

Eindrapport- IDRW 1.0

Pim Donkers¹, Olaf Adan^{1,2}, Henk Huinink², Henry van der Meer³

1 TNO Materials & Solutions / email: <u>olaf.adan@tno.nl</u> 2 TU Eindhoven/ email: <u>h.p.huinink@tue.nl</u> 3 Caldic / email: <u>h.vandermeer@caldic.nl</u>

Onderwerp:Eindrapport IDRW 1.0Projectnummer:TEUE218004Projecttitel:IDRW 1.0Penvoerder:Technische Universiteit EindhovenMedeaanvragers:TNO, CaldicProjectperiode:1 februari 2019 tot 1 september 2021

Het project is uitgevoerd met Topsector Energiesubsidie van het Ministerie van Economische Zaken.



Contents

1	Inho	nhoudelijk eindrapport								
	1.1	Samenvatting								
	1.2	Inleiding								
	1.3	Doelstelling								
	1.4	Werkwijze	4							
	1.5	Resultaten	5							
	1.5.2	TCM module								
	1.5.2	2 De verdamper/condensor	7							
	1.5.3	3 Ontwikkeling van TCM batterij 1	.0							
	1.6	Vervolgactiviteiten en spin-off 1	.1							
	1.7	Conclusie en aanbevelingen 1	.1							
2	Uitv	oering van het project1	.3							
	2.1	Samenwerking1	.3							
	2.2	Problemen tijdens het uitvoeren van het project 1	.3							
	2.3	Wijzigingen ten opzicht van het projectplan								
	2.4	Financieel overzicht								
	2.5	Kennisverspreiding en PR 1	.4							
Bi	jlage 1:	Overzicht WP 1	.5							
Bi	jlage 2:	Samenvatting WP 2 2	27							



1 Inhoudelijk eindrapport

1.1 Samenvatting

IDRW 1.0 had de ambitie **het realiseren van een doorbraak in compacte warmteopslagsystemen** op basis van thermochemische materialen (TCM). Daartoe zou een nieuw type reactor ontwikkeld worden met een vermogen >250 W/dm³ en een energiedichtheid >0.7 GJ/m³, hetgeen een enorme sprong vooruit in prestatie betekent ten opzichte van de huidige TCM-reactor prestaties. IDRW 1.0 beoogde een proof-of-principle te leveren van een zogenaamde dynamisch bed reactor: d.w.z. de TCM wordt tijdens laden/ontladen getransporteerd in de reactor. De twee meest cruciale componenten, die daartoe in dit project systematisch onderzocht zouden worden, waren: 1) het efficient samenbrengen van de TCM en waterdampen 2) conditionering van waterdamp.

In dit project zijn daarom twee kritische onderdelen van de warmtebatterij onderzocht en ontwikkeld: de verdamper/condensor en de TCM module. Beide onderdelen zijn cruciaal voor de marktintroductie en de uitrol van warmteopslag met behulp van TCM.

- Verdamper/condensor: In dit project is aangetoond dat het mogelijk is een verdamper en condensor te ontwikkelen welke geïntegreerd is met elkaar en voldoende vermogen kan leveren.
- **TCM module**: Het bewegen van de TCM massa is een uitdaging gebleken. Dit is opgelost middels een slim ontwerp van de reactor, zodat niet de volledige opslag geactiveerd hoeft worden tijdens laden/ontladen lijkt. Dit verhoogd de efficiëntie van het systeem significant.

Vanwege de ontwikkelingen van de verdamper/condensor en het reactor ontwerp was het noodzakelijk om een testsysteem te ontwikkelen waarin de verschillende componenten geïntegreerd konden worden en getest. Dit heeft geleid tot een demonstratieopstelling op labschaal. Dit heeft veel media aandacht gegenereerd^{1,2,3,4,5}.

Dit project heeft er mede toegeleid dat **Cellcius B.V., een spin-off van TNO en TU/e** is opgericht. Cellcius heeft tot doel om een warmtebatterij, gebaseerd op het in IDWR onderzochte systeem, naar de markt te gaan brengen. Deze spin-off heeft in eerste instantie de focus om een TCM batterij te maken, die ofwel inpasbaar is als add-on bij bestaande warmteafgifte systemen of als een wijkbatterij kan dienen. De oprichting van de spin-off is illustratief voor het vertrouwen van beide organisaties en het Cellcius-team in de ontwikkelde warmtebatterijtechnologie.

1.2 Inleiding

De Nederlands overheid heeft als doel gesteld gasvrij te worden¹, wat vraagt om een alternatieve invulling van de warmtevoorziening. Hiervoor is het noodzakelijk leveringszekerheid van warmte te garanderen. Vanwege het fluctuerende karakter van hernieuwbare bronnen (bv. zon en wind) wordt er gezocht naar een opslagsysteem dat energieoverschotten kan opslaan en warmte kan leveren in tijden van schaarste, centraal en decentraal. Een veel belovend opslagsysteem werkt met thermochemische materialen (TCM).

¹ Technology for climate beyond Paris: the next business wave, White paper 2019, TNO Unit E

² De zoutbatterij die een gezin door de zonloze en windstille periodes heensleept - Innovation Origins, 25-3-2021

³ Podcast, Warmte opslag: De warmte batterij komt eraan. Dutch Green Building Week 22-9-2020

⁴ Superbatterij kan duurzame energie in huis omzetten in warmte, Stefan ten Teije, 14-08-19, Algemeen Dagblad

⁵ Opslag; één van de grootste uitdagingen voor de energie opslag, BNR, De Technoloog, 24-9-2021



Op grond van eerdere studies lijken warmtebatterijen met TCMs binnen bereik die een opslagcapaciteit hebben van $0.5 - 1 \text{ GJ/m}^3 (3-15 \text{ €/MJ})^6$ hetgeen qua energiedichtheid significant hoger is dan andere state-of-the-art opslagvormen die lokaal toegepast worden. Namelijk, voor Li-ion batterijen (gebaseerd op Tesla Powerwall) is de opslag $0.3 - 0.4 \text{ GJ/m}^3 (30-120 \text{ €/MJ})^7$ en voor warmteopslag via water is de energiedichtheid $0.1 - 0.2 \text{ GJ/m}^3 (2-10 \text{ €/MJ})^8$. Daarnaast verliest een TCM geen energie bij langdurige opslagperiodes in tegenstelling tot Li-ion batterijen en warm wateropslagen.

In de huidige te ontwikkelen TCM reactoren zitten voornamelijk zouthydraten of zeolieten, die middels hydratatie warmte afgeven. Regeneratie van de batterij gebeurt vervolgens via het drogen (dehydrateren) van deze materialen. De warmte is opgeslagen zolang het water en de droge TCM niet bij elkaar komen. Voor een optimale prestatie van warmtebatterijen is het essentieel dat de TCM gecontroleerd water afgeeft of opneemt. Indien het water in het systeem wordt opgeslagen, spreken we van een gesloten systeem. Het water en de TCM blijven in dat geval tijdens de gehele levensduur van de warmtebatterij in het systeem. Het huidige alternatief is een open systeem, waarbij het water niet in het systeem wordt opgeslagen en water aan- of afgevoerd wordt naar het systeem tijdens hydrateren en dehydrateren.

1.3 Doelstelling

IDRW 1.0 had de ambitie **het realiseren van een doorbraak in compacte warmteopslagsystemen** op basis van thermochemische materialen (TCM). Daartoe zou een nieuw type reactor ontwikkeld worden met een vermogen >250 W/dm³ en een energiedichtheid >0.7 GJ/m³, hetgeen een enorme sprong vooruit in prestatie betekent ten opzichte van de huidige TCM-reactor prestaties. IDRW 1.0 beoogde een proof-of-principle te leveren van een zogenaamde dynamisch bed reactor: d.w.z. de waterdamp en TCM worden tijdens laden/ontladen optimaal getransporteerd in de reactor. De twee meest cruciale componenten zullen systematisch onderzocht worden: 1) de TCM module en 2) verdamper/condensor.

1.4 Werkwijze

Centraal in het project stond het ontwikkelen van een nieuw type reactor om op significante schaal de potentie van de gesloten loop reactor te verkennen. Met behulp van de resultaten van dit project kan er gezocht worden naar mogelijkheden om de technologie door te ontwikkelen, te testen onder emulatiecondities, en uiteindelijk ook te demonstreren bij eindgebruikers. Er is gekozen om de eerder genoemde kritische onderdelen (verdamper/condensor en TCM module) te bestuderen in een tweetal werkpakketen

⁶ Afschatting op basis van de onderdelen in de TCM batterij ingekocht bij een verkoper. De aangegeven range loopt van 100%-500% van de ingeschatte kosten, waarbij 100% de ondergrens is en de effecten van schaalvergroting nog niet zijn meegenomen.

⁷ Op basis van gegeven van de Tesla power wall: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Powerwall. De aangegeven range loopt van 25-100% inkoopprijs consument.

⁸ Op basis van een zonneboiler van 500 l; https://www.zonneboiler-zelfbouw.nl/buffervaten/. De aangegeven range loopt van 25-100% inkoopprijs consument.



WP 1 TCM Module: In dit werkpakket lag de focus op het bestuderen van het TCM bed en het daarin plaatsvindende water- en massatransport. Om het risico te verlagen en de effecten van het bed te observeren werd er in dit project voornamelijk gewerkt worden aan betrouwbare stabiele TCM materialen uit bestaande projecten. Er werd gewerkt met de meest stabiele TCM van dit moment: zeolieten (13X; 5A). Aanvullend zouden zouthydraten, die gekarakteriseerd zouden worden en goede resultaten vertoonden in andere aanliggende projecten (TKI Cap4heat, TKI Dope4heat, TKI Me4tes, TKI MJP CCO, H2020 CREATE)\, meegenomen worden. De testen aan het bed zouden gedeeltelijk in de NMR gebeuren, zodat er wateropname profielen in situ gemeten kunnen worden, als ondersteuning bij de performance analyses. Daarnaast zouden massa- en luchtvochtigheidsmetingen uitgevoerd worden van inflow en outflow, maar ook in het bed zelf.



Figuur 1: fasering van de ontwikkeling van de dynamische bed reactor

WP 2 Verdamper/condensor : Dit werkpakket onderzocht het reguleren van de luchtcondities (waterdampdruk) in de reactor. TU/e en TNO brachten kennis in met betrekking tot respectievelijk open en gesloten⁹ reactoren. De wisselende omstandigheden en de eis om het uiteindelijk systeem zo compact mogelijk te maken vroeg om een gestructureerde aanpak. Vooral voor hogere luchtdrukken was er weinig kennis aanwezig hoe de regulatie efficiënt kan plaatsvinden (condensatie en verdamping). Tot dan toe was er vooral gekeken naar puur water systemen (en soms in combinatie met niet-condenseerbare gassen), hetgeen niet toepasbaar is voor de verwachte reactorcondities met een draaggas van een paar bar. Op basis van experimenten (massa en luchtvochtigheidsmetingen) en een te ontwikkelen fysisch model, zou een verdamper/condensor ontworpen worden, die onder wisselende dampdrukken kan functioneren.

1.5 Resultaten

1.5.1 TCM module

Binnen dit project zijn verschillende type TCM bedden geanalyseerd: statisch bed, fluidizerend bed, screw reactor. Voor het verplaatsen van de TCM is er onderzoek gedaan naar verschillende manieren om de TCM van de opslag naar het reactor gedeelte te transporteren. In dit rapport zullen de hoofdbevindingen besproken worden. Hierbij wordt voornamelijk gekeken hoe op een effectieve methode de TCM en waterdamp bij elkaar gebracht kan worden, zonder dat de TCM zijn kwaliteiten verliest. Belangrijk hierbij is dat de hoeveelheid actief materiaal flexibel beschikbaar is om te reageren. Dit zorgt voor minder verliezen tijdens laden/ontladen en voldoende vermogen wanneer mogelijk.

In eerste instantie is gezocht naar een bewegend bed tijdens het hydrateren/dehydrateren, waar de lucht doorheen geblazen zou worden. Na initiële testen met het materiaal is er voor gekozen dit traject niet door te zetten vanwege het hoge risico op agglomeratie (in een traag bewegend bed <0.5 m/h) of het hoge energie verbruik en verkruimeling van de TCM in snel bewegende bedden zoals "fluidized bed" reactor.

⁹ http://www.merits.eu/



Uiteindelijk is daarom gekozen voor een gecompartimenteerde reactor, waarbij het materiaal niet verplaatst wordt, maar de luchtstroom steeds verlegd wordt. Hiervoor zijn meerdere geometrieën ontwikkeld in combinatie met analyse methodes zoals kernspin resonantie (NMR). Een voorbeeld van een NMR experiment is weergeven in Figuur 2. Om de uur is een signaalprofiel gemeten aan de reactor, waaruit de locale hydratiegraad van het zout in de reactor plaats afhankelijk bepaald is. De eerste profielen zijn zwart, welke per profiel meer naar groen kleuren. Het allerlaatste profiel is rood gekleurd. Hier is te zien hoe een kleine reactor gevuld met K₂CO₃ anhydraat (lengte 110 mm) reageert op het doorblazen met een vochtige luchtstroom (20°C inlaat met 8 mbar waterdampdruk). Duidelijk is te zien dat de reactor over de volle breedte van de reactor reageert na een korte initialisatie periode. Dit is te zien aan de NMR data, maar ook aan de waterdamp druk in de uitlaat van de reactor. Dit resultaat laat zien dat met het materiaal (geproduceerd binnen CREATE, korrel grootte 3-5 mm¹⁰) de reactor een lengte van meer dan 110 mm moet hebben. Een andere belangrijke observatie is dat de totale hydratatie tijd meer dan 120 uur in beslag nam, waarvan enkel de eerste 20 uur een constant vermogen gerealiseerd is. Door de reactor te verlengen kan deze periode van constant vermogen verlengd worden. Een materiaal met hogere kinetiek lijkt ook noodzakelijk om de prestaties van het TCM bed te verhogen.



Figuur 2: links: Hydratatie profielen van een bed K_2CO_3 korrels, waarbij de tijd tussen opeenvolgende profielen 3 uur was. De luchtflow was 0.4 L/min (0.02 m/s). rechts: De waterdamp druk van de in en uitlaat zijn geplot tegen de tijd¹¹.

Met behulp van reactiekinetiek van het materiaal bij verschillende hydratatie condities is een 1D model opgezet in MATLAB[®]. Dit model helpt inzicht te verkrijgen in het effect van de reactiekinetiek op de breedte van het front en de prestaties van de warmtebatterij. Op basis van analysis met dit model en reactie kinetiek van het materiaal is geconcludeerd dat de reactiekinetiek van het startmateriaal minimaal 3x keer hoger moet zijn om een reactiefront met een breedte van ongeveer 10 cm te realiseren. De projecten H2020 HEAT-INSYDE en NWO MAT4HEAT, waarin de TU/e en TNO ook samenwerken, hebben aangetoond dat dit mogelijk is.

Op basis van de informatie over het reactiefront op basis van kinetische data van de beschikbare TCM materialen is de geometrie van de reactor onderzocht. Hierbij zijn de volgende eigenschappen bekeken:

- 1. Doorblaasbaarheid met de gevraagde volumestroom met minimale ventilatorvermogens.
- 2. Stabiele reactieprestaties (vermogen) gedurende 80% van de reactieprocess
- 3. Mechanisch stabiel voor drukwisselingen

Op basis van deze eisen is een reactor ontworpen van 20x20x50 cm, die vervolgens ook geconstrueerd is, zie Figuur 3. Er is gekozen voor een rechthoekige reactormodule, wat modulair gebruik faciliteert, omdat de

¹⁰ J. Houben et al. K₂CO₃ in closed heat storage systems, Renewable Energy, Volume 166, 2020, Pages 35-44, (section 2)

¹¹T. Raemaekers, Hydration of a packed bed with K2CO3 particles for thermochemical energy storage: an experimental study, 2021, Master Thesis TU/e



reactormodulles makkelijk stapelbaar zijn. In een vervolgonderzoek zullen de gebruikte constructie materialen onderzocht moeten worden. Het voordeel van staal is dat het gemakkelijk te bewerken is, wat handig is voor een test opstelling. In de toekomst zullen er keuzes gemaakt kunnen worden voor materialen die o.a. minder warmte geleiden, minder corrosie gevaar hebben, lager in gewicht zijn. Dit alles om de kans voor marktintroductie te verhogen.



Figuur 3 Analyse van de krachten op de reactorgeometrie door middel van het inkaart brengen van Von Mises spanningen. Zoals te zien is zijn de spanningen hoog in het midden van de reactor en aan de hoekpunten. Door het toevoegen van afgeronde hoeken is het mogelijk deze structuur onder druk te zetten. De reactor is getest in de huidige opstelling.

1.5.2 De verdamper/condensor

In een closed-loop concept, wat in dit project verder ontwikkeld is, moet water gecontroleerd verdampen/condenseren om de hydratatie/dehydratatie continu te laten plaatsvinden. Dit vereist kennis van het verdampen van water in een reactor tijdens het hydrateren en het condenseren van waterdamp tijdens het dehydrateren. Meerdere technologieën zijn getest en beoordeeld. Vanwege de complexiteit van de verdamper is er gewerkt aan een model om de verdamper beter te begrijpen.

In eerste instantie is er gewerkt aan een opstelling welke een verdamper en/of condensor zou kunnen analyseren. Hiervoor is het noodzakelijk een geconditioneerde luchtstroming te produceren. Hierbij werd initieel gedacht aan het reguleren van temperatuur en luchtstroming. Deze opstelling is in samenwerking met de EPC, de proto shop van de technische universiteit Eindhoven (zie Figuur 4): De opstelling en het bijbehorende schema van de test opstelling. In dit geval is de verdamper hierin getekend, maar de opstelling kan uitgebreid worden met een extra lus zodat ook een condensor getest kan worden.), gemaakt.





Figuur 4 : De opstelling en het bijbehorende schema van de test opstelling. In dit geval is de verdamper hierin getekend, maar de opstelling kan uitgebreid worden met een extra lus zodat ook een condensor getest kan worden.. De opstelling kan de luchtcondities controleren (snelheid, temperatuur en waterdampdruk), waardoor onderdelen als de condensor en verdamper getest kunnen worden.

In deze opstelling is het mogelijk verschillende concepten van de verdamper/condensor te meten en te beoordelen op prestaties. Hiervoor is speciale controle en analyse software geschreven in MATLAB® omgeving.

In eerste instantie is er gewerkt aan een verdamper, zodat deze de natte luchtstroom kan produceren die nodig is om de condensor te kunnen analyseren. Een drietal verdampertypen zijn geanalyseerd:

- Het koeltoren principe (adiabatische verdamping) bestaande technologie
- Een permeabele-tube-verdamper (indirect thermische verdamping) commercieel beschikbaar¹²
- Een 'falling film' verdamper (direct thermische verdamping)- eigen ontwerp op basis van literatuur



Figuur 5: Schematische weergave van de drie geteste principes: adiabatische, indirect thermische en direct thermische verdamping

¹² Permapure: FC400-2500



Het doel van de verdamper is om zo optimaal mogelijk de dauwpunt temperatuur van de luchtstroom te verhogen, met zo'n mimimaal mogelijke energie consumptie. Dit betekend dat de lage temperatuur warmtebron zo laag mogelijk moet zijn, en dat de aanwezige bron zo efficiënt mogelijk zou moeten worden ingezet. Het doel is om maar 1 °C onder het dauwpunt van de lage temperatuur bron te blijven. Indien er gesproken wordt over efficiëntie, wordt het vergeleken met de maximale efficiëntie van 100% indien de dauwpunt temperatuur gelijk is aan die van de lage temperatuur bron.

Adiabatische verdamping: Op basis van de analyses is gebleken dat de adiabatische verdampingsproces niet geschikt is voor de TCM applicaties. Al de warmte van verdamping wordt gehaald uit de luchtstroom. Hierdoor is de effectieve warmtecapaciteit van de batterij gereduceerd met 60-70%. Wel is gebleken dat de methode vrij efficiënt plaatsvindt zelfs in niet geoptimaliseerde condities was het mogelijk 90-100% van de verwachtte luchtvochtigheid te behalen. De methode van water toevoeren is dan ook gebruikt in het ontwerp voor de 'falling film' verdamper.

Thermische verdamping: De permeabele-tube-verdamper gaf goede resultaten qua prestaties in de bevochtiging. Deze methode gaf resultaten waarbij 95-100% van de mogelijke verdampingstoestand daadwerkelijk gehaald werd. Het nadeel was de gemeten drukval, welke tienmaal zo hoog was als in de andere gebruikte technologieën. Herontwerpen van de verdamper zou in de toekomst een oplossing zijn om de drukval te reduceren. Door de verdamper te verkorten met een factor twee, maar het doorblaasoppervlak met een factor twee te verhogen verwachten we een significante reductie in drukval te realiseren zonder verlies van prestatie. Dit zal in een vervolgtraject verder ontwikkeld en getest worden.

Falling film verdamper: Hierbij is gebruik gemaakt van een verdamper waarbij een sproeikop water inbrengt in de luchtstroming. Dit water wordt in de lucht gesproeid in kleine druppels, die langs een warmtewisselaar stromen. De kleine waterdruppels verdampen door de uitwisseling van warmte met de lucht. Bij goede werking zal de verdampingswarmte volledig door de warmtewisselaar geleverd moeten worden .Dit proces heeft een goede potentie, enkel was de performance op dit moment nog lager dan gewenst met een efficiëntie van minder dan 80%. Op dit moment wordt een prestatie van 160% gehaald ten opzichte van adiabatische verdamping, enkel ligt dit significant lager dan de permeabele tube verdamper. Optimaliseren van het watertoevoer systeem en het homogener benatten van de verdamper in zullen hier baat bij hebben.

Condensor

Eenzelfde test reeks uitgevoerd voor de condensor. Er is gekozen voor een watergekoelde condensor. Er zijn 3 verschillende geometrieën getest.. Hiervoor is gebruikt gemaakt van twee verschillende fin-buis warmtewisselaars (1 en 5 mm finafstand) en van de permeabele-tube-verdamper (FC400-2500).

De buiswarmtewisselaars werkten hier naar behoren, enkel moet de fin afstand niet te klein worden. Doordat het waterdamp gaat condenseren is het mogelijk dat de ontstaande vloeistof de luchtkanalen gaat dichten. Dit is geobserveerd bij 1 warmtewisselaar met <1 mm fin openingen.

De permeabele-tube-verdamper functioneerde goed, enkel ook deze had last van interne condensatie en een hoge drukval. De initiële gedachte dat het water weer terug vanuit de lucht naar de waterfase zou gaan functioneerde niet.

Vanwege de uitdaging lage temperaturen te genereren om te condenseren is er een concept uitgedacht voor het verbeteren van de condensor. Dit heeft geresulteerd in een provisionele patent aanvraag (NL2027536).





Figuur 6: Schematische weergave van de drie geteste condensors.

Voor de combinatie van verdamper en condensor zijn twee systemen getest en werkbaar geacht. De eerste is een commercieel product (FC400-2500 HP), met als nadeel de hoge drukval. De tweede is een combinatie van een warmtewisselaar en sproeikop, welke een lagere drukval heeft, maar op dit moment nog een lagere prestatie levert. In de toekomstige ontwikkeling zal de tweede condensor/verdamper verder ontwikkeld worden, vanwege de hogere flexibiliteit in ontwerp.

1.5.3 Ontwikkeling van TCM batterij

Om de ontwikkelde verdamper/condensor en reactormodule verder te kunnen testen, was het noodzakelijk om een testsysteem te ontwikkelen waarin de verschillende componenten geïntegreerd konden worden en getest. De uiteindelijke testopstelling gemaakt door de TU/e en TNO is te zien in Figuur 7. De ontwikkelde warmtebatterij met componenten van IDRW 1.0 (rood en blauw omsloten). In deze opstelling zijn vier cruciale onderdelen gecombineerd: verdamper/condensor, ventilator, TCM-module en een warmtewisselaar. In deze batterij is gekozen voor een aantal componenten, ontwikkeld en getest in IDRW 1.0. Hierbij is de verdamper/condensor te zien (rood omsloten) en de TCM module (blauw omsloten). De TCM module zelf is niet duidelijk te zien, omdat deze in de ketel zit. In de ketel zit een insert waar verschillende module vormen getest konden worden.





Figuur 7 De ontwikkelde warmtebatterij met componenten van IDRW 1.0 (rood en blauw omsloten)

1.6 Vervolgactiviteiten en spin-off

Tijdens dit project is er veel tractie ontstaan op basis van de voorgestelde reactor technologie. Dit heeft geleid tot een groot H2020-project HEAT INSYDE en de oprichting van Cellcius B.V. (een spin-off bedrijf van de TU/e en TNO).

H2020 HEAT-INSYDE: In dit project wordt de batterij doorontwikkeld naar een gebruikersklare versie. De kennis vanuit dit project zal daar als input gebruikt worden, en de batterij zal eind 2022 in een aantal huizen in Europa (Eindhoven, Gdansk, ...) getest zal gaan worden. Dat betekend echter niet dat het systeem al optimaal is. Het verder optimaliseren van de verdamper met lage drukval is een cruciaal punt om de batterij een marktintroductie te geven. Dit beïnvloed sterk de geleverde temperatuur en de efficiëntie van het systeem. Daarnaast is het noodzakelijk om het actieve materiaal met lagere temperaturen te laden.

Cellcius B.V.: Onderzoekers vanuit TNO en TU/e hebben samen de spin-off Cellcius opgericht, die de warmtebatterij op basis van het onderzochte systeem naar de markt wil gaan brengen. Deze spin-off heeft in eerste instantie de focus om een TCM batterij te maken welke ofwel inpasbaar is als add-on bij bestaande warmteafgifte systemen of als een wijkbatterij te dienen. De oprichting van de spin-off geeft aan welk vertrouwen er is in de toekomst van de warmtebatterij door beide organisaties en de onderzoekers welke de leiding hebben binnen Cellcius.

1.7 Conclusie en aanbevelingen

In IDRW 1.0 zijn twee verschillende kritische componenten van de warmtebatterij onderzocht: een verdamper/condensor en een TCM module. Zoals is weergegeven in dit rapport zijn de verdamper en condensor



in de test opstelling getest. Uiteindelijk is de verdamper/condensor van Permapure ingebouwd in de uiteindelijk full-scale batterij, waarbij deze gefunctioneerd heeft in relevante condities voor de potentiële eindgebruiker.

Op basis van de projectresultaten is een vervolgtraject gestart om deze onderdelen in te passen in full-scale demonstraties bij eindgebruikers binnen H2020 HEAT-INSYDE. Daarnaast is er nog onderzoek gestart naar het door ontwikkelen van de condensor, omdat deze limiterend is in de toepassing van de warmtebatterij. Het verbeteren van de condensor faciliteert een hogere frequentie van laden/ontladen over het gehele jaar. Deze ontwikkeling zal door Cellcius doorgezet worden in de komende periode. Indien dit functioneert is het mogelijk de batterij te laden met behulp van een warmtepomp.

Naast de hardware ontwikkeling is de stap naar marktimplementatie afhankelijk van het ontwikkelde materiaal. Alhoewel dit geen focus punt was binnen dit project is wel duidelijk geworden dat de stabilisatie van het materiaal tijdens hydrateren/dehydrateren noodzakelijk is. Een mechanisch stabiel materiaal zorgt ervoor dat de batterij langer zonder onderhoud kan functioneren. Binnen de projecten Mat4HEAT en HEAT-INSYDE worden hier stappen in gezet.





2 Uitvoering van het project

2.1 Samenwerking

Er zijn gedurende het project regelmatig project-meetings geweest, waarbij het consortium (TU/e, Caldic en TNO) bij elkaar kwam om samen de voortgang te bespreken. Daarnaast waren wekelijkse voortgangsbesprekingen met een informeel karakter waarin de details van het onderzoek besproken werd tussen de TU/e en TNO.

TU/e: De groep TPM van de faculteit Technische Natuurkunde richt zich op het ontwikkelen van een warmtebatterij in het algemeen en warmteopslagmaterialen in het bijzonder. De groep is actief in een cluster van nationale (TKI, NWO) en Europose projecten. De groep is de mede-ontdekker van K₂CO₃ als warmteopslagmateriaal en medepatenthouder van het closed-loop warmtebatterijconcept¹³. Binnen IDRW is de focus geweest op de ontwikkeling van de verdamper/condensor. Dit werk bestond uit literatuurstudie, mechanistisch ontwerp en testen. Een deel van dit werk is verricht door daarvoor ingehuurde PDEng.

TNO: De afdeling Materials Solutions van TNO heeft een belangrijke activiteit op het gebied van modificatie en stabilisatie van warmteopslagmaterialen. De afdeling heeft een langlopende samenwerking met de groep TPM van de TU/e op dit vlak, welke vorm krijgt binnen verschillende TKI en Europese projecten. TNO heeft gewerkt aan de reactor ontwikkeling en aan de verdamper/condensor.

Caldic: Heeft het project ondersteund door middel van het produceren en het leveren van test materialen voor in de reactor. Binnen het H2020 project CREATE hebben Caldic, TU/e en TNO samen K₂CO₃-gebaseerd materiaal ontwikkeld, wat door Caldic in bulk hoeveelheden geproduceerd kan worden. Daarnaast is ook overleg geweest over de impact van bepaalde keuzes op de materiaal eigenschappen van de reactor. Hierbij is naast de kennis van de TCM ook gebruik gemaakt =van de ervaringen bij klanten en bij Caldic zelf met verdampers, ventilatoren, type reactoren etc. en het introduceren bij verschillende fabrikanten om bestaande technologieën (zoals verdampers) te hergebruiken in de omgeving van de warmtebatterij.

2.2 Problemen tijdens het uitvoeren van het project

Ten tijde van het project heeft COVID-19 een significante invloed gehad op het project. Dit heeft ook geleid dat het project verlengd moest worden. Niet alle labexperimenten konden binnend de oorspronkelijke tijdsplanning uitgevoerd worden vanwege het sluiten van de laboratoria op de universiteit. Dit zorgde ervoor dat de experimenten niet altijd door de personen konden worden uitgevoerd die de experimenten gepland had. Er is daarom in het laatste jaar (de gevraagde verlening) met stagiaires en afstudeerders gewerkt aan het uitvoeren van het project. Dit zorgde dat er voldoende tractie op het project bleef, waarbij de hoofdonderzoekers de lijnen konden uitzetten, zonder significant over het budget heen te gaan. Ook is hierdoor extra de nadruk gelegd op metingen aan de verdamper. Dit is uiteindelijk ook het meest cruciale onderdeel in de huidige warmtebatterij, vanwege het gesloten systeem, waar ook andere projecten (zoals H2020 HEAT-INSYDE) afhankelijk van zijn. Het verhogen van de waterdamp druk met een paar procent heeft al significant invloed op de temperatuur dan wel de efficientie van het systeem.

2.3 Wijzigingen ten opzicht van het projectplan

Alle onderdelen van het projectplan zijn uitgevoerd. Hierbij aangemerkt dat de nadruk heeft gelegen op het praktisch testen van de te onderzoeken systemen: TCM module, verdamper en condensor. Hier is uiteindelijk de nadruk komen te liggen op de verschillende verdampers.

2.4 Financieel overzicht

Er zijn geen significante verschillen tussen de begroting en werkelijke kosten gemaakt.

Deelnemer	Kosten begroot (€)	Kosten gemaakt (€)	Gevraagde subsidie (€)			
TU/e	136.896	148.208	109.517			
TNO	146.436	149.179	117.149			

¹³ US20200355446A1



Caldic	50.000	52.366	30.000						

2.5 Kennisverspreiding en PR

Status: ODENBAAD

Allereerst is kennis gedeeld via de TU/e opleiding. Diverse MSc-studenten hebben via een afstudeeropdracht bijgedragen aan de ontwikkeling van de warmtebatterij. Een PDEng heeft zijn designopdracht uitgevoerd in het kader van dit project. Een kort overzicht van deze resultaten is terug te vinden in de bijlagen. Verder is een gedeelte van het onderzoek gebruikt in cursusmateriaal op de universiteit.

De in dit project ontwikkelde is kennis is nog niet breed gedeeld buiten het consortium. Dit heeft te maken met het parallel-lopende proces met betrekking tot het opzetten van de spin-off Cellcius en noodzaak tot afbakening van de IP gedurende dit proces. In middels is dit proces geëffectueerd en in 11-11-2020 Cellcius daadwerkelijk opgericht.

Patent aangevraagd: System for thermochemical storage with improved dehydration, (NL2027536) Dit patent maakt het mogelijk de batterij met lage temperatuur (30°C) op te laden. Dit is van belang voor een stationaire toepassing waar geen gebruik wordt gemaakt van restwarmte om de batterij te laden.

Desalniettemin is er nadrukkelijk gezocht naar publiciteit op basis van het principe van de batterij en de mogelijke toepassing resulterend in o.a. :

- Technology for climate beyond Paris: the next business wave, White paper 2019, TNO Unit E
- De zoutbatterij die een gezin door de zonloze en windstille periodes heensleept Innovation Origins, 25-3-2021
- Podcast, Warmte opslag: De warmte batterij komt eraan. Dutch Green Building Week 22-9-2020
- Superbatterij kan duurzame energie in huis omzetten in warmte, Stefan ten Teije, 14-08-19, Algemeen Dagblad
- Opslag; één van de grootste uitdagingen voor de energie opslag, BNR, De Technoloog, 24-9-2021

De publiciteit is gezocht om potentiële investeerders, eindgebruikers en mogelijke kennisversterkers te bereiken. Dit heeft zijn effect gehad in meer dan 150 reacties van bedrijven (wat nog steeds toeneemt) en meer dan 1000 particuliere reacties. Dit is gebruikt om de relevantie van de ontwikkeling van de warmtebatterij te staven. Daarnaast is ook actief de publiciteit gezocht met behulp van de binnen IDWR ontwikkelde demo-opstelling:

- Symposia: o.a. Dutch Design Week, Tech4Climate, Open dag TU/e
- Werkbezoeken waarbij de batterij is getoond: o.a. Huba control, Ennatuurlijk, ENGIE, Itho Dalderop, Defensie



Status: OPENBAAR Bijlage 1: Overzicht WP 1

Voor werkpakket 1 in een gedeelte van de op te leveren rapporten en test opstellingen beschreven in twee verslagen:

- A. Gubser, Innovative Dynamic Reactor Concept for Heat Storage, Intern Report TNO (2019),
- T. Raemeakers, Hydration of a packed bed with K₂CO₃ particles for thermochemical energy storage: an experimental study, MSc Thesis, Eindhoven University of Technology (2021).

In onderstaande bijlage worden de verschillende aspecten benoemd aan de hand van de projectdeliverables. Verdieping of extra uitleg is in de genoemde referenties te vinden.

D1.1 Testopstelling voor massatransport

Voor het verplaatsen van de TCM in een reactor is er onderzoek gedaan naar verschillende manieren om de TCM van de opslag naar het reactor gedeelte te transporteren. In het onderstaande rapport worden de bevindingen besproken. Hierbij wordt voornamelijk gekeken hoe op een slimme methode de TCM en waterdamp bij elkaar gebracht kan worden, zonder prestatieverlies van de TCM. Belangrijk hierbij is dat de hoeveelheid actief materiaal flexibel beschikbaar is om te reageren. Dit zorgt voor minder verliezen tijdens laden/ontladen en voldoende vermogen wanneer mogelijk.

Type reactoren

Zwaartekrachtbed

¹⁴De eerste optie van het dynamische bed is het langzaam door de zwaartekracht laten bewegen van de TCM in het reactor gedeelte¹⁵. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 8. Wanneer de massastroom ongelimiteerd is, zal dit leiden tot een verblijftijd van een TCM korrel van maximaal 0.45 s in een reactor van 1 m, waarbij van boven naar beneden valt.. Deze korte verblijf tijd is bij lange na niet voldoende om de deeltjes volledig te laten reageren bij deeltje met een minimale diameter van 1 mm. Hierdoor is het dan ook nodig om de val te vertragen door middel van elementen toe te voegen in de reactor of na de reactor zoals een soort trechter.

Alvorens hier eerste experimenten mee te doen zijn er experimenten uitgevoerd op het uiteindelijke actieve materiaal: K_2CO_3 . Dit materiaal liet duidelijke expansie zien tijdens het hydrateren van het materiaal. Dit is een grote obstakel in het ontwikkelen van een bewegend bed welke door zwaartekracht naar beneden zal lopen. Het gevaar van opstopping door expansie is heel erg groot. Een voorbeeld van het samenklonteren van de TCM deeltjes is weergeven in Figuur 9.



Figuur 8 Een voorbeeld van een zwaartekrachtbed¹⁴.

¹⁴ Zondag, H.A. et al. (2009). Engineering assessment of reactor designs for thermochemical storage of solar heat. Effstock 2009, Therm. Energy Storage Effic. Sustain.

¹⁵ A. Ostace et al in: M.R. Eden, M. lerapetritou, G.P. Towler (Eds.),13th Int. Symp. Process Syst. Eng. (PSE 2018), Computer-Aided Chemical Engineering 2018, pp. 325–330 , San Diego, CA.





Schroefdraad bed

Een alternatief type bed is een bed waarbij het materiaal constant bewogen wordt en langzaam van opslag 1 naar opslag 2 verplaatst wordt m.b.v. een schroefdraad¹⁴,¹⁶. Dit is een zo genaamde schroefdraadbed. Dit bed wordt al een tijd ontwikkeld in verschillende labs en bestaat uit een pijp waarin een schroefdraad (lijkt op een wormwiel) langzaam ronddraait. Door deze draaiing verplaats de TCM zichzelf in horizontale richting en wordt de TCM door elkaar gemixt in verticale richting. Het voordeel is dat de TCM niet verder doorbeweegt indien de reactor uitstaat. Dit maakt het mogelijk relatief **Figuur 9** Illustratie van het risico van opstopping door expansie van de TCM deeltjes in een zwaartekracht bed. Nadat het bed 10 cycli gehydrateerd/dehydrateerd had, was het bed volledig vast gaan zitten aan elkaar. De korrels konden niet meer los van elkaar



Figuur 10 Een grafische weergave van een schroefdraadbed.¹⁴

gemakkelijk de vermogens van de reactor terug te schroeven, zonder dat er materiaal verloren gaat. Het is mogelijk om in dit transport systeem ook een luchtstroom doorheen te blazen. De luchtstroom zal net als in de meeste reactoren een waterdamp aanleveren en warmte afvoeren. Dit proces is niet anders dan bij statische reactoren.

Een groot voordeel van deze reactor is dat de korrels gemixed worden, waardoor de reactie relatief homogeen verloopt en de kans op niet-reagerende deeltjes klein is. Daarnaast is de kans op het samenklonteren van de deeltjes verlaagd door constante beweging van het gehele bed. Nadeel hierbij wel is dat door grote schuifweerstanden tussen de korrels en de reactorwand de TCM heel stabiel moet zijn om geen poeder vorming te krijgen.

Eerste testen met het huidige materiaal zijn gedaan op een rollerbank. Door het traag ronddraaien van een glas beker met TCM erin is gekeken hoeveel poedervorming er geproduceerd wordt op korte termijn. Met versgeperst materiaal bleek dat ongeveer 5-10% poeder geproduceerd wordt binnen 10 minuten ronddraaien. Aangezien de TCM vrij traag reageert, zal de TCM in de reactor minimaal 2 uur traag rondgedraaid worden. Het grote percentage van uitval (percentage poeder na 10 minuten ronddraaien) van het versgeperst materiaal gaf geen vertrouwen dit proces verder uit te werken voor de huidige TCM.



Figuur 11 Kleine test opstelling voor eerste analyse bewegend bed via schroef reactor

¹⁶ A. Eseyin et al. (2015). Current Trends in the Production and Applications of Torrefied Wood/Biomass - A Review. BioResources. 10.



Naast uitdagingen in materiaal ontwikkeling bevat het concept nog andere uitdagingen:

- 1. Omgaan met poeder in bewegende delen
- 2. Luchtdicht afsluiten van opslag vaten ten opzichte van reactor gebied
- 3. Lucht doorblazing van het TCM bed

Fluidized bed reactor

Een derde mogelijkheid is een TCM bed te verplaatsen met lucht. Bij statische bedden wordt er zo hard geblazen dat het bed voldoende waterdamp tot zijn beschikking heeft, terwijl de TCM op zijn plaats blijft liggen. In de chemie zijn er veel processen waarbij een materiaal door de lucht opgetild wordt, zodat het verplaatst kan worden. In voorgaande Europese projecten zoals FP7 SoTherCo (www.soterhco.eu). In dit project is aangetoond dat het mogelijk is de TCM te verplaatsen door middel van luchtstroming. Dit is wel sterk afhankelijk van de dichtheid, vormfactor en groottevan de deeltjes en de gevraagde verplaatsingshoogte. De SoTherCo opstelling wordt getoond in Figuur 12.



Figuur 12 Demo opstelling SoTherCo, waarbij gebruik gemaakt is van luchtstroming om de TCM te verplaatsen.

Op kleine schaal is binnen IDWR een soortgelijk proces naar tevredenheid getest. Het was middels een ventilator (SCL 06/MS from SIMEL) aan te sluiten op een buis met een diameter van 5 cm mogelijk de deeltjes (6 mm diameter, 2 mm hoogte) te verplaatsen over 1 m hoogte verschil. Dit werkte tot een initiële bed hoogte van 10 cm (zie **Figuur 13**). Het nadeel was dat voor de geselecteerde deeltjes een hoge luchtstroming nodig was welke veel energie verbruikte, daarnaast was er veel geluid tijdens deze verplaatsing. De vraag is dan ook of dit op de kleine schaal (huishoudens) een juiste route is om te volgen.

Statisch bed

De klassieke TCM reactor werkt met een statisch bed, waarbij de TCM op zijn locatie blijft liggen. Indien gebruik gemaakt wordt van een doorgeblazen reactor, zal de benodigde aan- en afvoer van waterdamp plaatsvinden door de lucht. Warmte kan afgevoerd worden door geleiding, maar ook door convectie door de lucht.

Door het kiezen voor een systeem, modulair opgebouwd uit meerdere kleinere bedden, kan er gestuurd worden op het activeren van een beperkte hoeveelheid TCM. De TCM ligt in dit geval dus stil, maar de luchtstroom zorgt voor de flexibiliteit die noodzakelijk is om voldoende stabiele vermogens te behalen.



Figuur 13 Foto van de test opstelling om te kijken of de huidige TCM deeltjes verplaatst konden worden via luchtstroming.



Status: OPENBAAR D1.2 Massatransport in een dynamisch bed

Voor het analyseren van de massatransport in een bed is er gekozen voor een beeldvormingstechnologie, MRI (Magnetische Resonantie Imaging¹¹) om te zien hoe het hydratatie proces verloopt. Deze technologie maakt het mogelijk water concentratie ruimtelijk opgelost te meten in een TCM bed zonder het proces te verstoren. Dit is belangrijk, omdat het de mogelijkheid biedt iets te zeggen over breedtes van hydratatie- en dehydratiefronten.

Om deze technologie te ontwikkelen is in het verleden gebruik gemaakt van Zeoliet 13X. Zeoliet is een materiaal wat snel reageert, waarbij het water aan het oppervlak absorbeert. Tijdens deze actie wordt warmte geproduceerd. Dit is anders dan bij een zouthydraat, waarbij het water in het kristalrooster gaat zitten. Dit maakt dat het meten met MRI aan een zeoliet bed veel gemakkelijker is dan aan een bed met een zouthydraat als TCM.

In **Figuur 14**¹⁷ is een hydratatie experiment van Zeoliet laten zien. Dit plaatje bestaat uit verschillende water concentratie profielen in de tijd (273 s interval tussen twee opéénvolgende lijnen). De lucht wordt vanaf rechts door de reactor heen geblazen. De lengte van de reactor maar 45 mm. Wat duidelijk te zien is, is het scherpe front wat door het bed heen loopt en de snelle opname van waterdamp druk aan de uitgang van het bed nadat het front langzaam begint op te lopen na 2.6 uur. Het moment dat dit front begint op te lopen is een zogenaamd 'doorbraak moment'. Op dat moment is de performance van de reactor minder, lees dat het vermogen/temperatuur omlaag gaat. Het moment van deze doorbraak is sterk afhankelijk van de gevraagde condities en het actieve materiaal. Op basis van deze metingen leek het een mogelijkheid een vrij dun bed te maken, waarbij de TCM nog voldoende vermogen kon leveren over langere periode. Op basis van dit experiment kan geconcludeerd worden dat een bed van 45 mm dik tot 78% conversie een stabiel vermogen zou leveren. Indien het bed tweemaal zolang gemaakt zou worden, zou dit zelfs 89 % zijn. Dit zijn bed diktes waarbij de drukval van de lucht over het bed nog relatief laag zijn, wat het mogelijk maakt om een positieve verhouding tussen het geleverde thermische vermogen van de batterij en het gevraagde elektrische vermogen van de batterij te krijgen.



Figuur 14 Een voorbeeld van een NMR meting van een zeoliet bed met een luchtstroming van 5 L/min en 8 mbar waterdamp druk. Elke lijn staat voor de waterconcentratie op een bepaald tijdstip. De tijd tussen de lijnen is 273 seconden. De gehele meting nam 4.5 uur in beslag, waarvan de eerste 3.8 uur het materiaal reageerde met de aangevoerde waterdamp. Het rechter plaatje laat de waterdamp druk aan de ingang (boven) en uitgang (onder) van de reactor zien.¹⁷

Op basis van deze eerste metingen is er gewerkt aan experimenten met zouthydraten. De eerste stap is het bewijzen dat het gemeten NMR signaal te relateren is met de hoeveelheid water in het sample. Hiervoor is een kalibratie uitgevoerd, wat deze relatie heeft aangetoond¹¹.

¹⁷ Raemaekers, T. Investigation of the hydration and dehydration dynamics of zeolite 13X particles in a packed bed and extruded honeycomb zeolite , Bcs Thesis, TU/e (2018)



Op basis hiervan zijn meerdere experimenten uitgevoerd om te bepalen hoe het hydratatie proces van een TCM bed gevuld met zouthydraten functioneert. In **Figuur 15** is een experiment met TCM korrels (CREATE materiaal¹⁰) geplot welke is gemeten in de NMR. Hierbij is het experiment uitgevoerd met een langere reactor van 100 mm. Waarbij de zeoliet korrels een front van ongeveer 10 mm lieten zien, is dat met de TCM korrels veel breder. Zoals te zien is hebben deze korrels een front van meer dan 100 mm. Daarnaast is te zien dat de korrels vanaf 20 uur niet meer al het water opneemt. Dit betekend dat na 30% conversie de reactor niet langer optimaal functioneert.

Daarnaast moet hier de opmerking gemaakt worden dat de flow snelheid in dit experiment heel traag is. Indien deze flow snelheid gebruikt wordt, moet er ongeveer 3.8 m² aan reactoroppervlak aanwezig zijn om 1 kW aan vermogen te leveren.



Figuur 15 links: Hydratatie curves van een bed K_2CO_3 korrels, waarbij elk profiel 3 uur tussen tijd heeft. De luchtflow was 0.4 L/min (0.02 m/s). rechts: De waterdamp druk van de in en uitlaat zijn geplot tegen de tijd¹¹.

De experimenten aan zoutbedden laten zien dat grootte oppervlaktes nodig zijn voor de huidige korrels om tot kinetiek te komen waarbij de gevraagde vermogens (1 kW) haalbaar zijn met een bed dikte van 100 mm. De oppervlaktes zijn op dit moment te groot om mee verder te werken. Dit zal in de toekomst verbeterd moeten worden door de kinetiek van de korrel te verbeteren (kleinere korrels/ander basis materiaal).

Deze materiaal ontwikkeling was niet gepland binnen het project, waardoor er gekozen is om de luchtstroom te verplaatsen in plaats van de TCM.



Status: OPENBAAR D1.3 Studie naar de ideale geometrie

De warmtebatterij heeft twee hoofdonderdelen, die los van elkaar geoptimaliseerd kunnen worden: Het TCM bed (de TCM reactor module) en de verdamper/condensor. Hier wordt de geometrie van het TCM bed in meer detail besproken.

De ideale geometrie is een samenspel van drukval over het bed, stabiele warmte levering en sterkte van de constructie. Om de ideale geometrie vast te stellen is er een eisenpakket opgesteld:

- 1. De reactor kan minimaal voor 80% van zijn conversie warmte leveren met een minimaal vermogen van 1 kW en op 60 °C bij een waterdampdruk van 17 mbar.
- 2. De reactor is stabiel tussen de 0.5 en 2 bar absolute druk
- 3. De reactor mag niet corroderen met het actieve materiaal (K₂CO₃)
- 4. De reactor moet functioneren tussen de 0 en 150 °C
- 5. De drukval over het TCM bed mag niet meer dan 300 Pa zijn bij een luchtstroom van 250 m³/uur

De reactor kan minimaal voor 80% van zijn conversie warmte leveren

Een eenvoudig model is gemaakt om te zien hoe de reactiekinetiek van een enkel deeltje de totale reactie in het bed beïnvloed. Hierbij is de reactiekinetiek van een deeltje bij verschillende condities (water content, waterdampdruk en temperatuur) erg van belang. Met behulp van metingen aan enkele korrels is de kinetiek gekarakteriseerd. Deze dat heeft als input voor het model gediend.

Op basis van deze kinetiekdata is de reactorkinetiek geanalyseerd, waarbij elke keer de toestand van de voorgaande laag korrels beinvloed wordt door de luchtlaag die is aangekomen van de voorgaand laag. Het is schematisch weergegeven in **Figuur 16** (aangepast uit bachelor thesis S. de Jong¹⁸):..

- 1. Run a convection step.
- 2. Adsorb water into the zeolite such that the system is in equilibrium.
- 3. Hydrate with help of kinetics
- 4. Move to the next segment



Figuur 16 schematische weergave van het model. Aangepast uit de bachelor thesis van S. de Jong.¹⁸

Een karakteristiek resultaat is weergeven in Figuur 17. Hierin is te zien wat de toestand (loading) is van het bed op een bepaalde positie. Elke lijn is een gebeid van 2 cm, waar de gemiddelde toestand is weergeven. De blauwe lijn is de bovenste laag, de gele lijn de onderste. Zoals te zien is, zal niet het gehele bed tegelijkertijd hydrateren. De

¹⁸ S. de Jong, Modelling the adsorption behavior of zeolite 13X in a packed bed reactor. BSc thesis: TU/e (2018)



uitlaat temperatuur daalt al vrij snel in het hydratatie proces. Dit betekent dat het bed niet optimaal gebruikt wordt.



Figuur 17 Reactie in een TCM bed op basis van reactie kinetiek van een enkel deeltje.



Status: OPENBAAR Onder/overdruk in de reactor

Een belangrijke vraag was of de veilig van het op druk brengen van de reactor. Binnen deze studie werd gewerkt met een factor waarbij de Youngs Modulus tweemaal zo groot moet zijn dan de Von Misses spanning. In dat geval wordt geacht dat de geometrie de opgelegde druk aan kan.

Elk materiaal heeft een eigen Yield spanning, welke ook nog kan afhangen van o.a. temperatuur en water content. Over het algemeen wordt de Yield spanning lager bij hogere temperaturen, zo ook voor hogere waterdamp drukken (voornamelijk kunstoffen). Alhoewel er tijdens het hydrateren/dehydrateren lokaal met hoge waterdampdrukken gewerkt kan worden, is dit niet het geval in de onderdelen die warm zijn. Een overzicht van de Yield spanning van verschillende materialen bij kamer temperatuur is te zien in **Figuur 18**. Hierbij is duidelijk dat de meeste metalen een hogere Yield spanning hebben dan kunstoffen.



Figuur 18 Overzicht van Youngs Modulus van verschillende materialen

Analyse hoeveel materiaal er nodig is om de opgelegde drukken aan te kunnen in de ontworpen geometrieën is op basis gedaan van berekeningen van Von Misses spanning. Dit is gedeeltelijk via engineering software berekend (Inventor) en via vergelijkingen in Matlab. De berekeningen op basis van de theorie (Matlab) zijn gebruikt om te valideren dat de interpretatie van inventor correct zijn. Dit numerieke model kon enkel toegepast worden op eenvoudige vormen. Een van de validatie experimenten is weergeven in **Figuur 19**. Hier is laten zien dat een plaat van 0.5x0.2x0.002 m van roestvrijstaal met een Youngs Modulus van 2.067·10¹¹ Pa ongeveer 470 mm weggedrukt wordt bij een druk van 400 Bar. Daarnaast zijn ook de krachten vanuit beide modellen vergeleken met elkaar. Daar zat ongeveer een verschil in van 20%. Dit was naar ons inziens verklaarbaar door het negeren in Matlab van het 3D effect van de metalen slab.





Figuur 19 Overzicht van de verplaatsing van een materiaal op basis van de matlab en Inventor berekeningen. Deze komen goed met elkaar overeen

Na validatie van beide modellen is dan ook gekozen om de resultaten van Inventor te gebruiken, aangezien dit betrouwbare resultaten gaf en ook complexere vormen kon verwerken. Naast verschillende cilindrische reactoren is er voornamelijk gezocht naar mogelijkheden de reactor sterk genoeg te maken om ook rechthoekige reactoren bestand te maken tegen de krachten in de reactor. Een eerste vorm welke was voorgesteld is weergeven in **Figuur 20**. Deze reactor bestaat uit 4 recht zijdes welke via een kleine ronding (0 mm radius) aan elkaar gelast zijn. In dit experiment is dit niet gevarieerd. Voornamelijk op de hoekpunten en in het midden van de 4 vlakken zijn de krachten het hoogst.



Figuur 20 Rechthoekige reactor met een map van Von Mises spanningen. Zoals te zien is zijn de spanningen hoog in het midden van de reactor en aan de hoekpunten.

De volgende stap was het varieren van de dimensies van de reactor. Bij constant volume van 16 liter is een parameters studie uitgevoerd naar de maximale spanning in de box door de hoogte te variëren (op basis van de Von Mises spanningen). Hierbij hadden de hoekpunten een straal van 0 mm. Zoals te zien is had de box gemaakt van roestvrijstaal een minimale hoogte van 3.5 mm nodig, om onafhankelijk van de geometrie de druk aan te kunnen.



Er is gebleken dat voor veel geometriën de hoekpunten de zwakke plekken waren. Daarom zijn de hoekpunten nader onderzocht. Door het introduceren van rondingen in de hoeken van de reactor is het mogelijk gebleken de von Mises spanningen sterk te reduceren. Met een radius van 30 mm is het zelfs mogelijk de reactor voldoende stijfheid te geven met een wanddikte van 2 mm.



Figuur 21 De Von Mises Spanning in MPa bij een TCM module waarbij het volume van de reactor stabiel is gehouden op 32 liter en de hoogte van de reactor gevarieerd is (de waardes in de legenda). Daarnaast is een variatie in de dikte van het materiaal aangebracht om dat effect in kaart te brengen.



adding corner rounding

Figuur 22 De rondingen in de hoeken (filet radius) zijn gevarieerd in dit figuur voor verschillende diktes van het reactor materiaal.



Op basis van deze testen is een geometrie gekozen die makkelijk stapelbaar is, eenvoudig te construeren en de druk aan kon. Er is gewerkt met koker materiaal van 2 mm dikte, 100x100x400 mm, en twee in/uitlaten. Deze reactor heeft een druktest doorstaan (tot 1 bar overdruk) en kan gebruikt worden voor de experimenten.



Figuur 23 Kubische reactor



Status: OPENBAAR D1.4 Demo van het dynamische bed

Een test opstelling is ontwikkeld binnen de kaders van IDRW, deze is weergeven in Figuur 24.

De TCM is geplaatst in een drukvat, wat het mogelijk maakt het vermogen en de afgifte temperatuur te tunen naar de vraag van de eindgebruiker waarbij telkens de hoogste efficiëntie behaald wordt (thermisch/elektrisch). In voorgaande concepten kon enkel de temperatuur ofwel het vermogen getuned worden, maar niet beide.

De 'loop' kan op onderdruk of overdruk gebracht worden. De 3 off-the-shelf componenten (warmtewisselaars, fans, en verdamper/condensor in combinatie met de TCM-modules vormen de TCM batterij. De lucht wordt tijdens het laden verwarmt via de onderste warmtewisselaar, waarbij de warmte wordt afgegeven in de TCM en water wordt opgenomen in de luchtstroom. Deze condenseert in de verdamper/condensor. Tijdens het ontladen zal juist water toegevoegd worden in de verdamper/condensor en de TCM reageert met het water, wat leidt tot warmteproductie. Via een warmtewisselaar wordt deze warmte uit de luchtstroom gehaald en afgegeven aan gebruiksfunctie of netwerk. Het verdampen/condenseren van de waterdamp in/uit de lucht behoeft /genereert laagwaardige energie. Dit wordt reguleert met de ingebouwde warmtewisselaar in de verdamper/condensor unit.

Een uitgebreid rapport hoe de opstelling functioneert is te lezen in het rapport van A. Gubser^{19.}



Figuur 24: Figuur van de lab demonstratie opstelling waarin het ontwikkelde TCM bed getest is.

¹⁹ A. Gubser, Innovative Dynamic Reactor Concept for Heat Storage, Intern Report TNO (2019)



Bijlage 2: Samenvatting WP 2

De resultaten van WP 2 zijn (testopstellingen en modelering) zijn beschreven in:

- Da Rocha Nogueira, R. Design of the evaporator / condenser of the heat battery. PDeng Thesis, Technische Universiteit Eindhoven (2020).
- Steenderen, M. Evaporator for the Heat Battery, Afstudeer verslag Fontys (2021)

Hier onder wordt kort weergegeven wat de hoofdresultaten zijn en waar de benodigde achtergrond informatie gevonden kan worden.



D2.1 Rapportage Literatuurstudie naar waterdamp productie/opname

Een overzicht van de literatuur en al bekende methodes om waterdamp te produceren dan wel weg te condenseren is opgesteld²⁰. In dit rapport is er gezocht naar methodes in de wetenschappelijke literatuur en commerciële toepassingen.

2 samenvattende tabellen (hieronder weergeven) vatten de redenatie van de keuze voor de verschillende verdamper en condensors.

Equipment/criteria	Size (I)	Evaporation Capacity (kg/h)	Power consumption (W)	Power/capacity (W/(kg/h))	Pressure drop in the air side (mbar)	Capital cost (€)	Adiabatic cooling of the air?	Go further?	Why?
Electrode steam producer	various	4,4-4,8	3300-3600	750	-		NO	NO	High operation costs
ultrasonic humidifier	20	3,6	185	50	-	-	YES	NO	adiabatic cooling
wick evaporator humidifier	250	-	24	-	1	-	YES	NO	adiabatic cooling
centrifugal humidifier	70	6~8	90	13	-	750	YES	NO	adiabatic cooling, difficult to implement inside tube
Humidifier with pressurized water (nozzle)	200	4~56	150	3-37,5	1	-	YES	NO	higher cost, pressure pump, adiabatic cooling
Nafion	5	-	24	-	60	6000	NO	YES	Original equip. Compare with the others
Cooling tower/packing	15	2,5	24 + heating water	-	1	<1000	NO	YES	Possibility of removing heat from water
HX + column	5	-	48 + heating water	-	-	<1000	NO	YES	cheap, out of the shelf parts and heat provided to heat and mass transfer between air and water
Bubble column	800		48	-	20		NO	NO	too big and high pressure drop

Tabel 1: overzicht van de verschillende verdampers.²⁰

Tabel 2: Overzicht van de onderzochte condensors. ²⁰

Equipment/criteria	Size (I)	Condensation/water removal rate	Pressure drop in the wet air side (mbar)	RH outlet	Can be used as evaporator?	Needs cooling water?	If not cooling water, what is the principle?	Capital cost (€)	Go further ?	Why?
Surface condenser (shell tube HX)	5	~0.01 kg/s.m²	~1	100%	YES	YES	-	200	YES	Can be used as evaporator, low pressure drop
Surface condenser (air cooled)	×	×	~1	100%	NO	NO	Air cooling	×	NO	heat removed can't be recovered
Contact condenser (cooling tower)	15		~1	100%	YES	YES	-	-	YES	Can be used as evaporator, low pressure drop
Dessicant technology	-	~0.005 kg/s @RH=85%, Ta=15°C	200~350	<100%	NO	NO	Water adsorption	300~ 2000	NO	Very high pressure drop
Nafion	5		60	<100%	YES	NO	Water migration through membrane	6000	YES	Original equip. Compare with the others

²⁰ Da Rocha Nogueira, R. Design of the evaporator / condenser of the heat battery. PDeng Thesis, Technische Universiteit Eindhoven (2020)



Status: OPENBAAR D2.2 Rapportage *Labtesten van de verdampings/condensatie technieken*

Een overzicht van de testen met de verdampings en condensatie opstellingen is beschreven in het rapport van R. Noueira²⁰ en M. van Steenderen²¹.

Er is 1 opstelling gemaakt waar de verschillende verdampers/condensors op getest zijn²⁰.



Figuur 25 De opstelling en het bijbehorende schema van de test opstelling. In dit geval is de verdamper hierin getekend, maar de opstelling kan uitgebreid worden met een extra lus zodat ook een condensor getest kan worden.. De opstelling kan de luchtcondities controleren (snelheid, temperatuur en waterdampdruk), waardoor onderdelen als de condensor en verdamper getest kunnen worden.²⁰

De 3 onderzochte verdampers zijn:

- Het koeltoren principe (adiabatische verdamping)²¹
- Een permeabele-tube-verdamper (indirect thermische verdamping) ²⁰
- Een 'falling film' verdamper (direct thermische verdamping)²¹

De 3 onderzochte condensors zijn:

- De buiswarmtewisselaars met 1 mm fin afstand²¹
- De buiswarmtewisselaars met 5 mm fin afstand²¹
- De permeabele-tube-verdamper¹⁹

Op basis van de testen is gekozen voor de demo te werken met de permeabele tube verdamper. De potentie van de falling film verdamper lijkt erg hoog voor de toekomstige systemen na optimalisatie van het huidige ontwerp.

²¹ Steenderen, M. Evaporator for the Heat Battery, Afstudeer verslag Fontys (2021)



D2.3 Computer model om condenseren/verdampen te beschrijven

Een computer model is ontwikkeld om het condenseren/verdampen te beschrijven. Dit is beschreven in detail beschreven in hoofdstuk 6 van PDeng thesis van R. Nogueira²⁰. De schematische beschrijving van het model is weergegeven in **Figuur 26**. Met behulp van dit model is met name het verdampingsproces geanalyseerd. Het condenseren kan met hetzelfde model worden berekend: door andere inputcondities te kiezen zal het model gaan condensatie voorspellen.

De belangrijkste variabelen in dit model zijn:

- de temperatuur van de verdamper;
- Uitwisselend oppervlakte van de verdamper;
- Luchtsnelheid;
- Toevoer van warmte via water massa stroom.



Figuur 26: Schematische weergave van het model van de verdamper/condensor.²⁰

In **Figuur 27** is een van de resultaten te zien behaald met het model. In dit geval (adiabatische verdamper) was het vooral van belang de massa stroom van het water zo hoog mogelijk te houden. Dit zorgt voor extra energie om het verdampingsproces op gang te houden. Dit is in lijn met de lab resultaten.



*Figuur 27: Analyse van variabelen op de resultaten van de verdamper.*²⁰



Status: OPENBAAR D2.4 Demo voor verdamper/condensator

In de testopstelling zijn metinge uitgevoerd Met behulp van de verdamper is het mogelijk geweest om de batterij te laten werken. Het was mogelijk de batterij te laden (waterdamp generatie) en te ontladen (waterdamp reductie).

De waterdampdruk in het systeem is gemeten met RH sensoren voor de verdamper. De uitgaande lucht kon niet geanalyseerd worden met voldoende nauwkeurigheid vanwege de onnauwkeurigheid van de RH sensoren bij hoge luchtvochtigheid. Wat te zien is in **Figuur 28** is dat de waterdamp druk tijdens het verdampen 14 mbar is, oplopend naar 14 mbar op het eind van het experiment. Dit betekend dat de verdamper de waterdampdruk netjes constant houdt tijdens het hydratatie proces.

Tijdens het dehydrateren (laden) van de batterij is te zien dat de waterdampdruk initieel oploopt aan de ingang van de verdamper. Dit heeft ermee te maken dat het zout zijn water loslaat. Wat te zien is, is dat na verloop van tijd de waterdamp druk daalt. Dit kan enkel door de condensor komen, aangezien het een gesloten loop is.

Dit bewijst dat het concept werkt van deze verdamper/condensor¹⁹.



Figuur 28: De waterdampdruk aan de ingang van de condensor/verdamper tijdens condenseren (links) en de uitlaat tijdens het verdampen(rechts) van de condensor/verdamper. Tijdens het hydrateren en dehydrateren is er gekozen voor een lage temperatuur van 12 °C. Dit leidt tot een waterdamp druk van 14 mbar tijdens het ontladen en tot een waterdampdruk van 16 mbar tijdens het laden van de verdamper.