramiek

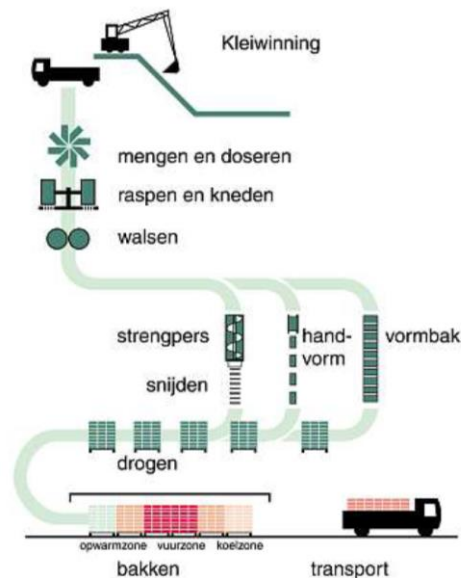
Figuur 7 geeft schematisch weer hoe het productieproces van keramiek verloopt⁵. Vanuit energie oogpunt zijn hierin twee processen relevant, te weten het droogproces en het bakproces. Het bakproces vindt plaats op hoge temperatuur en is potentieel interessant voor toepassing van TCR. Daarnaast wordt laagwaardige warmte gebruikt in het droogproces.

² Glass production dedicated thermo chemical recuperator, Celsian, ICG, Praag 2013.

³ <http://www.asminternational.org/documents/10192/1917649/http00705p028.pdf/9db475e5-b284-44d6-b373-d36879e8de60/HTP00705P028>

⁴ Overview of methods to recover energy from flue gases of glass furnaces, Celsian Glasstrends.

⁵ Brochure KNB, Van klei tot baksteen... en meer, November 2007.



Figuur 7 Schematisch overzicht van het productieproces van keramiek

In state-of-the-art tunnelovens die voor bakstenen worden gebruikt is er geen hoge temperatuur restwarmte beschikbaar. Door tegenstroom warmtewisseling tussen steenladingen en de baklucht maakt dat warmte typisch op 150°C uit de oven komt. Een verdere uitkoeling van deze lucht is problematisch vanwege het zuurdauwpunt dat hier net onder ligt.

Mogelijkheden voor energiebesparing kunnen worden gevonden in de ontkoppeling van de droogsectie en de oven. In de huidige situatie wordt een deel van de hete lucht uit de oven rechtstreeks naar de droogsectie geleid. Deze situatie zorgt voor een lock-in effect die verdere energiebesparing bemoeilijkt. De mogelijkheden voor de keramiek industrie om te investeren in nieuwe technologieën zijn zeer beperkt vanwege de lastige economische situatie waarin de sector zich bevindt. Het toepassingspotentieel voor TCR binnen de keramiek sector lijkt dan ook nihil.

3.3 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

Een toepassingspotentieel voor TCR van 8 PJ per jaar vertegenwoordigt een besparing van ongeveer 50 M€ per jaar en komt overeen met zo'n 500 kton vermeden CO₂ emissies. Deze waarden zijn gebaseerd op besparing van gebruik van aardgas. Indien door TCR gebruik van kolen wordt verminderd dan neemt de hoeveelheid vermeden CO₂ toe.

Uitgaande van 8000 draaiuren per jaar dan dient 240 MW aan TCR installaties te worden geïnstalleerd om het volledige toepassingspotentieel te benutten. Wanneer wordt uitgegaan van een terugverdientijd van 5 jaar voor energiebesparende maatregelen, vertalen bovenstaande gegevens zich in een budget van ongeveer 1 M€/MW. Let wel: dit bedrag beslaat zowel CAPEX als OPEX en omvat alle kosten dus naast de TCR apparatuur, ook de installatie- en integratiekosten, de kosten voor het nemen van eventuele veiligheidsmaatregelen, het voldoen aan de wettelijke regelgeving, en de onderhouds- en vervangingskosten. Op basis van

literatuurgegevens, die de kosten van een volledige reformer installatie schatten tussen 0.3 M€/MW⁶ en 0.9 M\$/MW⁷, lijkt dit bedrag haalbaar.

3.4 Spin off

Vervolgactiviteiten op gebied van TCR dienen zich te focussen op toepassing ervan in de sectoren glas en staal. Binnen TATA Steel zijn vervolgactiviteiten gepland in de vorm van haalbaarheidsstudies. CelSian is bezig met het aantrekken van bedrijven uit zowel de glas- als staalsector en financiers voor het uitvoeren van een demonstratie project van TCR in een glasoven. Op basis van de resultaten van een dergelijk demonstratieproject kan het toepassings- en besparingspotentieel van de technologie verder worden uitgewerkt. Een dergelijk project zal ook verder inzicht geven in de noodzakelijke technische ontwikkelingen en de economische randvoorwaarden voor succesvolle introductie van TCR.

3.5 Openbare publicaties

Deze publicatie is openbaar en te vinden op <https://repository.tudelft.nl/tno/>.

3.6 Contactpersonen

Michel van der Pal (ECN part of TNO)
Tel +31 650009639
E-mail: michel.vanderpal@tno.nl

⁶ Techno-economic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term, F. Mueller-Langer, E. Tzimas, M. Kaltschmitt, S. Peteves, International Journal of Hydrogen Energy, 32(2007), 3797-3810.

⁷ Reduction of CO₂-emissions by adding hydrogen to natural gas, IEA Greenhouse gas R&D programme, report number PH4/24, October 2003.

4 Elektrische warmtepomp bij destillatie

4.1 Uitgangspunten en doelstelling

Het belangrijkste scheidingsproces binnen de chemische en raffinage sector is destillatie. Het thermodynamische rendement van dit proces is normaal gesproken erg laag ($< 10\%$). Deze efficiency kan worden verhoogd door koppeling van de condensor en reboiler van de destillatiekolom middels een hoge-temperatuur warmtepomp. Hiervoor is een warmtepomp nodig die warmte op het benodigde temperatuurniveau (tot wel 200°C) kan leveren en een hoge temperatuurlift (verschil tussen condensor en reboiler temperatuur). Een thermo-akoestische warmtepomp (TAWP) is een innovatief warmtepompconcept dat aan deze randvoorwaarden kan voldoen.

Belangrijkste doel van dit project is de technische haalbaarheid aan te tonen van opschaling van dit concept naar pilot schaal. Onderdeel hiervan vormen de volgende deeldoelstellingen

- Aantonen van een voldoende hoog rendement met de huidige benchschaal (10 kW) opstelling onder relevante industriële procescondities.
- Aantonen van technische haalbaarheid van een pilot schaal installatie door middel van een ontwerpstudie waarbij gebruik wordt gemaakt van een zuiger compressor als aandrijving.
- Verbeteren van het ontwerpgereedschap en schalingsregels voor het ontwerp van een TAWP.

4.2 Resultaten

Benchschaal experimenten

Een bestaande benchschaal TAWP is getest met een lineaire motor als aandrijving. Echter, lineaire motoren zijn niet schaalbaar naar industrieel relevante schaal. Een zuigercompressor zou een haalbaar alternatief kunnen zijn. Zuigercompressoren zijn commercieel beschikbaar voor grote vermogens (tot op enkele MW). De huidige studie moet verifiëren of een zuigercompressor inderdaad als aandrijving kan worden gebruikt. In de bestaande opstelling is de lineaire motor dus vervangen door een (kleine) zuigercompressor.

Een foto van de TAWP, aangedreven door een zuigercompressor is weergegeven in Figuur 8. De warmtepomp is zichtbaar aan de rechterkant met de zuigercompressor aan de voorkant. De linkerkant van de foto bevat randapparatuur om de warmtepomp van de juiste temperatuurniveaus te voorzien.



Figuur 8 Foto van een zuigercompressor gedreven TAWP

Uit de metingen blijkt dat dit concept werkt. De meetresultaten zijn weergegeven in Tabel 4. Het systeem pompt warmte van circa 54°C naar een temperatuur van circa 111°C, waarbij een vermogen van 3.6 kW wordt geleverd. Circa 1.3 kW van het gepompte vermogen lekt weg door warmteverliezen.

Tabel 4 Samenvatting van meetresultaten met de benchschaal TAWP

Pm (bar)	40	T_l (°C)	53.75	Q_l (W)	2526
Dr (%)	5.6	T_h (°C)	110.8	Q_{TBT} (W)	1366
f(Hz)	78.4	T_{TBT} (°C)	14	Akoestisch vermogen (kW)	3.75
		Q_h (W)	2202	Elektrisch vermogen (kW)	6.16

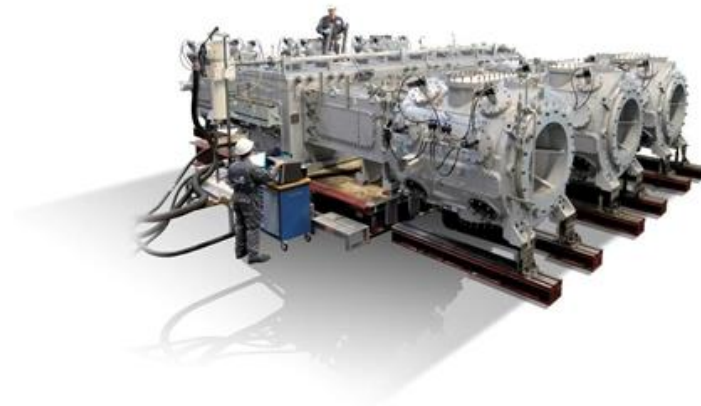
Verder blijkt uit deze tabel dat de huidige zuigercompressor nog niet efficiënt genoeg is. De gemeten efficiency is 61% (3.76/6.16). Deze efficiency zal sterk toenemen bij grotere compressoren. Daarnaast blijkt dat een fors deel van het toegevoerde akoestische vermogen niet in de warmtepomp wordt gebruikt maar wordt gedissipeerd in de rest van het systeem. Het akoestische vermogen dat in de warmtepomp wordt gebruikt, bedraagt 1.37 kW. De COP van de warmtepomp zelf wordt daarmee 2.6, corresponderend met 39% van het maximale Carnot rendement.

Om het beoogde vermogen van 10 kW te halen, moeten de akoestische en thermische verliezen worden gereduceerd. Daarnaast moet het drukniveau worden verhoogd tot 50 bar. Desalniettemin tonen deze experimenten aan dat het mogelijk is de lineaire motor te vervangen door een zuigercompressor. Daarmee wordt een belangrijk barrière richting opschaling weggenomen.

Full scale studies

Zoals eerder aangegeven is een zuigercompressor geschikt om op industriële schaal een TAWP aan te drijven als alternatief voor een lineaire motor. In tegenstelling tot een lineaire motor heeft een zuigercompressor een constante output, gegeven de systeemdruk en frequentie. Daarom moet een TAWP in dit geval vooral als basislast worden ingezet. Verder moet de zuiger olievrij opereren om olieophoping in de regenerator en warmtewisselaars van de TAWP te voorkomen.

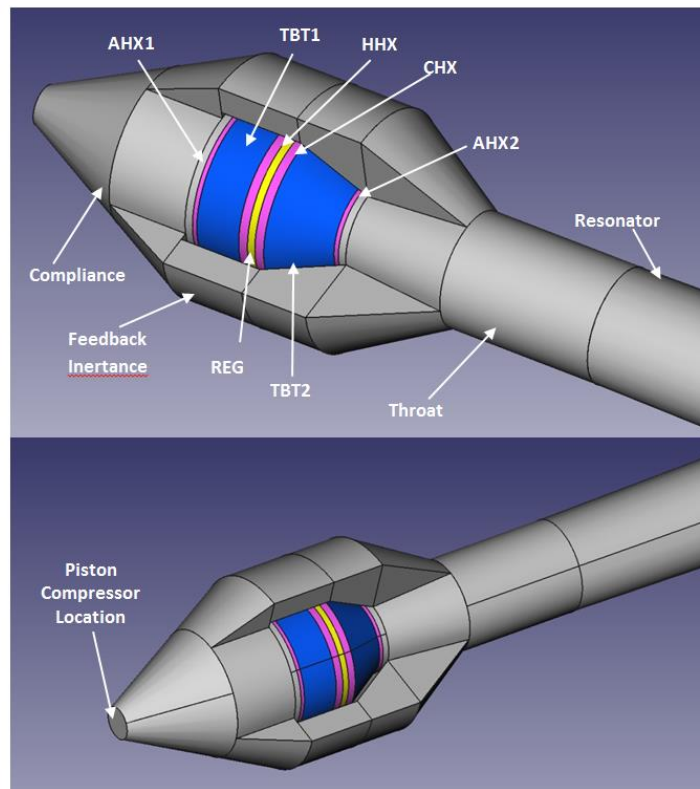
Howden Thomassen Compression systems (HTC) is een vooraanstaande partij op het gebied van olie-vrije zuigercompressoren met een groot vermogen. Momenteel worden die vooral toegepast voor waterstofcompressie in raffinaderijen. In overleg met HTC is vast te komen staan dat, met enige aanpassingen, hun zuigercompressoren geschikt zijn voor aandrijving van een TAWP. Het is mogelijk om 2 warmtepompen op 1 zuiger te zetten, daarmee het outputvermogen te verdubbelen zonder veel extra kosten. Een voorbeeld van de grootste HTC compressor is weergegeven in Figuur 9. Deze compressor heeft 6 dubbelwerkende zuigers.



Figuur 9 HTC zuigercompressor

Binnen deze activiteit is een ontwerp gemaakt van een pilotschaal TAWP, aangedreven door een zuigercompressor met een outputvermogen van circa 200 kW. Hierbij wordt warmte gepompt van 90°C naar 150°C. De COP moet minimaal 2,5 zijn. Er is uitgegaan van een beschikbare zuigercompressor van HTC, welke draait op 25 Hz. Voor de warmtewisselaars is uitgegaan van commercieel beschikbare gevinde buizen die een (groot) temperatuurverschil opleveren tussen de processtromen van 15°C.

De ontwerpberekeningen hebben geleid tot een conceptueel ontwerp dat is weergegeven in Figuur 10. De resonator (rechterzijde) en zuigercompressor (linkerzijde) zijn niet weergegeven in dit figuur. De modelberekeningen geven een outputvermogen van 181 kW, resulterend in een COP van 2.81.



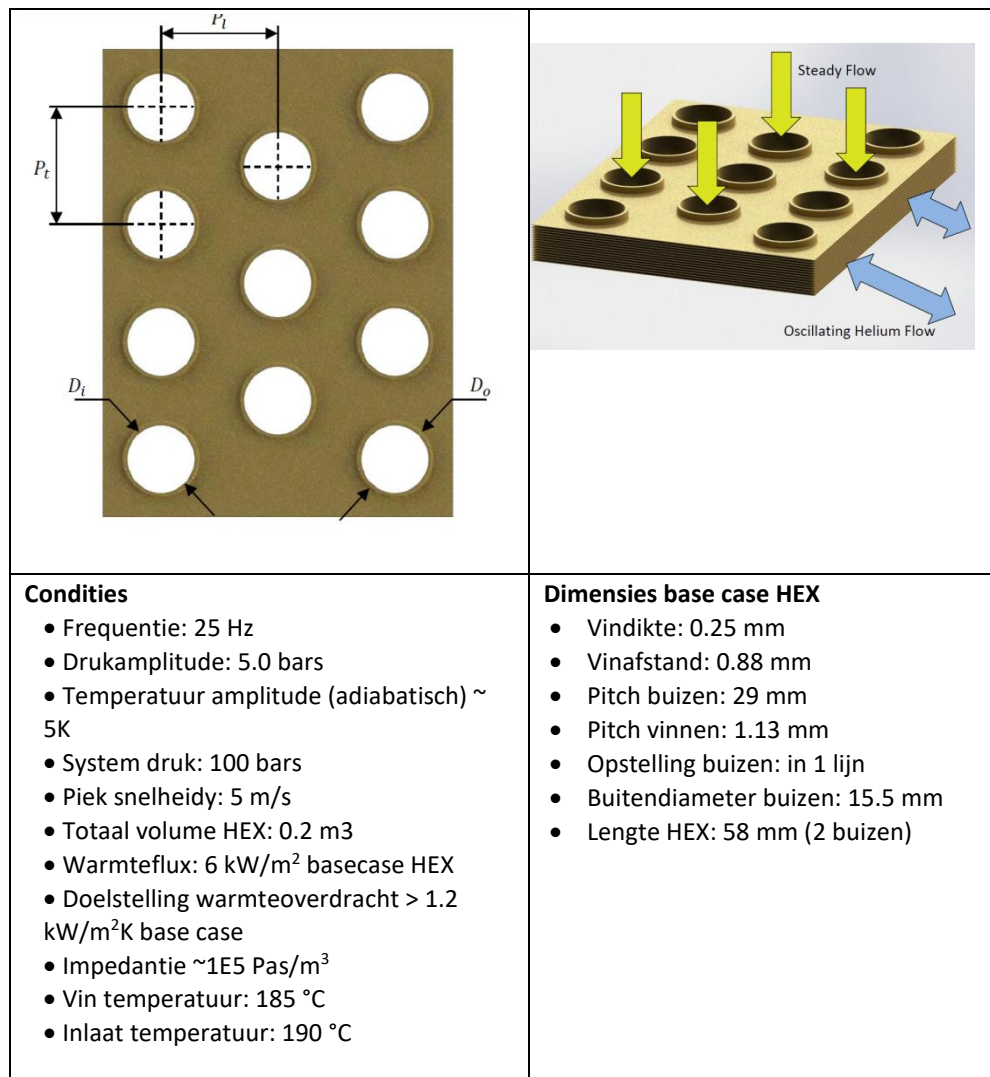
Figuur 10 Conceptueel ontwerp van een hoge-temperatuur elektrische TAWP

Ontwerpgereedschap

Voor het ontwerp van thermo-akoestische systemen wordt het softwarepakket DeltaEC gebruikt. Dit is een lineaire 1-dimensionale tool die goed bruikbaar is voor het conceptueel ontwerp van een TAWP. Echter, niet-lineaire en meerdimensionale effecten die vaak een negatief effect op het rendement hebben, worden hierin niet meegenomen. Daarom is binnen deze activiteit onderzocht hoe het gebruik van Computational Fluid Dynamics (CFD) kan bijdragen aan het ontwerp van een TAWP. Daarbij is met name gekeken naar warmteoverdracht en stromingsverliezen in oscillerende stromingen.

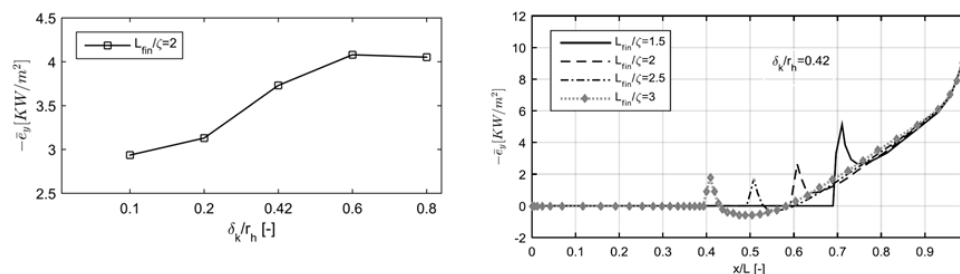
Warmteoverdrachtscorrelaties die doorgaans worden toegepast voor het ontwerp van warmtewisselaars zijn gebaseerd op stationaire stromingen en derhalve niet goed bruikbaar voor de oscillerende stromingscondities in een TAWP. Door middel van CFD wordt een tijdsafhankelijke berekening uitgevoerd aan een full-scale TA warmtewisselaar.

Als ontwerp is voor een warmtewisselaar bestaande uit gevinde buizen gekozen. Dit is een goed schaalbaar concept en kan tegen lage kosten worden gefabriceerd. Het initiële ontwerp is gebaseerd op standard warmteoverdrachtsberekeningen. De CFD berekeningen concentreren zich op de heliumzijdige warmteoverdracht. De randvoorwaarden qua snelheid- en drukamplitude zijn afkomstig uit de DeltaEC analyses. Figuur 11 geeft een overzicht van de geometrie en de afmetingen.



Figuur 11 Geometrie en afmetingen van gevinde buis warmtewisselaar voor CFD modellering

Naast de base case zijn berekeningen gemaakt voor verschillende HEX lengtes en vinafstanden. De lengte wordt genormaliseerd met de piek-piek afstand van de gasbeweging, terwijl de vinafstand wordt genormaliseerd met de thermische indringdiepte.



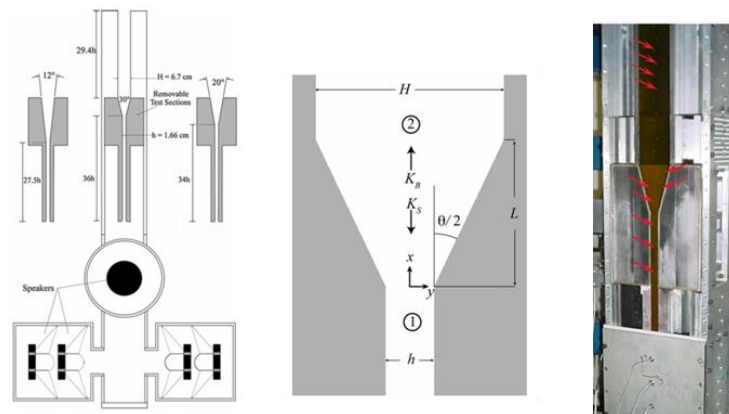
Figuur 12 Resultaten van gevoeligheidsberekening aan vinafstand (links) en lengte warmtewisselaar (rechts).

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 12. Het linker plaatje geeft de warmteflux als functie van de verhouding tussen de thermische indringdiepte (δ_k) en de helft van de vlnafstand (r_n). Maximale warmteflux wordt bereikt bij een verhouding van 0.6. Dit betekent dat de vlnafstand 3.33 keer de thermische indringdiepte moet zijn. Dit komt goed overeen met de vuistregel die bij ECN part of TNO wordt gehanteerd, namelijk dat de vlnafstand tussen 2-4 keer de thermische indringdiepte moet zijn. De verhouding voor de base case HEX is 4. Daarmee komt deze warmtewisselaar in de buurt van het optimum. Een iets kleinere vlnafstand leidt echter tot een grotere warmteflux en levert meer warmte overdragend oppervlak.

Het rechterplaatje in Figuur 12 laat zien dat de warmteflux omlaag gaat wanneer de lengte van de HEX wordt vergroot. Volgens de berekeningen moet de lengte van de warmtewisselaar (L) kleiner zijn dan $3/2$ keer de piek-piek afstand.

CFD is tevens toegepast om stromingsverliezen te berekenen in een diffuser (diameterverandering). De berekeningen worden vergeleken met metingen uit de literatuur. Omdat het gebruik van CFD voor dit soort toepassingen zeer tijdrovend is, wordt onderzocht of toepassing van zogenoemde RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) modellen bruikbaar is. Dit reduceert de benodigde rekentijd aanzienlijk.

De experimentele resultaten waarmee de CFD berekeningen worden gevalideerd is weergegeven in Figuur 13. In deze setup wordt een oscillerende stroming gecreëerd. Verschillende geometrieën zijn getest in deze setup. Tevens kon het stromingsprofiel worden gemeten met zogenoemde PIV technologie.

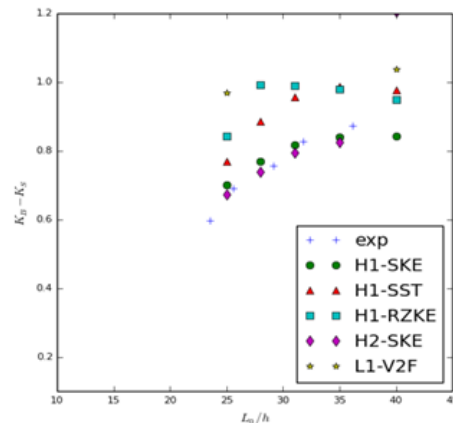


Figuur 13 Schets van de experimentele setup en een foto van de diffuser test sectie ([King and Smith(2011)])

Zowel in de metingen als in de berekeningen wordt het verschil tussen de verliescoëfficiënt van een voorwaartse als teruggaande stroming berekend ($K_B - K_S$). Figuur 14 geeft de CFD resultaten weer voor 5 verschillende turbulentiemodellen, vergeleken met de experimentele waarden. De ($K_B - K_S$) waarden zijn geplot als functie van de verplaatsingsamplitude van het gas, genormaliseerd met de breedte van het smalle gedeelte van de diffuser (h).

De ($K_B - K_S$) waarde neemt toe met toenemende verplaatsingsamplitude, zowel in de metingen als in de meeste CFD modellen. Goede overeenkomst tussen CFD en

experiment wordt gevonden voor beide standaard $k-\varepsilon$ models (SKE): H1-SKE and H2-SKE. Deze modellen voorspellen echter het loslaten van de flow minder goed. In generieke zin kan worden gesteld dat de RANS modellering goed voldoet in het voorspellen van de stromingsverliezen in thermo-akoestische systemen.



Figuur 14 Berekende en gemeten verliescoëfficiënten in de diffusor

4.3 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

Dit project heeft aangetoond dat een TAWP kan worden opgeschaald van de huidige 10 kW schaal naar uiteindelijk MW schaal met een acceptabel rendement op basis van een commercieel beschikbare zuigercompressor. Daarmee is een belangrijke barrière overwonnen richting opschaling.

Het besparingspotentieel van warmtepompen bij toepassing in destillatiekolommen is eerder vastgesteld. Op basis van een database van destillatiekolommen, waarbij zowel reboiler en condensortemperaturen bekend zijn alsmede de bijbehorende vermogen, kan per kolom worden berekend wat het besparingspotentieel is. Voor de Nederlandse industrie is dit potentieel vastgesteld op circa 20 PJ/jaar

4.4 Spin off

De ontwikkeling van de TAWP is voortgezet in het TKI TASTE project. De belangrijkste bevindingen uit het huidige project zijn daarin geïmplementeerd. In dit project wordt gewerkt met commercieel beschikbare buis-vin warmtewisselaars, wordt stoomproductie onderzocht en wordt het werk met zuigercompressoren gecontinueerd. De leverancier van zuigercompressoren (HTC) is nu ook als ontwikkelingspartner betrokken bij het project.

4.5 Openbare publicaties

Deze publicatie is openbaar en te vinden op <https://repository.tudelft.nl/tno/>.

4.6 Contactpersonen

Jan-Aiso Lycklama à Nijeholt (ECN part of TNO)
 Tel +31 650009607
 E-mail: jan-aiso.lycklamaanijeholt@tno.nl

5 Full scale test infrastructuur voor warmtepompen

5.1 Uitgangspunten en doelstelling

Bij de ontwikkeling van industriële warmtepompen op relevante schaal (> 100 kW) bestaat er momenteel geen mogelijkheid om dergelijke systemen op die schaalgrootte te beproeven, anders dan op een industriële locatie. Nadeel van een industriële locatie is de beperkte toegankelijkheid, beperktheid in condities waaronder kan worden getest en de interferentie met de bestaande bedrijfsvoering. Voor de ontwikkeling van industriële warmtepompen zou het derhalve wenselijk zijn een infrastructuur te realiseren waarmee warmtepompen op MW-schaal kunnen worden beproefd onder diverse condities.

De doelstelling van dit project is om een MW-schaal infrastructuur bij ECN part of TNO te realiseren waarmee warmtepompen van deze schaalgrootte kunnen worden getest door restwarmte van een gespecificeerd temperatuurniveau te kunnen aanbieden en door de geproduceerde proceswarmte af te nemen. De infrastructuur moet tevens de prestatie van de warmtepomp vaststellen.

Dit project moet een infrastructuur opleveren met de volgende eigenschappen

- Stoomlevering door warmtepomp mogelijk maken tussen 2 en 16 bar, 100 - 200°C, met een maximaal vermogen van 2 MW.
- Restwarmte kunnen leveren tussen 40-120°C, op twee verschillende temperatuurniveaus, indien gewenst.
- Een koeler voor het afvoeren van de overtollige warmte naar de omgeving met een capaciteit van 1 MW.

5.2 Resultaten

Het principe van de test installatie is weergegeven in Figuur 15. Hierin staat een verticale stippellijn, waarbij de onderdelen rechts van de stippellijn in de warmtepomp zijn opgenomen en links van de stippellijn de onderdelen van de infrastructuur.

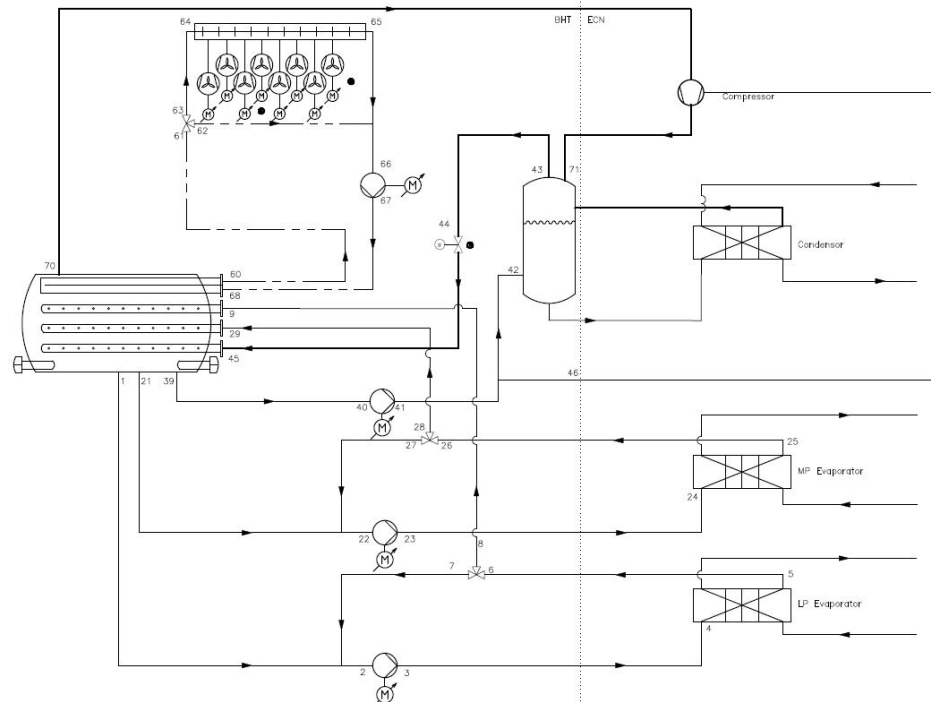
Het systeem bestaat uit een centraal buffervat dat vooraf op een ingestelde temperatuur wordt gebracht middels elektrische heaters. De ingestelde temperatuur heeft een waarde tussen de gewenste restwarmte en proceswarmte temperatuur. Vanuit dit buffervat kunnen twee bronnen van restwarmte worden gesimuleerd op verschillende temperatuurniveaus. Het temperatuurniveau wordt middels een bypass mengregeling op de gewenste waarde gebracht.

De afgestane warmte vanuit de gesimuleerde restwarmte wordt door de te testen warmtepomp opgenomen en opgewaardeerd naar een hogere temperatuur. De hoeveelheid gegenereerde proceswarmte door de warmtepomp is de restwarmte plus het opgenomen elektrisch vermogen.

De warmtepomp geeft de gegenereerde warmte af aan een stoom/water circuit in de infrastructuur. In een kleiner scheidingsvat wordt dit stoom/water mengsel gescheiden, waarna de stoom terugstroomt naar het centrale buffervat. Het

drukkniveau in het scheidingsvat is instelbaar, zodat de gewenste druk voor stoomproductie kan worden gekozen.

De geproduceerde stoom wordt in het centrale buffervat gecondenseerd, waarbij de vrijkomende warmte middels een koeler wordt afgevoerd.



Figuur 15 Process Flow Diagram full scale test rig

Een foto van de uiteindelijke gerealiseerde test infrastructuur is te zien in . Hierin is duidelijk het centrale buffervat te zien en het scheidingsvat (links op de foto).



Figuur 16 Foto van de full-scale test rig voor industriële warmtepompen

5.3 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

Deze faciliteit gaat bijdragen aan de ontwikkeling en implementatie van industriële warmtepompen. Industriële warmtepompen worden als key-technology beschouwd voor de warmtevoorziening in de industrie voor temperaturen tot 200°C. De warmtebehoefte binnen de Nederlandse industrie tot dit temperatuurniveau bedraagt circa 200 PJ per jaar. Met inzet van duurzame elektriciteit en industriële restwarmte kan deze behoefte volledig worden verduurzaamd.

5.4 Spin off

De gerealiseerde test infrastructuur zal worden ingezet in een aantal vervolg TKI projecten. Als eerste zal deze installatie worden toegepast in het project Low CapEx industrial heat pump (referentienummer TEEI117006).

5.5 Openbare publicaties

Dit rapport is openbaar en te verkrijgen op <https://repository.tudelft.nl/tno/>.

5.6 Contactpersonen

Simon Spoelstra (ECN part of TNO)
Tel +31 651002828
E-mail: simon.spoelstra@tno.nl

6 Ondertekening

Petten, 18 februari 2019



S. Spoelstra
Auteur

ECN part of TNO



A.K. Wemmers
Reviewer



H.C. Welleman
Deputy Research Manager