

TNO PUBLIEK

**Energy & Materials Transition**

Westerduinweg 3

1755 LE Petten

Postbus 15

1755 ZG Petten

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 50 65

**TNO-rapport****TNO 2023 R10108 | Eindrapport****Warmteterugwinning met sorptie in  
droogprocessen**

Datum	23 december 2022
Auteur(s)	Robert de Boer, Michel van der Pal
Aantal pagina's	20 (incl. bijlagen)
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	Industrial Drying Energy-efficiently using Absorption (IDEA)
Projectnummer	060.33906

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.

© 2023 TNO

TNO PUBLIEK

## Projectgegevens

Projectnummer	060.33906
RVO nummer	TEEI117007
Projecttitel	Industrial Drying Energy-efficiently using Absorption (IDEA)
Coördinator en consortium	TNO, Cargill, Bronswerk Heat Transfer
Project periode	1/1/2018 – 30-6/2022

Dit rapport is geschreven door Michel van der Pal en Robert de Boer, met bijdragen van Gustavo Otero, Wouter de Vries, Norbert Koot (Cargill) en Glenn de Cordt (Qpinch).

Contactpersoon: Robert de Boer, e-mail: robert.deboer@tno.nl

**TNO** innovation  
for life

**Cargill**<sup>TM</sup>

Dit project is financieel ondersteund vanuit het subsidieprogramma TopSector Energie (TSE) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) en uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). De specifieke subsidie voor dit project komt uit TSE 2017

# Inhoudsopgave

	<b>Projectgegevens .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Samenvatting .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Achtergrond en doelstellingen.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Resultaten .....</b>	<b>9</b>
3.1	Selectie van vloeibare sorbentia.....	9
3.2	Modelontwikkeling .....	9
3.3	Prototype ontwikkeling.....	10
3.4	Prestatietests en validering van het Qpinch-model .....	11
3.5	Full scale ontwerp en economische haalbaarheid .....	12
3.6	Conclusies en aanbevelingen.....	15
<b>4</b>	<b>Bijdrage aan de doelstellingen van het subsidieprogramma .....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Spin off-activiteiten .....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Publicaties.....</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>20</b>

# 1 Samenvatting

Drogen is een essentiële bewerkingsstap in de chemische, agrarische, biotechnologische, voedingsmiddelen-, polymeer-, keramische, farmaceutische, pulp- en papier-, mineraalverwerkende en houtverwerkende industrie. Het verwijderen van de vloeistof uit het product is een zeer energie-intensief proces: ongeveer 15% van het industriële energieverbruik is bestemd voor het drogen. Binnen de Nederlandse industrie is dit goed voor 90 PetaJoule (25TWh) per jaar.

Convectief drogen is de meest toegepaste droogtechniek, waarbij meestal verwarmde lucht wordt gebruikt om het drogen te bewerkstelligen. Dit proces resulteert in vochtige, lauwwarme lucht die grote hoeveelheden latente warmte bevat in de vorm van waterdamp, die via de schoorsteen verloren gaat. Het terugwinnen van deze latente warmte gaat gepaard met vele praktische uitdagingen, zoals vervuiling door kleverige deeltjes, en daarom wordt de lauwwarme, vochtige lucht gewoonlijk aan de atmosfeer afgegeven.

Door toepassing van een sorptieproces kan de latente warmte in de vochtige lucht worden teruggewonnen, terwijl vervuiling en kleverigheid worden vermeden. Het vocht wordt geabsorbeerd door het sorptiemiddel, waardoor droge lucht ontstaat, en de adsorptiewarmte verwarmt de lucht, die opnieuw kan worden gebruikt in het droogproces.

Het doel van het IDEA-project (**I**ndustrial **D**rying **E**nergy-efficiently using **A**bsorption) is de technische en economische haalbaarheid van het concept van vloeistofsorptie aan te tonen door de vloeistofsorptietechnologie te demonstreren onder omstandigheden die representatief zijn voor droogtoepassingen in de industrie. De activiteiten in het IDEA-project hebben geleid tot meer kennis en operationele ervaring met de toepassing van vloeistofsorptie voor de terugwinning van latente warmte van vochtige lucht.

Er is een nieuw procesmodel ontwikkeld om droogprocessen met vloeibare sorptie met verschillende sorptiemiddelen en onder diverse procescondities te bestuderen. Het gebruik van geconcentreerd fosforzuur als sterk vloeibaar sorptiemiddel werd geselecteerd voor verdere analyse en pilottests onder gesimuleerde industriële droogcondities.

Experimenten met een proefopstelling voor vloeibare sorptie, uitgevoerd door Qpinch onder gesimuleerde industriële droogomstandigheden, waren succesvol en leverden resultaten op voor het valideren en verfijnen van het fosforzuur systeemmodel van Qpinch. De testresultaten hebben de technische haalbaarheid van het voorgestelde sorptiedroogproces aangetoond.

Systeemsimulaties en prestatieanalyses zijn uitgevoerd op verschillende procesintegratieschema's en bedrijfsomstandigheden, om de opties met de hoogste energiebesparing tegen de laagste complexiteit en kosten te identificeren. Het energiebesparingspotentieel voor dit concept lag in een ruime marge van 85-20%, afhankelijk van de omvang van de luchtbehandeling en het type systeemintegratie. Het integratieschema dat een energiebesparing van 39% opleverde, is uitgewerkt

om de CAPEX te berekenen en de economische haalbaarheid te analyseren. Er werd een eenvoudige terugverdiëntijd van 4-6 jaar berekend.

De technische uitdagingen die bij de verdere ontwikkeling en toekomstige opschaling moeten worden aangegaan, betreffen de validering van het concept van de gepakte bed-absorber en een verdere verhoging van de temperatuur van de vloeibare sorbent tijdens de regeneratiefase.

## 2 Achtergrond en doelstellingen

### Industriële droogprocessen

Drogen is een proces waarbij een vloeistof, meestal water, uit een vaste stof wordt verwijderd. Dit proces wordt vaak gebruikt als laatste stap voor de afwerking van het product. Drogen is een essentiële bewerking in de chemische, agrarische, biotechnologische, voedingsmiddelen-, polymeer-, keramische, farmaceutische, pulp- en papier-, mineraal- en houtverwerkende industrie. Het verwijderen van de vloeistof uit de vaste stof is een zeer energie-intensief proces: ongeveer 15% van het industriële energieverbruik is bestemd voor het drogen. Binnen de Nederlandse industrie is dit goed voor 90 PetaJoule (25TWh) per jaar. Droogprocessen vergen niet alleen grote hoeveelheden energie, ze zijn ook zeer kritisch met betrekking tot de productkwaliteit.

Er zijn verschillende droogtechnologieën, afhankelijk van de toepassing. In het algemeen kunnen droogtechnologieën worden ingedeeld in:

- Convectief drogen - lucht wordt gebruikt voor het leveren van warmte voor het drogen en voor het verwijderen van het vrijgekomen vocht. Sproeidrogen is een voorbeeld van convectief drogen.
- Contactdrogen - lucht wordt gebruikt voor het verwijderen van vocht, terwijl de warmte voor het drogen via een oppervlak wordt geleverd. Papierproductie is een voorbeeld van contactdroging.
- Stralingsdroging - de warmte wordt geleverd door middel van straling. Infrarooddroging is een typisch voorbeeld van stralingsdroging.

Convectief drogen is de meest toegepaste droogtechnologie. De droogomstandigheden, zoals luchttemperatuur, -vochtigheid en debiet, en de verblijftijd worden geoptimaliseerd om de vereiste productkwaliteit te bereiken. Convectieve droogprocessen maken gewoonlijk gebruik van verwarmde lucht om het drogen te bewerkstelligen. Dit is een adiabatisch proces dat resulteert in vochtige, lauwe lucht. Deze lucht bevat grote hoeveelheden latente warmte in de vorm van waterdamp, die via de uitlaat verloren gaat.

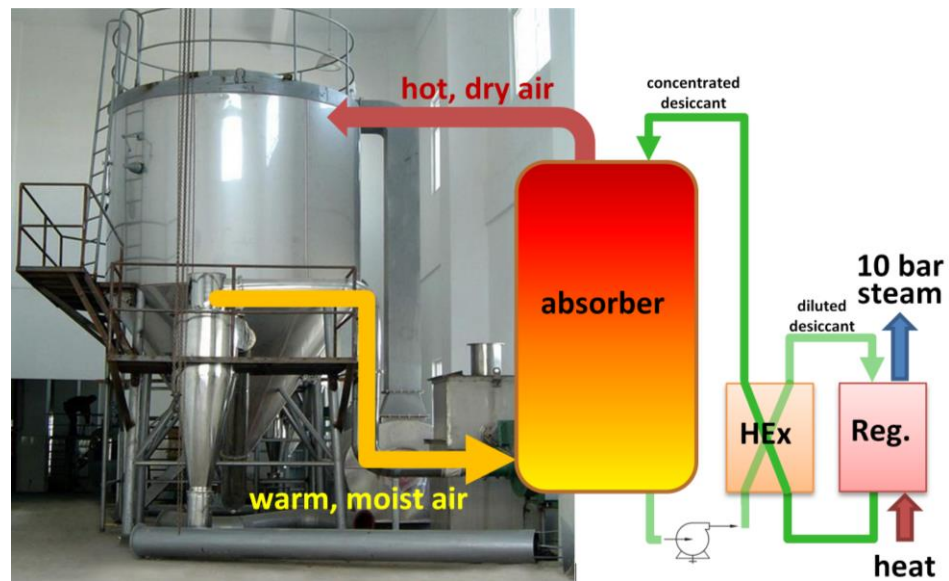
*Energiezuinig drogen:* In theorie kan deze latente warmte door condensatie worden teruggewonnen door de lucht af te koelen tot onder het dauwpunt. In de praktijk is de temperatuur van de teruggewonnen condensatiewarmte te laag voor nuttige toepassing, en condensatie is vaak niet mogelijk vanwege het risico van vervuiling of vervuiling door deeltjes die bij condensatie kleverig kunnen worden. Daarom wordt de lauwe, vochtige lucht gewoonlijk naar de omgeving afgevoerd.

### Probleemstelling

Om de latente warmte van de afvoerlucht van droogprocessen terug te winnen en de energie-efficiëntie te verhogen, is het probleem dat hier moet worden opgelost het terugwinnen en hergebruiken van de afvalwarmte van de uitgaande vochtige lucht op een hoger temperatuurniveau, zonder het productieproces en de productkwaliteit aan te tasten. Conventionele (latente) warmteterugwinning met behulp van condensatie van vocht uit de afvoerlucht is voor veel droogtoepassingen ongeschikt vanwege problemen met vervuiling of agglomeratie van deeltjes. Er zijn alternatieve methoden nodig om de latente warmte in de uitlaatlucht van de convectiedroger terug te winnen.

### Drogen door sorptie

Met behulp van een sorptieproces kan de latente warmte in de lucht worden teruggewonnen zonder door de kleverige zone van het gedroogde poeder te hoeven gaan. Het vocht in de lucht wordt geabsorbeerd door het sorptiemiddel, wat resulteert in drogere lucht, verwarmd door de absorptiewarmte. De verwarmde droge lucht kan opnieuw worden gebruikt om te drogen. Figuur 1 toont een typische industriële convectiedroger (sproeidroger), conceptueel gecombineerd met een vloeistofsorptie-eenheid. De hoeveelheid geleverde warmte in het sorptiesysteem is vergelijkbaar met de conventionele stand-alone sproeidroger, maar de regenerator van het sorptiesysteem levert een extra stroom stoom, die elders in het productieproces kan worden gebruikt.



Figuur 1 Industriële sproeidroger (links) schematisch verbonden met een vloeistofsorptie-eenheid (rechts).

### Vloeistofsorptie

Terwijl in een conventionele drooginstallatie de afvoerlucht naar de omgeving wordt afgevoerd, wordt in het voorgestelde vloeistofadsorptiesysteem deze warme, vochtige lucht naar de absorptie-eenheid gevoerd. In de absorptie-eenheid komt de afgevoerde lucht in tegenstroom in aanraking met het vloeibare droogmiddel. Het vloeibare droogmiddel absorbeert het vocht uit de uitlaatlucht terwijl het de sorptiewarmte afgeeft. Daardoor verlaat de lucht de absorber bij hoge temperatuur en lage vochtigheid. Het verdunde vloeibare droogmiddel wordt vervolgens naar een regeneratie-eenheid geleid, waar het geabsorbeerde water wordt omgezet in stoom die weer kan worden gebruikt in het droogproces of elders op de productielocatie. De voelbare warmteverliezen kunnen worden geminimaliseerd door vloeistof-vloeistof warmtewisselaars te gebruiken. Er wordt geen lucht ingesloten en verontreinigingen kunnen zo nodig worden uitgefilterd.

In het voorloper EELS<sup>1</sup>-project werd een dergelijk vloeistof-sorptiesysteem onderzocht. Dit project richtte zich op het energiebesparingspotentieel van de

<sup>1</sup> Joint Industry Project funded by the Ministry of Economic Affairs with reference number TEEI314007.

sorptiecyclus, de vereisten voor vloeibare droogmiddelen en een eerste schatting van de technisch-economische haalbaarheid van het concept. Uit de publicaties<sup>2,3</sup> van het EELS-project blijkt dat de vloeistofsorptiecyclus het potentieel heeft om 60 tot 100% van de droogenergie terug te winnen in de vorm van (voornamelijk) middendrukstoom. Fosforzuur ( $H_3PO_4$ ) werd geïdentificeerd als het vloeibaar sorptiemiddel bij uitstek. Al deze resultaten waren gebaseerd op modelberekeningen en kleine laboratoriumtests op de absorptiestap.

### **Doel en activiteiten van het project**

Het doel van het IDEA-project is de technische en economische haalbaarheid van het concept van vloeistofsorptie aan te tonen door de vloeistofsorptietechnologie te demonstreren onder omstandigheden die representatief zijn voor droogtoepassingen in de industrie.

De activiteiten in het project zijn gericht op het ontwerpen, bouwen en testen van een absorptie-eenheid op laboratoriumschaal, die in staat is de luchttemperatuur met ten minste 50°C te verhogen ten opzichte van de omstandigheden in de afgevoerde lucht van de droger en die ten minste 30 gram  $H_2O$  per kg lucht kan absorberen. De capaciteit van deze installatie op laboratoriumschaal bedraagt verscheidene kg geabsorbeerd water per uur, hetgeen overeenkomt met enkele kW vermogen.

Voorts wordt op basis van de kenmerken en prestaties van de laboratorium installatie een ontwerp op ware grootte van een vloeistofsorptiesysteem gemaakt om de technisch-economische haalbaarheid van het drogen met vloeistofsorptie te beoordelen.

Deze resultaten vormen een noodzakelijke stap in de verdere ontwikkeling van vloeistofsorptie voor droogtoepassingen.

---

<sup>2</sup> 'Study on advanced drying concept shows more than 58% energy savings potential in spray drying applications', ISPT Newsletter January 2017.

<sup>3</sup> 'Heat recovery in milk powder drying by using a liquid sorption process', Diego Pineda Quijano, Michel van der Pal, Carlos Infante Ferreira, Robert de Boer, Jasper Vollenbroek, Proceedings of 12<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam.



## 3 Resultaten

### 3.1 Selectie van vloeibare sorbentia

Uitgangspunt bij de selectie van potentiële vloeibare sorptiemiddelen is hun vermogen om vocht te absorberen bij hogere temperaturen. Vanuit thermodynamisch oogpunt neemt de sorptiesterkte van elk sorptiemiddel af met toenemende temperatuur, en daarom zijn voor de beoogde droogtoepassingen sorptiemiddelen met een zeer hoge sorptiesterkte nodig.

Typische vloeibare sorptiemiddelen die aan deze eisen kunnen voldoen, behoren tot de groep van sterke zuren en sterke basen. Voorbeelden hiervan zijn zwavelzuur ( $H_2SO_4$ ) salpeterzuur ( $HNO_3$ ) fosforzuur ( $H_3PO_4$ ) natriumhydroxide (NaOH). Deze zuren en basen moeten worden toegepast in sterk geconcentreerde oplossingen om hun sorptiesterkte te behouden bij de vereiste hoge bedrijfstemperaturen.

Het werken met sterk zure oplossingen stelt de regenerator voor de uitdaging om corrosiebestendig constructiemateriaal toe te passen. Deze moet bestand zijn tegen de hoge temperaturen die nodig zijn om het sorptiemiddel te regenereren en een bruikbare stoomkwaliteit voor de industriële locatie te genereren.

Natriumhydroxide heeft ook corrosiebestendige constructiematerialen nodig, maar heeft een extra uitdaging om kristallisatie van sterk geconcentreerde oplossingen te voorkomen. Het reageert ook met  $CO_2$  in de lucht, wat leidt tot de vorming van carbonaten, die zullen neerslaan.

Fosforzuur is gekozen als vloeibaar sorptiemiddel, omdat het de vereiste sorptiesterkte heeft om vochtige lucht te drogen bij de gewenste hoge temperaturen.

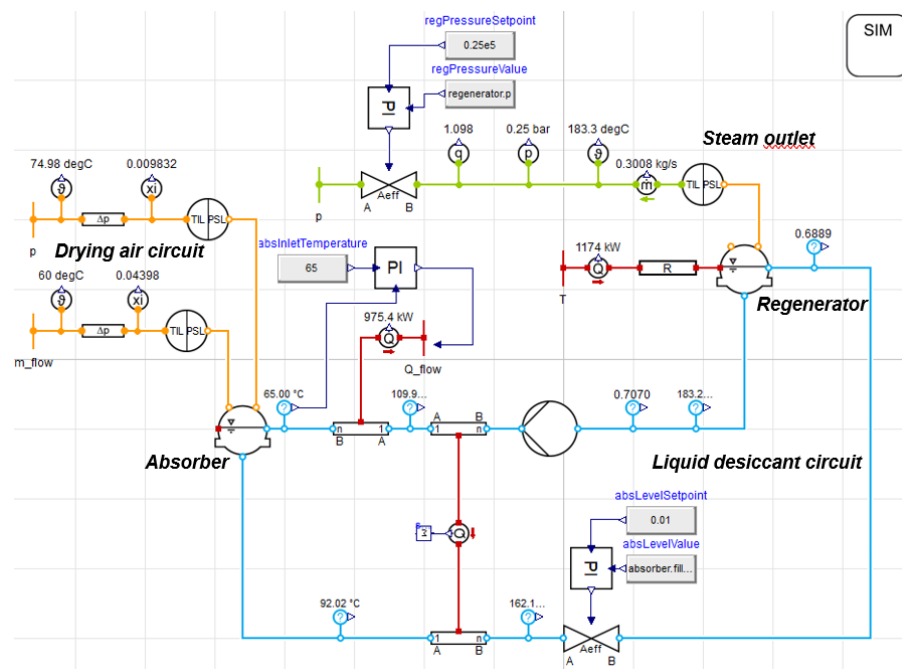
### 3.2 Modelontwikkeling

Om een goed inzicht te krijgen in de procescondities voor de werking van een op vloeistofsorptie gebaseerd droogstelsel is een model ontwikkeld dat een reeks bedrijfsomstandigheden voor het vloeistofsorptiesysteem kan simuleren, gekoppeld aan verschillende droogluchtcondities.

Dit model is gebouwd met behulp van de softwarepakketten Dymola en TIL als modelleer- en simulatieomgeving, gebaseerd op de modelleertaal Modelica. Het maakt gebruik van een bibliotheek van thermische componenten, waarmee stationaire en dynamische modellen van thermische systemen kunnen worden gemaakt, en van een bibliotheek van thermofysische eigenschappen van materialen, zoals de vloeibare sorbentia in het huidige systeem. Figuur 2 toont een overzicht van een generiek model van een vloeistofsorptiesysteem dat verbonden is met een droogluchtcircuit. De belangrijkste componenten en circuits zijn aangegeven.

Met het model kunnen de luchttoevoer, het type vloeibaar sorptiemiddel en de bedrijfsomstandigheden worden gevarieerd om de droogcapaciteit, de energiebalansen en de totale energie-efficiëntie van het proces te bestuderen.

De warmte- en massatransporteigenschappen in de absorber zijn de parameters die de modelresultaten sterk beïnvloeden. Deze parameters zijn bepalend voor hoeveel waterdamp wordt geabsorbeerd en hoeveel warmte wordt uitgewisseld tussen lucht en vloeibare sorbent en hoeveel uitwisselingsoppervlak in de absorber moet worden opgenomen.



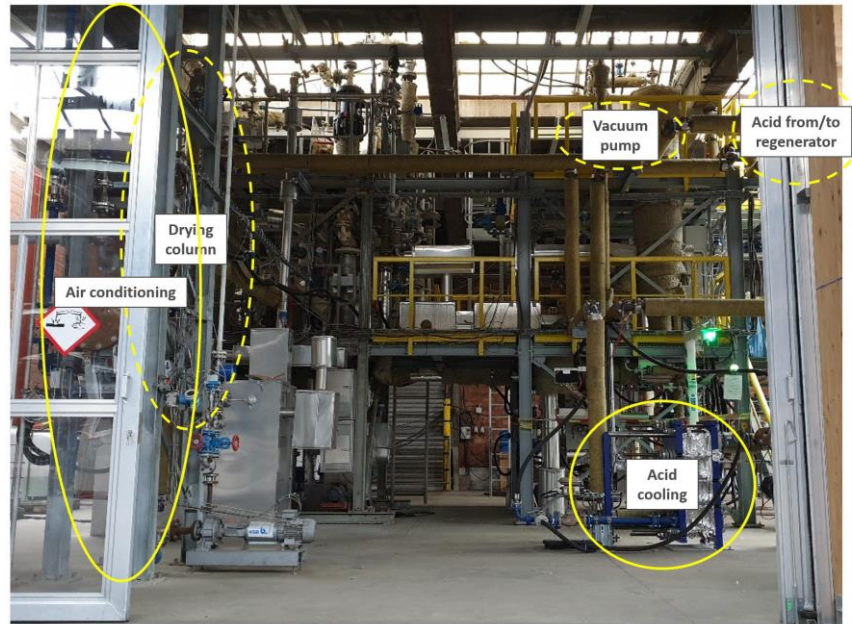
Figuur 2 Overzicht van het generieke vloeistofsorptiemodel dat is gebruikt om de toepassing van luchtdroging en warmteterugwinning te bestuderen.

Het bedrijf Qpinch uit Antwerpen, België, ontwikkelt industriële warmteterugwinning technologie op basis van fosforzuur als werkvloeistof in hun warmtetransformator. Qpinch gebruikt hun eigen processimulatietool (gebaseerd op Aspen) om hun warmtetransformator voor verschillende toepassingen te ontwerpen. Deze simulatietool werd in het IDEA-project toegepast om de bedrijfscondities voor de fosforzuurcyclus in dit innovatieve open sorptiedroogconcept te bestuderen. Het resultaat van de Aspen-modellering maakte een vergelijking mogelijk met het meer algemene, op de TIL-suite gebaseerde vloeibare sorptiemodel en een eerste schatting te verkrijgen van de in de absorber toe te passen warmte- en massatransportsnelheden.

### 3.3 Prototype ontwikkeling

De Qpinch-technologie en de kennis over het gebruik van fosforzuur in sorptieprocessen werden verder gekoppeld aan het IDEA-project. De Qpinch faciliteiten maakten het mogelijk het beoogde prototype op laboratoriumschaal te ontwikkelen en technische haalbaarheidsstudies uit te voeren onder gesimuleerde droogomstandigheden.

Uitgaand van een eerder prototype, werden wijzigingen aangebracht om 'open sorptie' mogelijk te maken. Er werd een luchtbehandelingsstap (temperatuur en vochtigheid) opgenomen om de uitlaatcondities van de droger te simuleren. Deze vochtige lucht werd in tegenstroom blootgesteld aan geconcentreerd fosforzuur in de absorber of 'droogkolom'. De regeneratie van fosforzuur vond plaats in een bestaande regeneratiekolom, die met stoom werd verwarmd.



Figuur 3: Overzicht van de proefopstelling voor de absorbertest (© Qpinch).

### 3.4 Prestatietests en validering van het Qpinch-model

#### 3.4.1 Experimenteel programma

Een reeks van 11 specifieke testomstandigheden werd toegepast op de absorptiekolom met variaties in luchtdebieten, vochtigheidsniveaus, vloeibaar fosforzuur-debiet, variaties in de fosforzuur inlaatconcentratie en inlaattemperatuur. Tijdens het testprogramma werd een inkomende absolute luchtvochtigheid tot 80 g/kg toegepast met een vochtgehalte bij de uitgang tot 8 g/kg, afhankelijk van de ingestelde parameters.

De resultaten van de basistests werden gebruikt om rechtstreeks te vergelijken met het bestaande model van het fosforzuursysteem (model 1) en ook om de massatransportsnelheid van het absorptiemodel te verfijnen, teneinde een goede fit te verkrijgen tussen de experimentele resultaten en het model (model 2).

#### 3.4.2 Modelvalidatie

Er zijn verschillende testcases gedefinieerd en experimenteel uitgevoerd en daarvan zijn processimulaties gemaakt in Aspen, op basis van zowel model 1 als model 2 om de resultaten te bestuderen. Een eerste doel is te beoordelen hoe dicht de testresultaten de simulatieresultaten van model 1 benaderen voor alle bestudeerde parameter variaties. Ten tweede wordt de absorptiekinetiek van model 2 gewijzigd om de resultaten van de test in het basisscenario te benaderen. Het is interessant te bestuderen of model 2 accuraat blijft bij het opleggen van alle uitgevoerde parameter variaties.

Bij de toelichting van de modelvalidering worden twee extra parameters gebruikt:

1) De moisture removal efficiency (MRE):

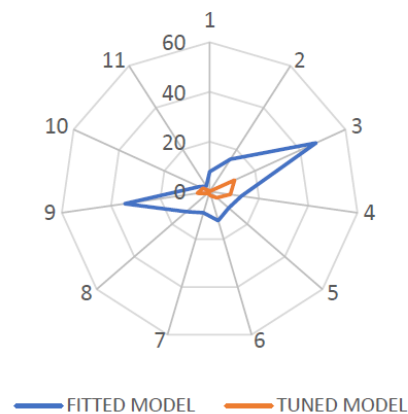
$$MRE (\%) = \frac{AH_{in} - AH_{out}}{AH_{in}} \quad AH = \text{absolute humidity of air}$$

2) De gemiddelde absolute procentuele fout (mean absolute percentage error, MAPE) wordt gebruikt om de fout tussen de simulatie en de werkelijke experimentele resultaten te kwantificeren. In de formule worden de MRE-waarden toegepast omdat deze de totale droogcapaciteit van de absorptie-eenheid weergeven:

$$MAPE = 100 * \text{abs}((MRE_{exp} - MRE_{sim}) / MRE_{exp})$$

Een overzicht van de afwijkingen tussen de experimentele resultaten en de modelvoorspellingen is weergegeven in figuur 4. In deze figuur zijn de afwijkingen voor alle 11 testgevallen uitgezet als MAPE-waarden (%). In blauw en oranje zijn de fouten weergegeven voor respectievelijk model 1 (fitted model) en het verfijnde model 2 (tuned model). De uitschieters in de vergelijking worden waargenomen voor extreme omstandigheden met zeer hoge luchtdebieten en voor zeer lage fosforzuurdebieten, waardoor het bevochtigde oppervlak in de absorber unit onvolledig wordt benut.

MAPE: test vs simulations

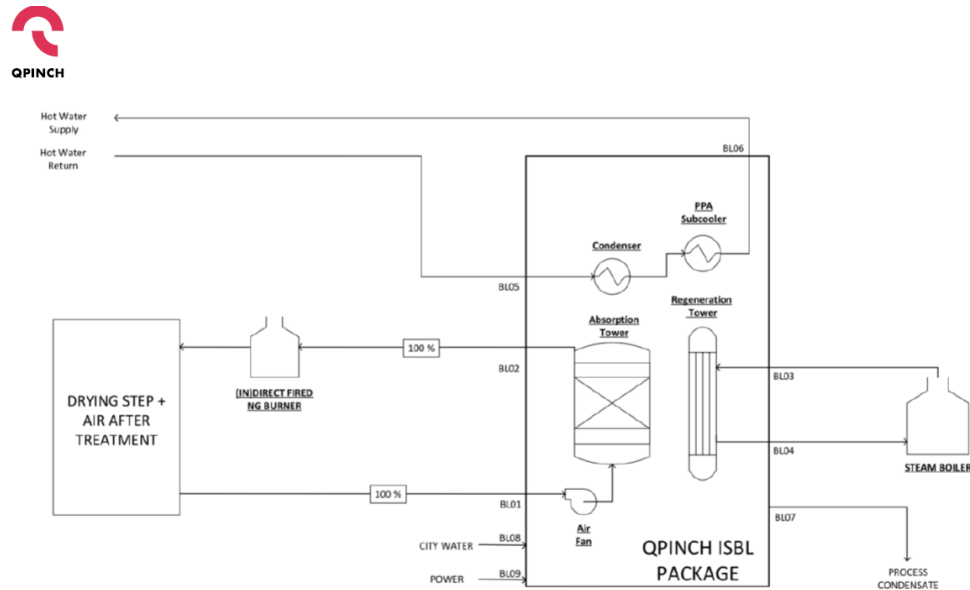


Figuur 4: Plot van de MAPE-waarden voor model 1 (blauw) en model 2 (oranje).

Uitgaande van een fout van nul tussen de test en de simulatie van model 2 voor het basisscenario, wordt voor alle gevallen een goede fit waargenomen met een fout van minder dan 10%. Dit geeft duidelijk aan dat met de gewijzigde kinetiek van de massaoverdracht in model 2 een goede vergelijking tussen de modelvoorspellingen en de testresultaten wordt verkregen, voor een breed scala van toegepaste bedrijfsomstandigheden.

### 3.5 Full scale ontwerp en economische haalbaarheid

Als uitgangspunt voor het ontwerp op ware grootte van een sorptiedroogstelsel op basis van fosforzuur zijn verschillende opties voor systeemintegratie van het sorptiesysteem met een industrieel droogproces onderzocht. De afgevoerde lucht van een vooraf gedefinieerd droogproces werd naar de absorptietoren van het sorptiedroogstelsel gevoerd, en de gedroogde en verwarmde lucht werd teruggevoerd naar het droogproces, zie figuur 5.



Figuur 5: Basis processtroomdiagram voor een geïntegreerd droogstelsel.

De verschillende integratieopties en bedrijfscondities werden eerst onderzocht om het systeem met het hoogste energierecuperatiepotentieel tegen de laagste kosten per MW te identificeren. In tegenstelling tot het eerdere onderzoek en de aannames<sup>4</sup> zijn de bedrijfscondities van het systeem, met name in de regenerator, beperkt tot de huidige ontwerplimieten voor temperatuur en druk, op basis van uitgebreide operationele ervaringen van Qpinch.

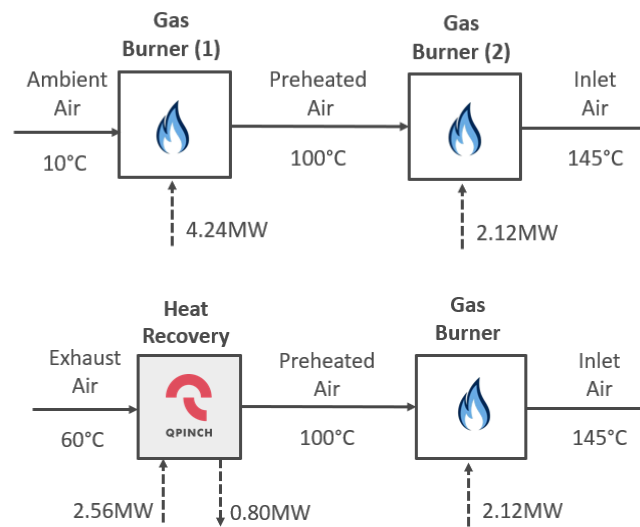
Om de waarde van deze hoge temperatuur warmterecuperatie door het sorptieproces te vergroten, is in het systeemontwerp specifieke aandacht besteed aan:

- Het verhogen van de luchttemperatuur (droge lucht) aan de uitgang van het absorptiesysteem, zonder afbreuk te doen aan het vereiste lage vochtigheidsniveau.
- Verhoging van de regeneratietemperatuur om bruikbare lage druk stoom te verkrijgen als warmtebron bij de uitlaat.

Het resulterende schema in figuur 5 is gebruikt om de warmte- en massabalansen te berekenen, de belangrijkste component specificaties af te leiden, een ISBL-kostenraming te maken en de business case-analyse uit te voeren.

De energiebalans voor de referentieconditie en de nieuwe situatie met sorptie-warmterecuperatie is hieronder weergegeven, figuur 6, waarbij een energiebesparing van 39% (2,48 MW verminderde energiebehoefte) is berekend als gevolg van de luchtdroging en voorverwarming in het sorptiewarmterecuperatiesysteem.

<sup>4</sup> 'Heat recovery in milk powder drying by using a liquid sorption process', Diego Pineda Quijano, Michel van der Pal, Carlos Infante Ferreira, Robert de Boer, Jasper Vollenbroek, Proceedings of 12<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam.



Figuur 6: Vergelijking van de energiebehoefte om 145°C drooglucht op te wekken in de referentiesituatie (boven) en in de nieuwe situatie met warmteterugwinning op basis van sorptie.

Voor de bovenstaande voorwaarde zijn de ISBL-kosten voor het warmteterugwinningsysteem berekend op 4,2 miljoen euro en bedragen de totale investeringskosten (ISBL+OSBL) 6 miljoen euro.

De business case-analyse is uitgevoerd op basis van de geraamde energiebesparingen, investeringskosten en operationele kosten. Bij deze berekening is uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- Netto bespaarde energie: 2,48 MW
- Aardgaskosten: 60 €/MWh
- Elektriciteitskosten: 120 €/MWh
- ETS CO<sub>2</sub>-prijs: 100 €/ton
- CO<sub>2</sub>-intensiteit aardgas: 0,22 ton CO<sub>2</sub>/MWh
- Bedrijfsuren: 8322 uur/jaar (95% operationeel)
- Omzettingsrendement van gas naar warmte: 90%
- Elektriciteitsverbruik: 75 kW

Met deze cijfers en uitgaande van een nauwkeurigheid van de kostenraming van ±35% is de eenvoudige terugverdientijd voor dit systeem 3,7 tot 5,7 jaar.

### 3.5.1 Effect van de tuning-factor op de simulatieresultaten

In het hoofdstuk over de modelvalidatie wordt een tuning-factor ingevoerd (model 2) om de simulatieresultaten in overeenstemming te brengen met de meetresultaten van de testfase. Aangezien deze factor helemaal aan het eind van het project werd verkregen, zijn de eerder verkregen modelsimulaties allemaal gebaseerd op model 1, dat de prestaties van het systeem enigszins overschatte.

Deze tragere kinetiek resulteert in een lagere droogprestatie wanneer alle andere inputparameters en ontwerpkenmerken van de absorber constant worden gehouden:

- Vochtigheid aan de uitgang: 17,1 g/kg (in plaats van 10,8 g/kg)
- Geabsorbeerde hoeveelheid H<sub>2</sub>O: 1,7 t/u (in plaats van 2,1 t/u)
- onttrokken latente warmte: 1,15 MW (in plaats van 1,44 MW)

Om opnieuw de gewenste vochtigheid tussen 9-11 gH<sub>2</sub>O/kg te bereiken, moeten de procesparameters worden geoptimaliseerd, bv. wijziging van de condities voor de inlaatvloeistof of de parameters voor de absorber ontwerp, en wordt een impactanalyse uitgevoerd op het absorptie-ontwerp en het algemene proces-ontwerp, zowel technisch als op de investeringskosten.

Het resultaat is dat het door optimalisering van alle inlaatparameters (sorptiestroom/temperatuur/concentratie) en absorptiereactor ontwerpparameters (hoogte/diameter/pakkingstype) mogelijk is een installatie te ontwerpen binnen de toepassingsdoelstellingen, die technisch en economisch haalbaar is. In vergelijking met de hierboven beschreven basissimulatie worden overeenkomstige kenmerken bereikt.

### 3.6 Conclusies en aanbevelingen

De in het IDEA-project uitgevoerde activiteiten hebben geleid tot een sterk toegenomen kennis en operationele ervaring met de toepassing van vloeistofsortie voor de terugwinning van latente warmte uit vochtige lucht.

Er is een nieuw procesmodel ontwikkeld om droogprocessen met vloeibare sortie met verschillende sorptiemiddelen en bedrijfsomstandigheden te bestuderen. Het gebruik van sterk geconcentreerd fosforzuur als sterk vloeibaar sorptiemiddel werd geselecteerd voor verdere analyse en pilot-tests onder gesimuleerde industriële droogcondities.

Experimenten met een proefopstelling voor vloeibare sortie, onder gesimuleerde industriële droogluchtcondities, werden met succes uitgevoerd en leverden resultaten op voor de validatie en tuning van het fosforzuursysteem model van Qpinch. De tests hebben de technische haalbaarheid van het voorgestelde sortiedroogproces aangetoond. De beoogde voorwaarden om de luchttemperatuur met ten minste 50°C te verhogen ten opzichte van de uitlaatluchtcondities van de droger en om ten minste 30 gram H<sub>2</sub>O per kg lucht te absorberen, werden bereikt.

Systeemsimulaties en prestatieanalyses zijn uitgevoerd op verschillende procesintegratieschema's en bedrijfsomstandigheden, om de opties met de hoogste energiebesparing tegen de laagste complexiteit en kosten te identificeren. Het energiebesparingspotentieel voor dit concept lag in een ruime marge van 85-20%, afhankelijk van de omvang van de luchtbehandeling en het type systeemintegratie.

Het integratieschema dat een energiebesparing van 39% opleverde, werd uitgewerkt om de CAPEX te berekenen en de economische haalbaarheid te analyseren. Er werd een eenvoudige terugverdientijd van 4-6 jaar berekend.

De huidige temperatuur limieten in het absorptieproces en het regeneratieproces hebben een beperkend effect op het extra voordeel van het sortiesysteem in droogsystemen, in vergelijking met conventionele warmteterugwinningssystemen. Aan deze beperkingen van de bedrijfstemperatuur bij absorptie en regeneratie moet meer aandacht worden besteed om de mogelijkheden en het energiebesparingspotentieel voor warmteterugwinning en hergebruik te optimaliseren.

Met bovenstaande resultaten, en rekening houdend met het feit dat economische haalbaarheidsanalyses zeer gevoelig zijn geworden voor de huidige volatiliteit van de energieprijzen, wordt verdere ontwikkeling van het concept van vloeibare sorptiedroging aanbevolen. De lessen van de experimentele en modelleringsactiviteiten geven aan dat de volgende onderwerpen in de toekomstige ontwikkelingsstappen moeten worden opgenomen:

- Wijziging van de huidige absorptieopstelling in een gepakt bed configuratie, om de prestaties te verbeteren en de modelvalidatie uit te breiden.
- Gerichte onderzoek naar de karakterisering en verbetering van de massaoverdracht van vloeibaar fosforzuur.
- Verificatie van de chemische compatibiliteit van fosforzuur en gedroogd product.
- Verhogen van de bedrijfstemperatuur van de regenerator om de stoomtemperatuur en -druk te verhogen.
- Uitvoering van een marktstudie om de verschillende droogtechnologieën en procescondities te screenen en de meest interessante toepassingsgebieden voor sorptie droogtechnologie te beoordelen.
- Beoordeling van integratie en energiebesparingspotentieel op basis van het herontwerp van de droogtechnologie in greenfield-projecten (of revamp in brownfields).



## 4 Bijdrage aan de doelstellingen van het subsidieprogramma

### **Duurzaam energiesysteem**

Industriële droogprocessen vormen de beoogde markt voor de sorptie gebaseerd warmteterugwinningstechnologieën. Het grootste deel van de energiebehoefte voor droogprocessen is gebaseerd op fossiele brandstoffen, met name aardgas gestookte systemen. Droogprocessen leveren een aanzienlijke bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot, en een verhoging van de energie-efficiëntie en dus een vermindering van de energievraag zal bijdragen aan de vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot.

In het kader van het IDEA-project is de energie-efficiëntie van droogprocessen in detail onderzocht, met bijzondere nadruk op de terugwinning en het hergebruik van warmte uit de uitlaatlucht van drogers. De modelstudie en het experimentele werk hebben de technische mogelijkheden en beperkingen van het nieuwe warmteterugwinningsconcept aangetoond. Er zijn verdere ontwikkelingsbehoeften vastgesteld, en het oplossen van deze technische uitdagingen in vervolgvactiteiten kan leiden tot demonstraties en uiteindelijk commerciële toepassingen van het sorptie warmteterugwinningsconcept.

### **Ontwikkeling van kennis**

Het IDEA-project heeft kennis gegenereerd op het gebied van sorptie gebaseerde warmteterugwinningstechnologie voor het gebruik ervan als een energie efficiëntie-maatregel voor (convectieve) droogtoepassingen. Bij de kennisontwikkeling in het project is een goed evenwicht bereikt tussen de gedetailleerde thermodynamische aspecten, de experimentele validatie, de systeemmodellering, de procesintegratie en de economische evaluatie. Deze kennisbasis is een nuttige bron voor toekomstige studies over warmteterugwinning en energie-efficiëntie in droogprocessen, evenals in andere processen die vochtige lucht als afvalwarmte hebben, zoals rookgassen van verbrandingsprocessen.

## 5 Spin off-activiteiten

Tijdens de projectperiode (2017-2022) lag de nadruk van het onderzoek en de ontwikkeling op grootschalige industriële toepassingen. Warmteterugwinning op basis van vloeistof sorptie maakt het in principe ook mogelijk om droogprocessen voor gesloten lucht uit te voeren om geuren/aromaten vast te houden en te concentreren. Deze toepassingen, meestal op kleinere schaal, zouden een nichemarkt voor sortiedroging kunnen vormen, die verder moet worden verkend.

De resultaten van de huidige activiteiten wijzen op voldoende potentieel voor verder onderzoek naar sorptie gebaseerde droogprocessen. De belangrijkste uitdagingen liggen in het versnellen van warmte- en massaoverdracht in de absorber en de haalbare regeneratorcondities, onderwerpen die in vervolgonderzoeksprojecten moeten worden uitgewerkt.

De in dit project ontwikkelde modelleringsinstrumenten zijn zeer geschikt om alternatieve configuraties van op sorptie gebaseerde droog- en warmteterugwinningsconcepten te bestuderen en te simuleren voor verschillende vloeibare sorbentia en een breed scala aan droogprocescondities.

Op dit moment is de verdere ontwikkeling van de fosforzuur sorptietechnologie voor commerciële toepassingen geen prioriteit voor Qpinch. Een eerste vereiste is dat er een geïnteresseerde eindgebruiker betrokken is, die bereid is mee te werken aan de verdere ontwikkeling met investering van middelen.

Zodra hieraan is voldaan, ziet Qpinch het ontwerpen, assembleren en exploiteren van een industriële pilot-plant op grotere schaal als de volgende stap, alvorens over te gaan tot commerciële schaal. De resultaten van deze pilot-plant zouden cruciaal zijn voor de validatie van model 1 of 2, en om de gedetailleerde engineering te starten.

## 6 Publicaties

Tijdens het proces zijn geen publicaties gemaakt.

## 7 Ondertekening

S. van Loo  
Research Manager

R. de Boer  
Auteur