

OPENBAAR EINDRAPPORT

ENERGYPADS



AUTEURS:

AART DE GEUS
HENK DE BEIJER
CAMILO RINDT

ARTENERGY BV, TE DELFT
DE BEIJER RTB BV, TE DUIVEN
TU EINDHOVEN

Nadere informatie is te verkrijgen bij: A.C de Geus, aart.degeus@artenergy.nl.
Een pdf van het rapport is op te vragen bij Artenergy bv.

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

Samenvatting

Aanleiding

Energie-opslag (zowel thermisch als elektrisch) is belangrijk om het wisselende duurzame energie aanbod te kunnen matchen met de wisselende energievraag. Thermo-chemische energie-opslag wordt als een belangrijke oplossingsroute met veel potentie gezien, vooral ten behoeve van de effectieve inzet van duurzame energiebronnen ten behoeve van warmte en koude. De voordelen zijn grote opslagdichtheid en vrijwel verliesvrije energie-opslag. Belangrijke hindernissen die nog genomen moeten worden om grootschalig toe te passen als volwaardig product zijn: stabiliteit, verwerkbaarheid en optimalisatie eigenschappen van een thermo-chemisch materiaal (TCM), toegesneden industrieel en schaalbaar productieproces, lange levensduur en te hoge systeemkosten.

Doel van het project

De doelstelling van het Energy Pads project is om bij te dragen aan de industriële en commerciële realisatie van thermo-chemische opslagsystemen. Energypads en -stacks gevuld met een geschikt Thermo Chemisch Materiaal (TCM) worden als noodzakelijk gezien om tot effectieve en seriematige productie te komen van een thermo-chemische warmte opslagsystemen. De te ontwikkelen energypads en -stacks zijn noodzakelijk om tot een kosteneffectief, flexibel inzetbaar, industrieel te vervaardigen warmtebatterij te komen. De warmtebatterij heeft een hoge betrouwbaarheid en een lange levensduur.

Korte omschrijving van de activiteiten

De hoofdactiviteiten omvatten het ontwerpen en testen van de Energy-Pads en het modelleren van de energypads. Vervolgens wordt een lab-model van de samengestelde warmtebatterij ontworpen, gebouwd en getest. Tenslotte wordt de kostprijs en businessplan gebaseerd op een eerste industrieel productieproces van de Energy Pads en Stacks ontworpen.

Resultaten

Het energypad project heeft geleid tot inzicht op welke wijze een warmtebatterij op basis van een TCM kan worden gemaakt en geproduceerd.

De TCM die hiervoor het best in aanmerking komt is Na_2S . De TCM Na_2S is echter lastig te verwerken, zwelt door de absorptie van het medium en heeft in zijn toepassing corrosieve eigenschappen. Ook heeft Na_2S een lage warmtegeleiding (kenmerkend voor alle TCM's). Een energypad lost een aantal knelpunten op. Door de pad structuur is modulaire verwerking mogelijk en kan het materiaal "werken". In de uitvoering van de energypad wordt gekozen voor een inert en goed geleidend materiaal. Grafiet vezels zijn hier uitermate goed geschikt voor. De ontwikkeling van een energypad heeft tot het inzicht geleid dat er een pad structuur nodig is die in driedimensie de warmte goed geleid.

Als onderdeel van het onderzoek is een numeriek rekenmodel van een energypad en energystack in ontwikkeld. Dit model is getoetst aan de hand van eerste metingen aan een eenvoudige energypad. Deze verificatie heeft aangetoond dat de rekenresultaten van het model goed overeenkomen met de meetresultaten. Vervolgens is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten hiervan geven aan dat een hoge warmtedoorgangscoefficient belangrijk is voor de werking van de warmtebatterij. Het damptransport tijdens het absorptie proces heeft een minder bepalend invloed dan gedacht.

Er is een lab model van de warmtebatterij gerealiseerd gebaseerd op silicagel en met de koperen bakjes als energypad. Metingen hieraan zijn gebruikt voor de verificatie van het rekenmodel. Daarnaast is gewerkt aan het optimaliseren van de warmtebatterij. Omdat de geschikte energypad

nog niet gerealiseerd is, is tijdens de experimenten teruggevallen op de bestaande warmtewisselaars. Deze gevinde buis warmtewisselaars zijn voorzien van een coating die de corrosie van Na_2S kan weerstaan. Vervolgens is op de gecoate warmtewisselaar silicagel aangebracht. De conclusie van deze aanpak is dat in deze opzet de afstand tussen de vinnen en de diepte van de vinnen een belangrijke rol speelt bij de afgifte van energie.

Er is kennis en ervaring opgedaan met het energypads concept binnen dit project. Dit is bestempeld als vertrouwelijk en is dan ook geheime kennis. De rechten hiervan liggen bij De Beijer RTB.

In dit project is ook gekeken naar de productie, de kostprijs en een businessmodel. Inzet van energypads kan tot een kostprijs daling leiden van circa 10% voor een warmtebatterij. Door de modulaire opbouw van de energystacks kunnen er diverse vermogen en capaciteiten geleverd worden. In het businessplan van de energypads is uitgegaan van levering van de energypads aan de warmtebatterij.

In het businessplan wordt een prijs van circa 200 euro per kWh voor de warmtebatterij, gebaseerd op energypads, als realistische en haalbaar aangegeven. Dat is circa 50% lager dan de nu beschikbare elektrische energie opslag.

De verdere ontwikkeling van energypads dient opgepakt te worden. Driedimensionale goed warmtegeleidende structuren kunnen op basis van bijvoorbeeld grafiet worden ontwikkeld. In een vervolg voorstel Energy pads 2.0 is deze aanbeveling opgepakt.

Het verdient aanbeveling het numerieke rekenmodel te valideren voor energypads en verschillende thermo-chemische werkstoffen. Vervolgens kan dit model worden ingezet om gevoeligheid analyses uit te voeren. Op basis van dit model kan een gesimplificeerd ontwerp hulpmiddel gemaakt worden.

Omdat er veel aandacht wordt besteed aan de zoektocht naar een perfecte thermo-chemisch materiaal blijft de ontwikkeling van een compleet systeem achter. Dit is echter noodzakelijk om goed zicht te krijgen op de ontwikkeling van het complete product.

Tevens wordt het aanbevolen om gericht onderzoek te doen naar productiemethoden en faciliteiten waarmee thermo-chemische energiesystemen kosten effectief, duurzaam en betrouwbaar gemaakt kunnen worden.

Inhoudsopgave

Inhoud

Samenvatting.....	2
1. Inleiding	5
2 Doelstelling van het energypads project.....	6
3. Projectaanpak en daaraan gekoppeld werkplan.....	8
4 Resultaten.....	10
4.1 Freedom to Operate & IP strategy	10
4.2 Energypads	10
4.2.1 Systemen en materialen.....	10
4.2.2 Ontwikkeling energypad.....	11
4.2.3 Eerste testen energypad concepten	13
4.2.4 Verbetering warmtegeleiding van thermo-chemische materialen	15
4.2.5 Resultaten metingen aan K_2CO_3 met en zonder grafiet	16
4.3 Numeriek reken model.....	20
4.3.1 De opzet van het model	20
4.3.2 Experimentele opstelling voor eerste metingen	22
4.3.3 Uitkomsten van het rekenmodel.....	23
4.3.4 Verificatie model met eerste metingen	24
4.3.5 Parameter studie	27
4.4 WarmteBatterij.....	29
4.4.1 Eerste concept warmtebatterij	29
4.4.2 Optimalisatie warmtebatterij	32
4.5 Kostprijs analyse energypads	36
4.5.1 Kostprijs warmte batterij met energy pads en energy stacks	37
5 Conclusies en Aanbevelingen	39
5.1 Conclusies	39
5.2 Aanbevelingen.....	40
6 Literatuur	41

1. Inleiding

Voor de realisatie van energie-neutrale gebouwen is de inzet van duurzame energiebronnen en veelal een vorm van warmte/koude opslag noodzakelijk. In de meeste situaties in Nederland wordt hierbij gebruik gemaakt van warmte-koude opslag (WKO) in de bodem. Echter WKO blijkt lang niet altijd mogelijk of wenselijk te zijn. Om toch overal energie neutraal te kunnen bouwen en renoveren, is er behoefte aan een alternatieve vorm van warmte en/of koude opslag. Een compact warmte/koude opslagsysteem dat de warmte gedurende langere tijd verliesvrij en kosteneffectief opgeslagen kan houden en bovendien goed schaalbaar is, wordt gezien als de heilige graal voor energie opslag. Belangrijke bijkomende randvoorwaarden zijn uiteraard industrialiseerbaarheid, kosteneffectiviteit, technische en bouwkundige inpasbaarheid.

Een oplossingsrichting om aan vrijwel al deze eisen te voldoen is overstappen op een nieuwe technologie zoals thermo-chemische opslag. Het is compacter dan opslag in de bodem of in een boiler, een bodembron is niet nodig, en warmte kan gedurende langere tijd vrijwel verliesvrij opgeslagen worden. Binnen Europa is Nederland één van de forerunners op dit gebied. De consortiumpartners zijn bij de meerderheid van de lopende onderzoeksprojecten op dit gebied betrokken.

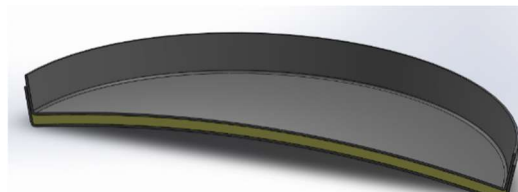
Echter enkele belangrijke hindernissen moeten nog geslecht worden voordat thermo-chemische opslag grootschalig toegepast kan gaan worden als volwaardig product. Deze zijn:

- Stabiliteit materialen (vooral verpulvering of agglomeratie, afhankelijk van de zoutkeuze, tijdens opeenvolgende cycli);
- Gebruik 'standaard' batch reactoren, wat resulteert in grotere parasitaire verliezen;
- State-of-charge sturing / flexibiliteit beperkt door gebruik batch reactoren;
- Omslachtig productieproces;
- Reductie van de hoge systeemkosten.

De ontwikkeling van energypads en de integratie in warmtebatterijen, kan al deze hindernissen in één keer wegnemen. Het opent de weg naar thermo-chemische opslag van warmte/koude als volwaardig product

2 Doelstelling van het energypads project

Een energypad is een eenvoudig te produceren en te stapelen micro reactor in de vorm van een pad (figuur 1). De energypads bestaan uit een voor waterdamp permeabele kunststof en/of koolstofvezeldoeken gevuld met zoutkristallen. De pads hebben geoptimaliseerde afmetingen en vormgeving zodat:



Figuur 1. Voorbeeld mogelijke energypad.

- Het voor de opslag niet meer uitmaakt of de zoutkristallen degraderen (verpulveren of agglomereren), de prestaties blijven intact door fixatie van het zout in de PAD; (het zogenaamde zwellen van het thermo-chemische materiaal (TCM) is door toepassing van de energypads toegestaan;
- Het eenvoudige stapeling en aansluiting mogelijk maakt om een warmtebatterij-stack te vormen;
- Het de warmte overdracht bevordert van het zout naar de warmtewisselaar, en vice versa (de koolstofvezels geleiden de warmte beter dan het zout);
- Het (water)damptransport wordt geoptimaliseerd;
- Eenvoudig en kosteneffectief te produceren zijn.

De energypads hebben in radiale richting een goede warmtegeleiding. Dit wordt gerealiseerd of door het toepassen van een koolstof omhulsel voor de energypads of door het plaatsen van de energypads op een goed geleidende en ondersteunende vin die aan de buis vast zit.

De energypads worden gestapeld tot stacks. Het aantal pads in een stack zijn bepalend voor de totale warmtecapaciteit van een warmtebatterij. Hierdoor is het eenvoudig geworden om met dezelfde productielijn afhankelijk van de wensen van de eindgebruiker, warmtebatterijen met verschillende karakteristieken te maken (capaciteit, vermogen, afgiftetemperatuur). De stacks vormen samen met een verdamper/condensor en de benodigde regeltechniek de warmtebatterij.

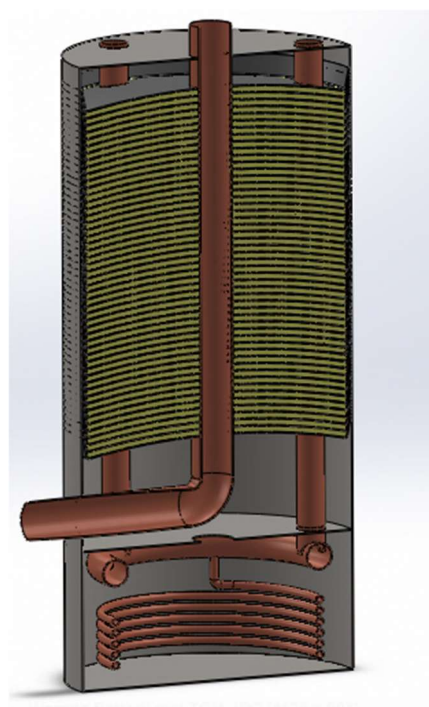
Belangrijk is dat naast het fysisch-chemisch functioneren van de energy pad ook de produceerbaarheid, de economische haalbaarheid van de energypads en de stacks, en de aansluiting op de wensen van de eindgebruiker gerealiseerd worden.

Dit project heeft als doel om:

- Energypads en stacks te ontwikkelen, te modelleren, bouwen en testen;
- Ondersteunende tools hiervoor te ontwikkelen
- Ontwerpen van het bijbehorende productieproces, om de kostprijs en benodigde verdere investering te bepalen ter onderbouwing van de business case en marktpotentieel
- Haalbaarheid aan te tonen van warmtebatterijen gebaseerd op energypads

Gedurende de uitvoering van het project worden nieuwe inzichten verkregen en wordt zicht op nieuwe oplossingen ontwikkeld, betreffende de volgende aspecten:

- Naast het fysisch-chemisch functioneren van de energypads zal inzicht verkregen worden in de produceerbaarheid van de energypads en de stacks.
- Een rekenmodel waarmee de dikte en grootte van energypads, de grootte en dikte van de vin, het aantal warmte inbrengende/afvoerende water doorstroomde warmtewisselaar, de afstand van de vinnen en de vullingsgraad van de pad en stack kan worden bepaald.
- Op welke wijze moeten de stacks in een warmte batterij worden ingebracht?
- Inzicht in de wensen en eisen van eindgebruikers.
- De eisen die aan het vervaardigen van een warmtebatterij worden gesteld zullen verder gaan dan de fysisch-chemische eisen. Eisen vanuit de markt, eindgebruikers en toepassers zullen worden beschreven, zoals veiligheid, hanteerbaarheid, inpassing, grootte etc.
- De economische haalbaarheid wordt onderzocht ingeval van opschaling/ grootschalige productie.



Figuur 2. Voorbeeld mogelijke warmte batterij.

3. Projectaanpak en daaraan gekoppeld werkplan

Voor de uitvoering van het project is een projectplan opgesteld bestaande uit 5 werkpakketten.

Deze werkpakketten zijn:

Werkpakket 1: Management

Doelstelling: management van het project, kennisoverdracht en onderbouwing business model voor warmtebatterijen

Werkpakket 2: Ontwikkeling energypad

Doelstelling: Ontwikkeling, bouw en testen van de energypad, een thermische op te laden energypad en verkenning naar een elektrisch te laden energypad.

Werkpakket 3: Model en tool ontwikkeling, gebaseerd op fysica en chemie

Doelstelling: Ontwikkeling van fysisch-chemische modellen en tools ter ondersteuning voor de ontwikkeling en karakterisering van de energypads, Stacks en de integratie in warmtebatterijen.

Werkpakket 4: Ontwerp warmtebatterij,

Doelstelling: Ontwerp, bouw en validatie van proof-of-concept van een warmtebatterij

Werkpakket 5: Evaluatie productieproces en kostprijs/

Doelstelling: Evaluatie haalbaarheid productieproces en bepaling van de kostprijs indicatie.

Activiteiten:

Uitvoering

Gaandeweg het project zijn er een aantal zaken aangepast. In maart 2017 is projectplan aangepast en goedgekeurd door RVO. De motivatie voor deze aanpassing is hieronder gegeven.

Het tot dan toe uitgevoerde onderzoek naar de energypads heeft resultaten opgeleverd die aanpassing van het onderzoek noodzakelijk maakten.

Uit het tot dan toe uitgevoerde onderzoek was gebleken dat de koolstofvezels voor energypads richtingsafhankelijke warmtegeleiding hebben. In radiale richting is de warmtegeleiding groot, maar in verticale richting beperkt. Daarom is vervolgens onderzocht of grafiet met het thermo-chemische materiaal te mengen is, om op deze wijze de beperkte warmte geleiding van TCM te vergroten.

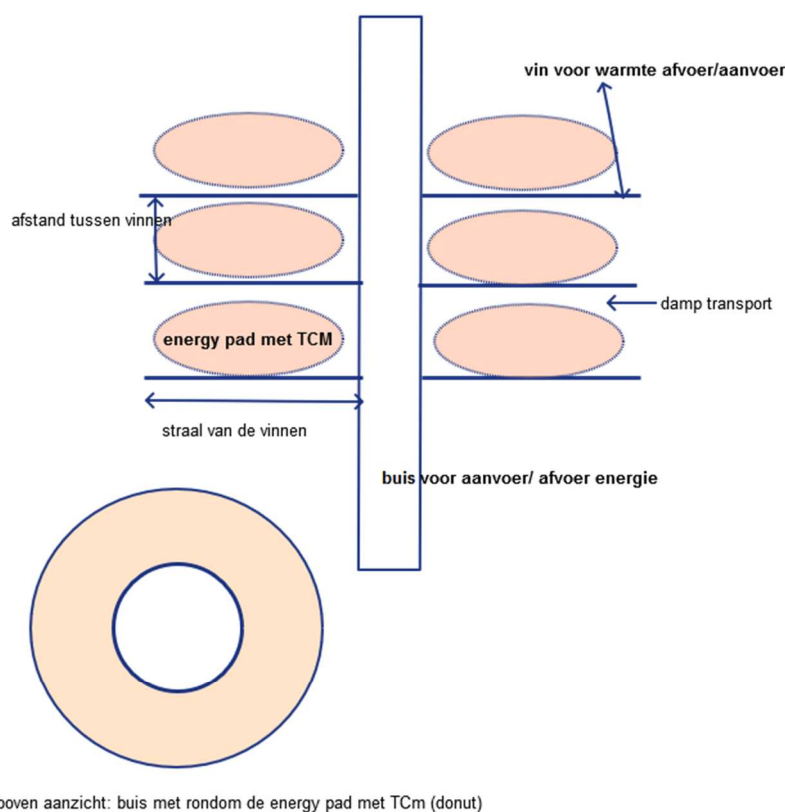
Hiervoor zijn diverse activiteiten en testen uitgevoerd.

Om de warmtegeleiding in de verticale richting te vergroten is het nodig om het thermo-chemische materiaal te mengen met bijvoorbeeld koolstof poeder in een nader te bepalen volume percentage. Dit is nodig omdat de radiale warmtegeleiding van koolstof pads uitstekend is maar de verticale geleiding van een koolstof pad slecht is. (Dit is gebleken uit het lopende onderzoek)

Vanwege het mengen van grafiet met het thermo-chemische materiaal kan niet elke TCM gebruikt worden. Met name het in dit project voorziene Na_2S is voor dit onderzoek vanwege de agressieve chemische reacties niet geschikt voor deze beproeving. (Onder meer de warmtegeleiding metingen kunnen niet met de beschikbare apparatuur uitgevoerd worden, DSC (differential scanning calorimetri)/ TGA (Thermo Gravimetrische Analyses) metingen kunnen niet plaats vinden). Reden om ook terug te schakelen naar andere neutrale materialen zoals silicagel en K_2CO_3 .

De consequentie van deze resultaten zijn de volgende:

- Ontwikkeling Energy-Pads™ wordt gesplitst in een pad als container van TCM. Hiermee wordt de pad en stack aanpak gecontinueerd. Het omsluitende pad materiaal hoeft niet langer van koolstof te zijn en kan een goedkoper materiaal zijn. Randvoorwaarde is en blijft dat het container materiaal inert is.
- De warmtegeleiding van het TCM wordt vergroot door mengen met koolstof (grafiet). Verschillende volume % en productiewijzen worden ontwikkeld en getest
De activiteiten voor een rekenmodel worden uitgebreid. De hier geschetste aanpak wordt in model gebracht, teneinde gevoeligheid analyses te kunnen uitvoeren voor de opbouw van Energy-Pads™, TCM met vergrootte warmtegeleiding door bijmenging warmtegeleiders in diverse %, ondersteunende warmtegeleiders (vinnen) die met de warmte inbrengende of afvoerende buis zijn verbonden (dikte, soort materiaal, verbinding met pijp, afstand tot volgende schijf, etc).



Figuur 3. Vernieuwde opbouw energypad ten behoeve van experimenten en verificatie rekenmodel.

4 Resultaten

4.1 Freedom to Operate & IP strategy

Voor de business strategie van de ontwikkeling en productie van energy pads is het nodig om een IP-strategie te ontwikkelen en de zogenaamde freedom-to operate te kennen.

Uit patent onderzoek is gebleken dat er geen belemmeringen zijn om de energypad verder te ontwikkelen.

Deze freedom-to operate is belangrijk voor de verdere IP strategie.

Vervolgens is de IP-strategie vast gelegd met garanties voor De Beijer RTB om het product verder te kunnen ontwikkelen.

4.2 Energypads

Om de energypads zoals beschreven in het projectplan te ontwikkelen is allereerst een literatuur en patent onderzoek uitgevoerd om de laatste ontwikkeling op het gebied van thermische opslag systemen en materialen inzichtelijk te maken. Dit wordt in 4.2.1 behandeld.

In hoofdstuk 4.2.2 wordt de ontwikkeling van energypad met randvoorwaarden, mogelijkheden en eerste resultaten gegeven.

4.2.1 Systemen en materialen

Allereerst is er een vergelijking uitgevoerd van bekende thermische energie concepten om de positie van thermo-chemische opslag te bepalen. In een vertrouwelijke deliverable is dit gegeven waarbij het volgende geconcludeerd is:

Geen van de andere thermische energie opslag concepten komt in de buurt van de doelstellingen van dit project om met thermo-chemische opslag in de gebouwde omgeving een compact, verliesvrije energiesysteem in staat om over een langere termijn thermische energie op te slaan te realiseren. Om goed zicht te krijgen op de state of art van thermo-chemische materialen is er een uitgebreide literatuur review uitgevoerd. Dit is uitgebreid beschreven [1].

Het literatuuronderzoek in combinatie met het programma van eisen aan de TCM's heeft geleid tot de keuze voor het gebruik van de TCM in dit onderzoek

Het thermo-chemisch materiaal (TCM) in de energypad is de motor van het systeem. De TCM zorgt doormiddel van een sorptiereactie voor de conversie van de energie, lage en hoge watertemperaturen voor de toepassingen in de woning, e.g. koelen, verwarmen. De gewenste temperatuur range is tussen de 10 en 120 °C.

De belangrijkste parameters voor de keuze van een TCM voor energieopslag zijn de energiedichtheid en de operationele temperaturen van het systeem (verdampers, condensatie, sorptie en desorptie temperaturen), naast de mechanische en chemische stabiliteit van de TCM's. Gebaseerd op de bovenstaande voorwaarden zijn er 3 TCM's geselecteerd, welke zijn weergegeven in de onderstaande tabel. In onderstaande tabel zijn de drie geselecteerde TCM's weergegeven, dit zijn 2 zouthydraten, namelijk kaliumcarbonaat (K_2CO_3) en natriumsulfide (Na_2S) en 1 adsorptiemateriaal silica-gel SiO_2 .

Tabel 1. Energiedichtheid van de 3 geselecteerde TCM's en de C/V en de (de)sorptietemperaturen.

TCM	Energiedichtheid, materiaal niveau [GJ/m ³]	Temperatuur range C/V [°C]	Temperatuur range reactor [°C]	Theoretische volumeverandering [%]	Smelt temperatuur hoogste hydraat [°C]
K ₂ CO ₃	1,3	10 – 40	60 – 100	6	831
Na ₂ S	2,41 (Nonahydrate volume)	10 – 23	60 – 82	21	83
SiO ₂ 123	0,59	10 – 40	60 – 100	0	>1000

Naast de volumeverandering waaraan de zouten hydraten onderhevig zijn tijdens het doorlopen van de cycli, zijn er nog de volgende aandachtspunten:

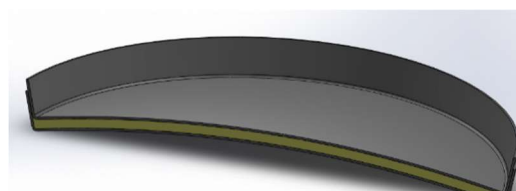
- Overhydratatie;
- Smelt temperatuur;
- Mechanische stabiliteit tijdens het doorlopen van de cycli;
- Chemische stabiliteit (decompositie en neven reacties).

Silica-gel 123, wordt in het energypad ontwerpproces gebruikt als een referentiemateriaal vanwege de mechanische en chemische stabiliteit en inerteid. Daarnaast zijn de fysische en chemische data van de eigenschappen van Silica-gel goed beschikbaar. De meeste zouthydraten vertonen nevenreacties met metalen, die niet condenseerbare gassen produceren, waardoor de prestaties van de energypad sterk worden gereduceerd. Het zouthydraat K₂CO₃ kent een lage of geen reactiviteit met metalen. Vanwege deze producteigenschap is het zouthydraat K₂CO₃ geselecteerd als zouthydraat voor de toepassing in de energypad.

4.2.2 Ontwikkeling energypad

Het doel van het energypad project is het ontwikkelen van een industrieel te vervaardigen thermo-chemische energieopslag warmtewisselaar combinatie, waarbij rekening gehouden wordt met de verwerkbaarheid van de warmtewisselaar materialen. Voor een onderhoudsvrije en lange levensduur zijn de volgende eigenschappen van belang:

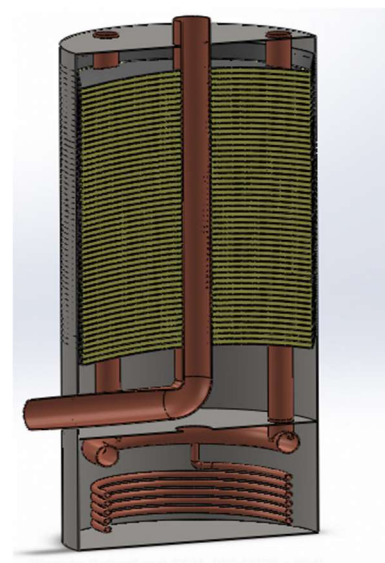
- De TCM mag geen reacties aangaan met het warmtewisselaar materiaal
- Het systeem moet mechanisch stabiel zijn
- Het systeem moet niet degraderen over de tijd.



Figuur 5. Doorsnede van een energypad.

Voor de toepassing van energieopslag in de gebouwde omgeving, moet het opslagsysteem energie kunnen leveren met een vermogen van 5 kW of hoger. Om aan deze randvoorwaarde te voldoen, moet het thermisch- en massa transport voldoende groot zijn (voldoende warmtegeleiding en voldoende dampopen structuren). Om deze transporten in kaart te brengen is er bij de TU/e een model van de energypad opgesteld. Metingen zullen worden gebruikt voor het verifiëren van het TU/e model. Het rekenmodel biedt een handvat voor het door ontwikkelen van TC-energie.

Binnen het project wordt een combinatie warmtewisselaars en TCM ontwikkeld gebaseerd op het energypad principe. Hierbij wordt een energy- pad ontworpen die geschikt is om de problemen op onder andere het gebied van niet condenseerbare gassen warmtegeleiding, expanderen en contracteren van de TCM's op te lossen. Zie figuur 5 en 6 met een schematische voorstelling van een energy pad en energy stack opslagsystemen. Het hart zijn de energy- pads, die samen een stack kunnen vormen.



Figuur 6. Warmte opslag systeem, tot een stack gestapelde energy pads rondom de warmtewisselaar.

De functionele eisen van de energypad zijn:

- Container voor het TCM;
- Hoog warmtedoorgangs coëfficiënt naar het water in de warmtewisselaar;
- Expansie en contractie TCM opvangen;
- Damp diffusie, damptransport door de pad heen;
- Inert, geen nevenreacties aangaan;
- Stapelbaar, semi zelfstandig, bevestiging aan buis in de warmtewisselaar.

De fabricage en productie eisen van de energypad zijn:

- Knel verbinding met koperen warmtewisselaarbuis;
- Inert materiaal, geen coating proces noodzakelijk;
- Fabricage en verwerkingskosten (vullen, verbinden etc.) komen overeen met een gevinde buis warmtewisselaar.

Concepten

Aan de hand van bovenstaande eisen, zijn de volgende 4 concepten voortgekomen.

Voor de concepten zijn 3 soorten materiaal geselecteerd, namelijk koper en de inerte materialen grafiet, en glasvezel verrijkt/gecoat met grafiet.

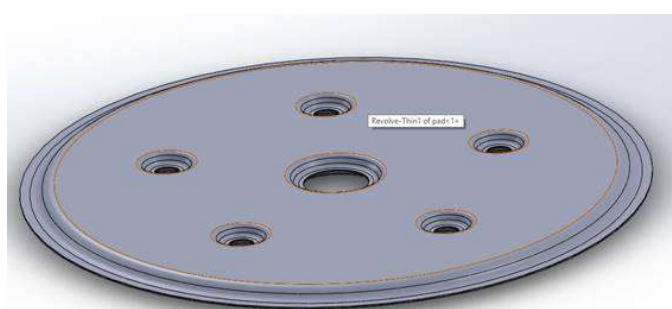
- Concept 1; glasvezel (verrijkt/gecoat met grafiet) doek, bevestigd met een knel verbinding rondom een koperen buis.
- Concept 2; grafiet sheet, bevestigd met een knel verbinding rondom een koperen buis.
- Concept 3; koperen pad, met een geperforeerde topplaat, bevestigd met een knel verbinding rondom een koperen buis.
- Concept 4; koperen pad, met een open bovenkant, bevestigd met een knel verbinding rondom een koperen buis.

4.2.3 Eerste testen energypad concepten

De vier concepten die hiervoor zijn beschreven zijn op basis van in de markt verkrijgbare materialen gemaakt.

Concept 1.

Op basis van het morfologisch onderzoek zijn een aantal energypads gemaakt. In figuur 7 is de pad gemaakt van carbon doek weergegeven. Bij analyse bleek dat de warmtegeleiding in radiale richting prima is, maar dat het carbon in verticale richting geen verhoging van warmtegeleiding gaf. Daarnaast is het lastig het carbon doek aan de warmtewisselaar te bevestigen

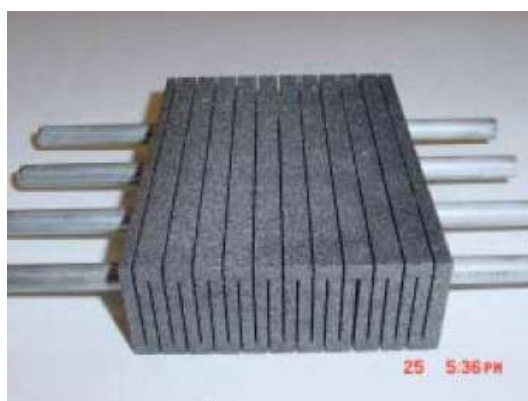


Figuur 7. Voorbeelden van op koolstof doek gebaseerde energypads.

Daarom wordt concept 1 niet verder ontwikkeld in dit onderzoek.

Concept 2.

Het tweede concept betreft grafiet schuim. Dit schuim kent een effectieve warmtegeleiding van 150 W/mK, is een licht materiaal (0,2-0,6 g/cm³) en heeft een groot inwendig oppervlak (5000-50000 m²/m³). Maar ook hier is de warmtegeleiding richtingsafhankelijk. Daarnaast is het grafiet schuim kwetsbaar.



Figuur 8. Voorbeelden van het gebruikte grafiet schuim.

Een andere mogelijkheid voor het tweede concept is het gebruiken van grafietplaten (graphite foam). In de platen wordt de TCM dan geabsorbeerd. Het resultaat van het inbrengen van Na_2S was dat er met moeite een kleine hoeveelheid in de schuimplaten aanwezig was.



Figuur 9. Grafietschuim met het ingebrachte Na_2S .

Vervolgens is met koolstofvezel doek en Na_2S gewerkt. Er zijn een aantal cycli uitgevoerd om te bekijken of het zwellen invloed heeft op de structuur. De productie bestond uit smelten, afkoelen en door zeef drukken (mesh 2,0 mm). Er zijn circa 8 cycli uitgevoerd. Ook deze werkwijze en productkeuze heeft niet tot het gewenste resultaat geleid.

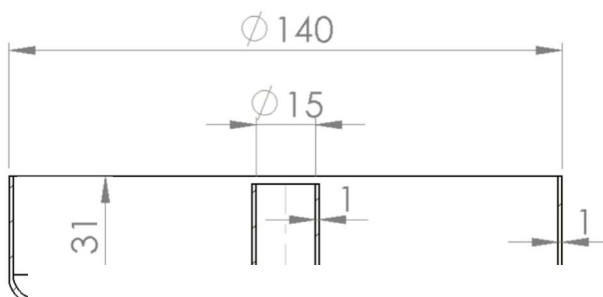
Dus ook concept 2 is niet verder ontwikkeld. Daarnaast is de conclusie van de experimenten met grafiet en Na_2S dat de focus nu komt te liggen op K_2CO_3 . Dit materiaal kan worden gebruikt in de opstelling aan de TU/e zonder schade aan de meetapparatuur. Hierdoor kunnen de eigenschappen zoals warmtegeleiding en absorberen en desorberen (TGA/DSC metingen) voor de TCM met grafiet toevoeging worden vastgesteld

Concept 3.

Dit concept het koperen bakje met geperforeerde afdekplaat is snel verlaten. De expansie van de TCM onder invloed van opname van waterdamp zorgde voor beschadiging van de afdekplaat.

Concept 4.

Dit concept is vrij basaal. De energy pad is nu een koperen bakje geworden. In het koperen bakje wordt de TCM's K_2CO_3 en/of silica gel toegevoegd, al dan niet gemengd met koolstof vezels.



Figuur 10. Ontwerptekeningen van de Energie Pad.



Figuur 11. De koperen energypad.

Deze TCM's hebben een lage tot geen reactiviteit met metalen. Om de constructieproblemen, zoals brosheid van het grafiet op te lossen, wordt ervoor gekozen om de energypad warmtewisselaar te vervaardigen van koper. De energypad is nu teruggebracht tot de essentie: een koperen bakje, container voor de TCM. Als TCM wordt of K_2CO_3 of silicagel gebruikt. Experimenten zijn nu goed uit te voeren en deze energypad is ook goed in het numeriek model COMSOL te modelleren. Met een geverifieerd model zijn dan nieuwe concepten van de energypad te analyseren.

4.2.4 Verbetering warmtegeleiding van thermo-chemische materialen

Bij De Beijer RTB zijn er empirische experimenten uitgevoerd met het verhogen van de thermische geleiding van het thermo-chemische materiaal. Het toevoegen van diverse thermisch geleidend additieven op basis van grafiet leidt tot een verhoging van de thermische geleiding in de range van 200 – 400 %, bij een gewichtspercentage grafiet in de range van 3 – 8,5 % (op basis van het anhydraat van het betreffende zouthydraat).



Figuur 12. Voorbeelden van K_2CO_3 gemengd met koolstof.

De productiemethoden voor het vergroten van de thermische geleiding van de zouthydraten zijn beschreven in een vertrouwelijke deliverable van dit project. Met deze methode kan een thermische geleiding additief met massapercentage van rond 3 % geproduceerd worden. Hierbij zijn verschillende soorten grafiet gebruikt. Verschillende percentage toevoeging zijn getest en ook verschillende methoden van het mengen van K_2CO_3 met expanded grafiet zijn getest. Zie onderstaande tabel.

Bij kaliumcarbonaat is de volumeverandering tijdens het doorlopen van de cycli vastgesteld. Aangenomen wordt dat de volumeverandering veroorzaakt wordt door de vorming van een poreuze structuur, wat gewenst is voor het massatransport van het water in en uit het kristalrooster van het zouthydraat.

Vastgesteld is in de experimenten dat de thermische geleiding als mede de proceseigenschappen van het zouthydraat (K_2CO_3) sterk verbeterd kan worden. Daarnaast is vastgesteld dat er een volumeverandering optreedt tijdens het hydrateren en het dehydrateren. In onderstaande tabel is het effect van toevoeging van grafiet aan K_2CO_3 te zien. De warmtegeleidingscoëfficiënt kan hiermee aanzienlijk vergroot worden.

Tabel 2. Effect van grafiet op de warmtegeleiding van K_2CO_3 bij diverse percentages.

TCM/graphite	W/mK	W% graphite
K_2CO_3 + grafiet	1,66	6,6*
K_2CO_3 + grafiet	1,13	10
K_2CO_3 + grafiet	1,99	12,7

4.2.5 Resultaten metingen aan K_2CO_3 met en zonder grafiet

De werkzame TCM kaliumcarbonaat (K_2CO_3), dat gebruikt wordt als test materiaal in de energypad, wordt experimenteel onderzocht met de apparatuur van de TU Eindhoven. In het afstudeerrapport van Shaic [2] is dit uitgebreid gerapporteerd. Uit de eerste resultaten blijkt dat kaliumcarbonaat een éénstaps reactiemechanisme heeft met een energieopslagdichtheid van $1,22 \text{ (GJ / m}^3\text{)}$ op materiaalniveau. Met zijn goedkope prijs (1 € / kg) en praktische gebruiksomstandigheden wordt kaliumcarbonaat beschouwd als een veelbelovende kandidaat om te worden gebruikt als materiaal voor warmteopslag.

Deze experimenten op macroschaalniveau zijn nodig voor het optimaliseren van de eigenschappen van de TCM in combinatie met de Energy Pad. Een aantal belangrijke eigenschappen worden bepaald. Dit zijn:

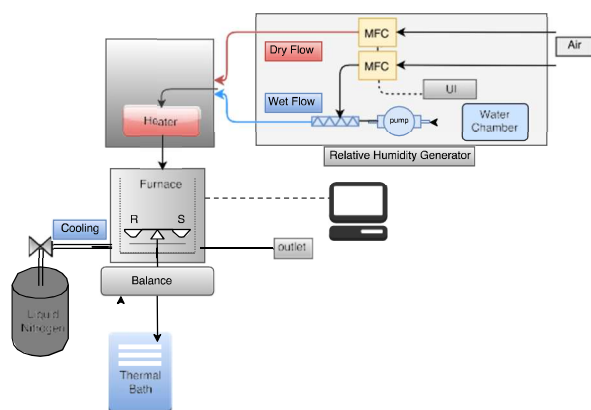
- De effectieve warmtegeleiding van K_2CO_3 -combinatie met verschillende gewichtspercenten geëxpandeerd grafiet gemengd met kaliumcarbonaat.
- Verschillende mengprocedures van geëxpandeerd grafiet met kaliumcarbonaat.
- Gegevens voor de, kinetische modellen die de kinetiek van hydratatie- en dehydratatiereacties van K_2CO_3 beschrijven. Te gebruiken in de numerieke kinetische modellen,

Verder zal een numeriek knooppmodel worden ontwikkeld van de warmte- en massaoverdrachtsprocessen die plaatsvinden in de energypad. Een geconcentreerde parameterbenadering wordt gebruikt voor het modelleren van de warmteoverdrachts- en massatransferprocessen gekoppeld aan de kinetiek van K_2CO_3 verkregen uit experimentele resultaten. De geldende balanswetten met betrekking tot de energypad en thermo-chemische materialen zijn afgeleid. Het numerieke model is opgelost en de resultaten zijn verkregen voor een stapel energypads die respectievelijk werkt tijdens desorptie- en absorptieprocessen.

Experimentele setup

TGA-DSC enthalpie metingen

De kinetische studie van de TCM is gebaseerd op meetgegevens die zijn verkregen via thermische analyse-apparaten zoals thermische gravimetrische analyse (TGA) en Differential Scanning Calorimetry (DSC). Een gelijktijdige meting van de massawijziging (TGA) evenals de warmtetoevoer / afgifte (DSC) van een monster wordt uitgevoerd met behulp van een simultaan thermische analyse (STA) apparaat dat is verbonden met de relatieve vochtigheidsgenerator.



Figuur 13. Schematische weergave TGA DSC opstelling.

Met de TGA-DSC zijn metingen verricht om de enthalpie bij diverse temperaturen te bepalen. In tabel 3 is dit weergegeven.

Tabel 3. Specifieke reactie-enthalpie, energieopslagdichtheid per massa-eenheid en volume-eenheid. Deze getallen zijn gebaseerd op de experimentele waarden voor de hydratatiereactie tussen anhydraat en sesquihydraat van K_2CO_3 voor gevarieerde hydratatie-isothermen met een waterdampdruk van 13 mbar

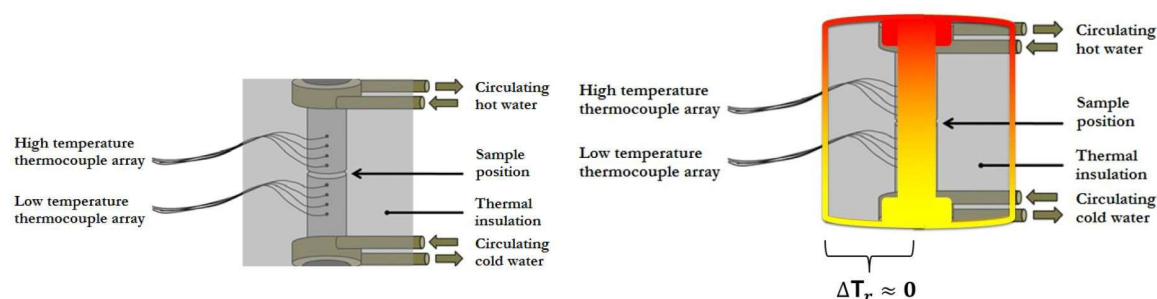
Hydration Isotherm	Δh	Δh	E/V
(°C)	($\frac{kJ}{kg}$)	($\frac{MJ}{mol}$)	($\frac{GJ}{m^3}$)
26	61.54	0.67	1.22
30	60.90	0.66	1.20
40	60.22	0.65	1.19
48	60.87	0.66	1.20

Deze metingen zijn ook uitgevoerd voor K_2CO_3 met 10% expanded grafiet als toevoeging. Er kan worden opgemerkt dat de kinetiek niet in belangrijke mate wordt beïnvloed wanneer grafiet wordt toegevoegd. Concluderend kan worden opgemerkt dat grafiet de kinetische prestatie van K_2CO_3 niet

beïnvloedt en dat het nog steeds inert is voor waterdamp en niet deelneemt aan de- en hydratatiereacties. Bij de toevoeging van grafiet aan K_2CO_3 neemt de bulkmassa van het monster echter toe, wat betekent dat de totale energieopslagdichtheid wordt verlaagd. Met 10% grafiet toegevoegd aan K_2CO_3 , werd de energiedichtheid van K_2CO_3 tijdens de hydratatiereactie voor een hydratatie-isotherm van 30 °C verlaagd van 1,2 [GJ/ m³]. tot 0,95 [GJ / m³]. Toevoeging van 10% grafiet aan K_2CO_3 verhoogt de warmtegeleiding van het zouthydraten aanzienlijk, zoals in het vervolg wordt beschreven.

De warmte geleiding

In het kort wordt hier informatie gegeven over de opstelling die is gebruikt om de thermische geleidbaarheid van het zouthydraat te bepalen. De opstelling is gebaseerd op het guarded heat flow principe waarbij een eendimensionale warmtestroom wordt gecreëerd door de TCM, die kan worden gemeten met een aangrenzende warmtefluxmeter die is verbonden met thermokoppelarrays zoals te zien in figuur 17.



Figuur 17. (a) Illustratie van de meetopstelling (b) Illustratie van het werkingsprincipe van de guard

Er zijn samples in de vorm van pillen gemaakt van K_2CO_3 met verschillende gewichtspercentages toegevoegd grafiet. Hier zijn de warmtegeleidingsmetingen met de guarded heat flow apparatuur. In de onderstaande tabel zijn de meetresultaten weergegeven.

Deze metingen zijn uitgevoerd om het effect van grafiet op de effectieve K_{eff} te onderzoeken. Het is belangrijk op te merken dat de deeltjesgrootte voor deze pillen allemaal verschillend was. De tabel toont de waarden van K_{eff} en Φ gebaseerd op de meetgegevens voor composieten van K_2CO_3 verschillende % grafiet toevoeging.

Tabel 4: Experimentele k_{eff} - en Φ -waarden voor de watervrije K_2CO_3 -pillen met gevarieerd grafietgehalte

Graphite content (weight %)	K_{eff} (W/mK)	Uncertainty on k (W/mK)	Estimated porosity (%)
0	0.416	± 0.01951	20.1
5	1.146	± 0.045627	20.6
7.5	2.376	± 0.10882	20.2
10	3.102	± 0.12388	21.9
12.5	7.245	± 0.26806	21.8
15	7.914	± 0.1553	21.4
20	8.176	± 0.10702	22.2

Een zuiver K_2CO_3 -monster van 40 gram heeft een keff-waarde van 0,416 [W / K]. Bij toevoeging van 10% grafiet op basis van gewicht neemt de keff-waarde toe tot 3,102 [W / K]. Dit gebeurt echter ten koste van de energieopslagdichtheid die wordt verlaagd van 1,22 [GJ / m³] tot 0,95 [GJ / m³], berekend voor het samengestelde monster van hetzelfde gewichtspercentage grafiet. Het effect van porositeiten en deeltjesgrootte op Keff-waarden van K_2CO_3 toonde aan dat de effectief thermische geleidbaarheid vermindert met toenemende porositeit en geen trend vertoont voor gevarieerde deeltjesfracties.

Ook toonde K_2CO_3 een significante verbetering in conversie als gevolg van het cycleren.

Geen visueel onderzoek werd uitgevoerd tijdens het experimenteren met K_2CO_3 . Uit literatuur is het bekend dat zouthydraten structurele veranderingen ondergaan tijdens absorptie / desorptiecyclus, leidend tot veranderingen in volume en structureel gedrag. Visueel onderzoek kan worden gedaan om te zien hoe het waterdamptransport in het zouthydraat plaatsvindt na structurele veranderingen. Voor thermische geleidbaarheidsmetingen worden experimenten uitgevoerd met pillen die een bepaalde (lage) porositeit hebben omdat de pillen worden bereid door te drukken. Nieuwe methoden moeten worden ontwikkeld of de guarded warmtefluxmeter moet worden aangepast voor het meten van pillen met porositeiten dicht bij de porositeit van een gepakt bed in toepassingen in een opslag systeem.

CONCLUSIES ENERGYPAD

Het concept van een pad te vullen met een thermo-chemisch materiaal lost problemen inzake productie, zwellen, modulariteit en handelbaarheid op. Dampopen structuren zijn goed te verkrijgen. De energypads gemaakt van grafiet hebben goede warmtegeleiding in de radiale richting, maar slechte warmtegeleiding in de verticale richting. Ook het inbrengen van een TCM in expanded grafiet levert niet de juiste energypad.

Vervolgens is onderzocht of menging van de TCM met grafiet vezels werkt. Deze aanpak vergroot de warmtegeleiding, maar is hiermee nog geen energypad. Daarnaast is de TCM kaliumcarbonaat als relatief nieuw TCM onderzocht. Dit omdat K_2CO_3 goede eigenschappen heeft met betrekking tot verwerking en corrosie. En daarom dus een goede TCM om de verder experimenten mee uit te voeren. TGA-DSC metingen en metingen met een guarded heat flow meter zijn uitgevoerd om de eigenschappen van K_2CO_3 puur en met verschillende gewichtsprocenten grafiet te bepalen. Om het concept van de energypad verder uit te testen is een energystack bestaande uit 8 energypads gemaakt. Deze energypads zijn koperen schaaltes verbonden aan de warmtewisselaar en aan de bovenzijde open. Bij het verder experimentele onderzoek wordt gewerkt met silica gel en K_2CO_3 .

In dit project is het nog niet gekomen van het ontwikkelen van een geschikte energypad. De resultaten tonen aan dat een energypad een uitstekende oplossingsrichting is voor een warmtebatterij die met energypads en stacks opgebouwd kan worden tot het juiste vermogen en capaciteit. Uit het onderzoek is gebleken dat goede driedimensionale warmtegeleiding voor een energypad noodzakelijk is.

4.3 Numeriek reken model

4.3.1 De opzet van het model

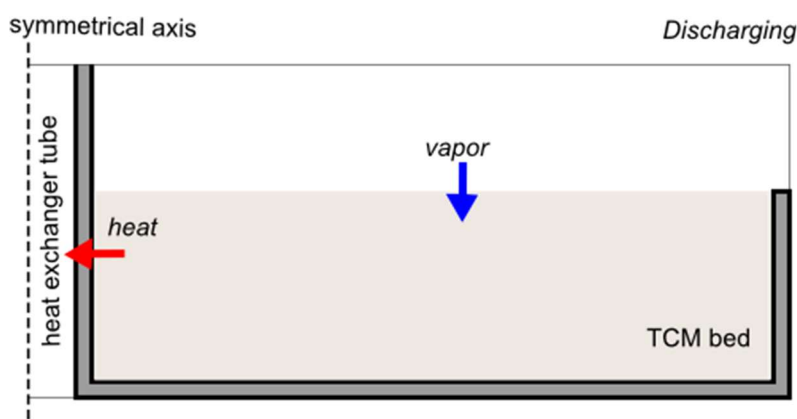
Een fysisch model van de energypad en energy stack wordt gemaakt in COMSOL.

Een numeriek knooppmodel worden ontwikkeld van de warmte- en massaoverdrachtsprocessen die plaatsvinden in de energypad. Een geconcentreerde parameterbenadering wordt gebruikt voor het modelleren van de warmteoverdrachts- en massatransferprocessen gekoppeld aan de kinetiek van K_2CO_3 verkregen uit experimentele resultaten. De geldende balanswetten met betrekking tot de energypad en thermo-chemische materialen zijn afgeleid. Het numerieke model is opgelost en de resultaten zijn verkregen voor een stapel energypads die respectievelijk werkt tijdens desorptie- en absorptieprocessen.

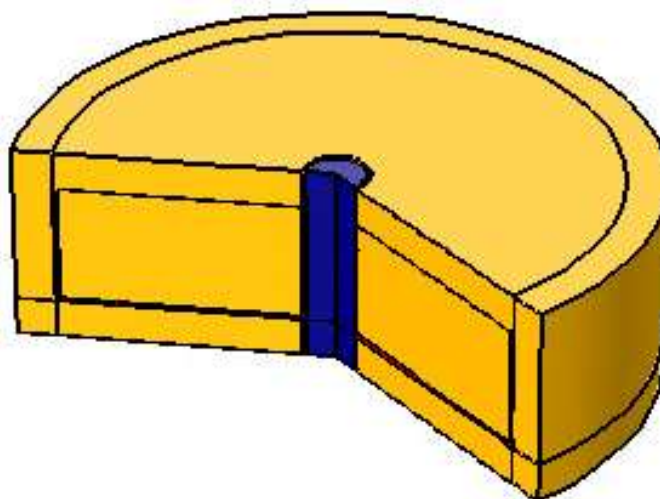
De warmte- en massa overdrachtsprocessen van de energypad zijn gemodelleerd.

Eén energypad wordt gesimuleerd door een axiaal symmetrisch 2D-numeriek model. Het domein wordt weergegeven in de onderstaande afbeelding. Het model bestaat uit 5 fysische relaties:

- Transport van waterdamp
- Warmteoverdracht in poreus bed
- Reactiekinetiek
- Warmteoverdracht in vaste stof
- Warmteoverdracht in vloeistof



Figuur 18. het gesimuleerde domein in het 2D axiaal symmetrische numerieke model



Figuur 19. 3D doorsnede van het rotatie symmetrische domein.

De belangrijkste aannames voor het fysische COMSOL model zijn:

- Stralingseffecten worden verwaarloosd vanwege de relatief lage temperatuur in het systeem.
- De eigenschappen van de fasen zijn isotroop en uniform. Daarnaast worden de meeste fysische en chemische stoffeigenschappen als constant beschouwd.
- Het gasvormige en het vloeibare absorbaat zijn in thermisch evenwicht met de vaste fase.
- Het poreuze medium is niet vervormbaar.
- Het geadsorbeerde absorbaat gedraagt zich als een vloeistof.
- Het gasvormige absorbaat voldoet aan de ideale gaswet.
- Volumekrachten, zoals buoyancy door temperatuurverschillen, worden verwaarloosd.
- De effecten van druk- en viskeuze dissipatie zijn verwaarloosbaar

Op basis van deze aannames worden in het numerieke model de 5 fysische vergelijkingen die de overdrachtsprocessen beschrijven gemodelleerd voor de axiaal symmetrische energypad.

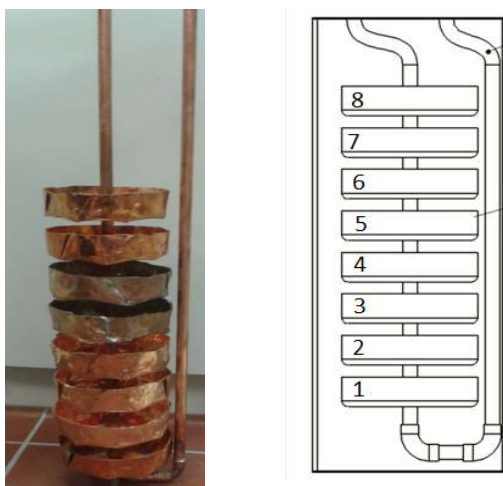
Dit betreft het oplossen van:

- De vergelijkingen voor het transport van waterdamp door het systeem
- De vergelijkingen voor het warmtetransport in poreuze media
- De vergelijkingen voor de kinetiek van de reacties
- De vergelijkingen warmtetransport in vaste media
- De vergelijkingen warmtetransport in vloeibare media

Voor een uitgebreide beschrijving van de opzet van het numerieke model zie het afstudeerrapport van Shaik [2].

4.3.2 Experimentele opstelling voor eerste metingen

Er is een experimentele opstelling op basis van de koperen energypads opgebouwd. Van deze energypads is een energy stack gemaakt bestaande uit 8 energy pads. Zie figuur tot een stack met 8 energypads. In figuur 20 is dit weergegeven. Als werkstof voor de eerste experimenten wordt silicagel gebruikt



Figuur 20. De energy stack met 8 boven elkaar geplaatste energypads.

De energypads worden in een vacuümvat geplaatst, dat is verbonden met een verdamper / condensor (V/ C), die in een tweede vacuümvat wordt geplaatst. De vaten kunnen van elkaar worden gescheiden door een klep tussen de twee vaten te sluiten.

Het sorptiegedrag van het TCM-bed wordt afgeleid uit het temperatuur verloop, gemeten door thermokoppels geplaatst in de TCM-bedden. De experimentele test condities voor het testen van de warmtebatterij zijn in de onderstaande tabel 5 weergegeven. Wanneer de warmtebatterij wordt opgeladen wordt dit uitgevoerd bij een aanvoertemperatuur van 80 °C van het water dat door de warmtewisselaar in het reactor bed stroomt. Deze temperatuur is gekozen op basis van het toepassen van de warmtebatterij in een warmtenet of bij zonnewarmte. Op deze wijze wordt de waterdamp uit de TCM gedreven en condenseert onderin de warmtebatterij bij de condensor. Wanneer de warmtebatterij gebruikt voor het leveren van warmte is de aanvoertemperatuur voor het water dat door de warmtewisselaar stroomt en die door het reactor bed gaat., 30°C. De TCM neemt waterdamp op en geeft warmte af. De verdamper onderin de warmtebatterij wordt doorstroomd met een vloeistof van 20 °C. Deze vloeistof koelt door het verdampen af. De ingangstemperaturen van de warmtewisselaar en de verdamper/condensor wordt ingesteld als test conditie. De uitgangstemperaturen van de warmtewisselaar en de absorber/condensor worden gemeten. Ook worden de flows gemeten. Op basis hiervan kan het afgegeven en opgenomen vermogen en warmte worden vastgesteld. Ook worden metingen verricht op drie plaatsen in het silicagel reactor bed.

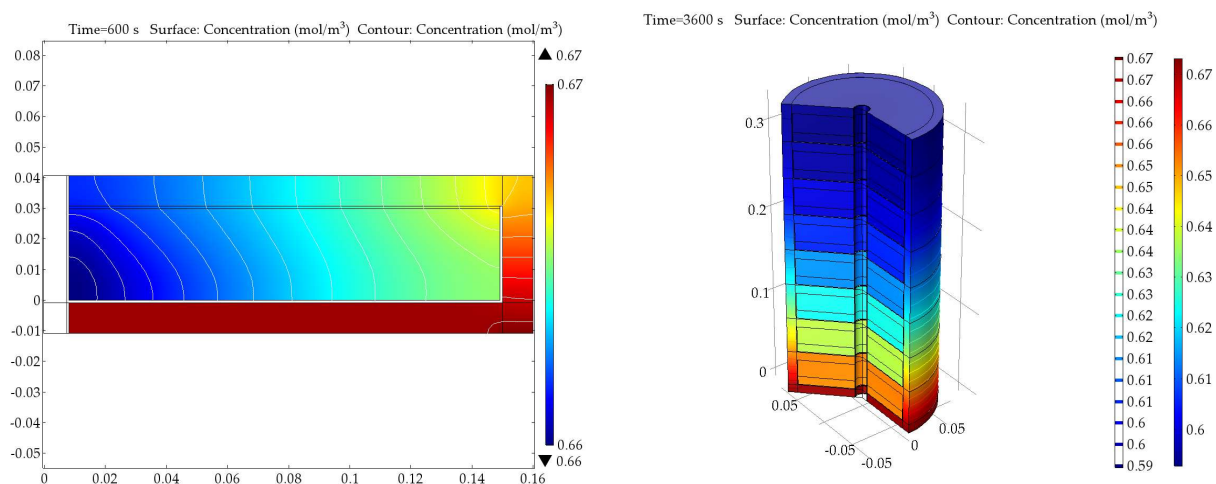
Tabel 5. De Water inlaattemperaturen van de reactor en de V / C tijdens de desorptie- en sorptiecycli van silicagel 123.

	Reactor desorptie	Reaction Sorptie	V/C desorptie	V/C Sorptie
Temperatuur [°C]	80	30	30	20

4.3.3 Uitkomsten van het rekenmodel

Het numerieke model van de energypad is getest aan de hand van een aantal berekeningen voor karakteristiek situaties. Hier worden de resultaten van een aantal berekeningen weergegeven.

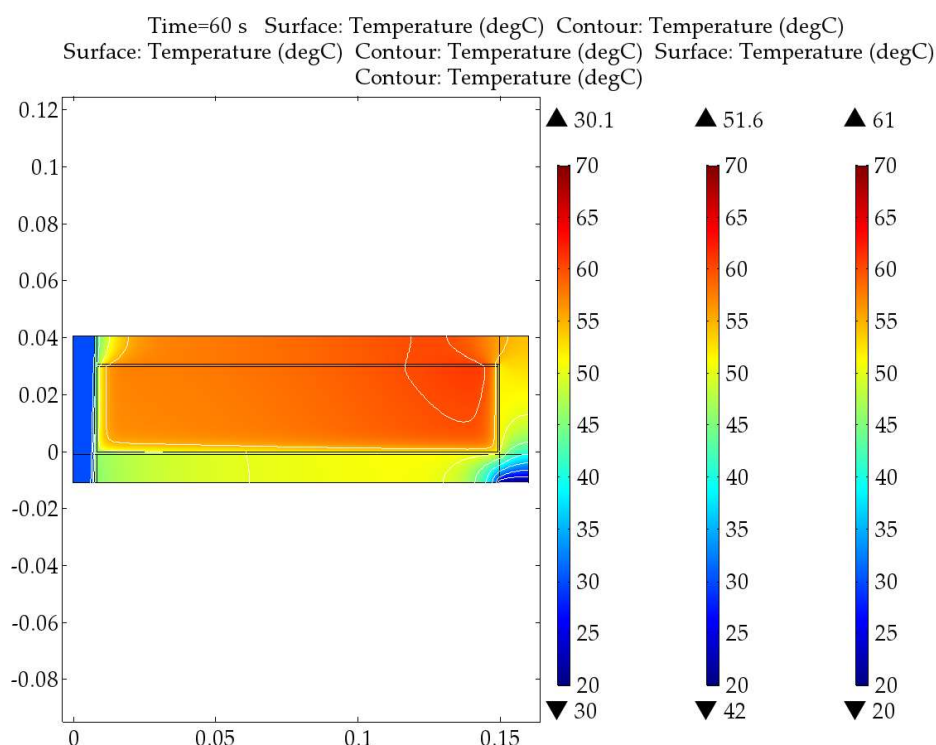
In de volgende figuur is de waterdamp concentratie na 600 s in de energypad weergegeven. Hier is duidelijk te zien dat er een soort wave van waterdamp door de silicagel gaat. De concentratie verschillen waterdamp zijn klein. Dit betekent dat het damptransport hier niet de limiterende factor is.



Figuur 21. De waterdamp concentratie 600s na damptoetreding bij de energypad.

Het resultaat van het adsorberen van de waterdamp in de silicagel, geplaatst in de energypad, is dat er warmte vrijkomt. Dit leidt tot een toename van de temperatuur in de energypad. Het berekende temperatuur profiel in de energypad na 60s is hieronder gegeven. De warmte wordt afgevoerd via de watervoerende buis links in de figuur met de relatief lage temperatuur. Het temperatuur profiel in de

energypad laat zien hoe de warmte wordt gegenereerd en wordt afgevoerd. De opgewekte warmte moet vanuit de silicagel in de energypad naar de goed geleidende vin gaan en zo afgegeven worden

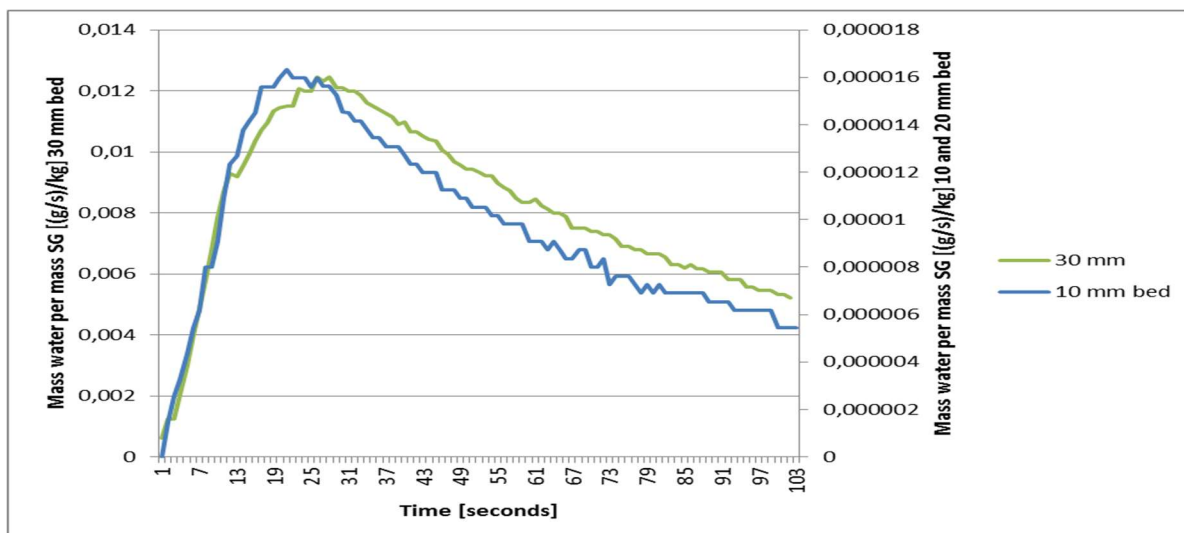


Figuur 22. Resultaten van Comsol model. Temperatuur verdeling in energypad tijdens absorberen waterdamp, na 60 s.

Het numerieke model maakt het mogelijk om de fysische fenomenen in de energypad te bestuderen. Waterdamp concentratie, temperaturen, absorptie of desorptie warmte, vermogen en capaciteit kunnen worden berekend etc. Met dit model is het nu goed mogelijk om de ontwerp parameters van de energypad en het thermo-chemische materiaal te variëren. Hierbij kan gedacht worden aan afmetingen en plaatsing van de energypad, warmtegeleiding van de TCM en de pad, dampopen structuren etc. Hiermee kan het numerieke COMSOL model een krachtig instrument zijn om nieuwe concepten en nieuwe TCM op hun performance te bekijken. Een eerste verificatie is uitgevoerd. Op termijn is een uitgebreide verificatie/validatie nuttig en nodig.

4.3.4 Verificatie model met eerste metingen

Voor verificatie van het rekenmodel zijn testen uitgevoerd met verschillende TCM-laagdikten. In onderstaande grafiek is het gemeten verdampingsvermogen bij een TCM laagdikte van 10 en 30 mm weergegeven.

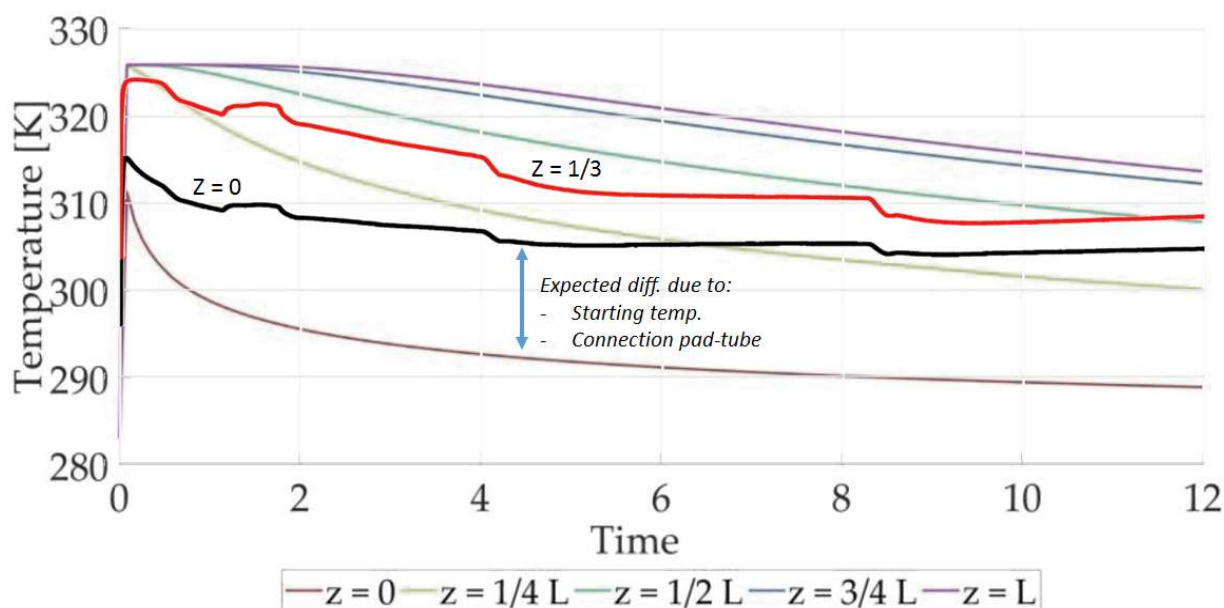


Figuur 23. Verdampingsvermogen per kg silica-gel bij een TCM laagdikte van 10 en 30 mm.

30 seconden lager dan bij een TCM laagdikte van 10 mm. Dit kan verklaard worden door de grotere thermische weglengte bij de TCM laagdikte van 30 mm.

De berekende en gemeten temperatuur in de energypad is in figuur 24 weergegeven.

In onderstaande grafiek, zijn de gemodelleerde temperatuurreponsies van een silica-gel laag van 30 mm dikte weergegeven, gecombineerd met de gemeten data uit het onderzoek.



Results are based on: Loading of 30mm high Silica gel with temperature measurements taken at 10mm above the copper surface

Figuur 24. De berekende en gemeten temperatuurverloop in de energypad. In het onderschrift staan de berekende temperaturen van e pad op $z=0$ (op de vin) tot $z=L$ (buitenkant silicagel). De rode en zwarte lijnen in bovenstaande afbeelding geven het temperatuursverloop die vastgesteld zijn tijdens de experimenten, waarbij de zwarte lijn het temperatuursverloop van de vin weergeeft en de rode lijn het temperatuursverloop van het silica-gel op 1/3 bed hoogte

De metingen en berekening komen qua verloop en tendens goed overeen. In een mogelijke validatie traject kan de nauwkeurigheid van de berekeningen worden vastgesteld.

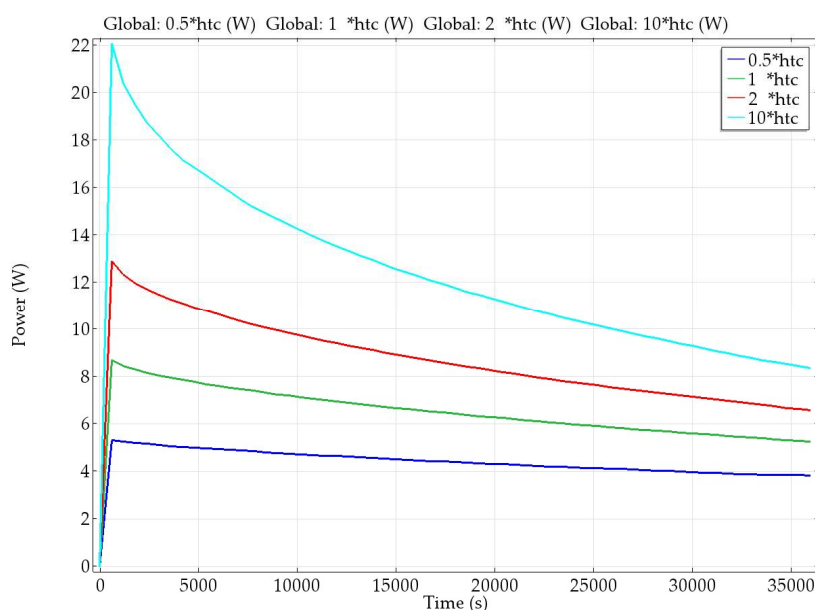
Omdat in het numerieke model het verloop in de tijd goed overeenkomt met het gemeten verloop, kan nu een parameter studie worden uitgevoerd. De belangrijkste kenmerkende parameters van energypad worden hierbij gevarieerd teneinde invloed van de belangrijkste parameters vast te stellen. In de volgende paragraaf wordt dit gerapporteerd.

4.3.5 Parameter studie

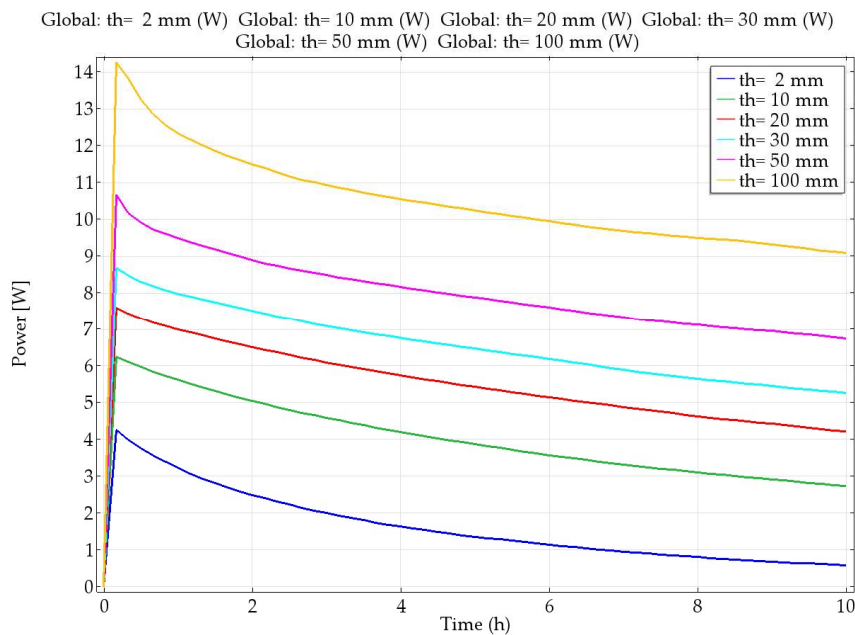
In deze parameter studie worden de belangrijkste parameters van de energypad gevarieerd. Dit betreft de warmtegeleiding, de diameter en dikte van de energypad, de open ruimte boven een energypad en de warmteoverdrachtcoëfficiënt.

De belangrijkste uitkomsten van de parameter studie zijn:

1. De diameter van de energypad heeft geen invloed op de maximum power output, maar wel op de capaciteit.
2. Vergroting van de warmtegeleiding van de TCM door toevoegen van bijvoorbeeld grafiet vergroot de maximum power output, maar minder dan verwacht. In combinatie met het vergroten van de warmte doorgangcoëfficiënt van het TCM bed naar de vin naar de warmtewisselaar vloeistof geeft dit een grote verbetering. Zie de onderstaande figuur 25.
3. De dikte van het TCM bed in de energypad is belangrijk voor het vermogen. In figuur 26 is dat weergegeven
4. De ruimte tussen de energypads speelt een beperkte rol. Blijkbaar is het damptransport in de opzet met energypads niet de limiterende factor.



Figuur 25. Vermogen van de energypad als functie van de tijd, bij oplopende effectieve warmtedoorgangcoëfficiënt (HTVC)



Figuur 26. Vermogen als functie van de tijd bij verschillende dikten van het TCM bed.

Conclusie Numeriek Comsol Model energypad en stack.

Het model is een krachtig gereedschap. Eerste verificatie aan experiment heeft laten zien dat het gemeten en berekende temperatuurverloop in de energy pad redelijk tot goed overeenkomt.

Met het ontwikkelde model zijn veel verschillende situaties te berekenen en daarom is er een gevoeligheidsanalyse voor het ontwerp van de energypad en de TCM uitgevoerd.

Conclusie hiervan is: De warmteoverdracht is de beperkende factor en het damptransport is veel minder beperkend ten aanzien van het functioneren van de energypad.

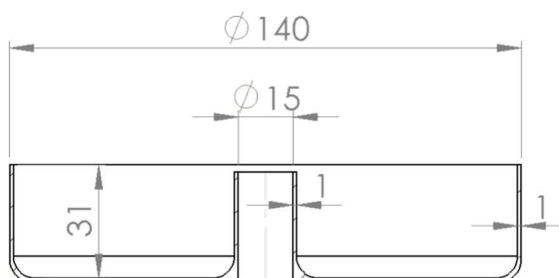
Daarom moet de warmteoverdracht verbeterd worden. Vergroting van de warmtegeleiding van de werkzame stof verbetert de prestaties van het systeem, maar is veel effectiever wanneer de warmteoverdrachtscoëfficiënt van bed via de vin naar de vloeistof wordt verbeterd. Ook is het optimaliseren van de dikte van de energypad met het oog op de warmteoverdracht belangrijk. Daarom is een kleinere bed dikte belangrijk om de prestaties te verbeteren. De bed-diameter heeft echter een verwaarloosbaar effect, aangezien de geleidbaarheid van de koperen vin hoog is.

4.4 WarmteBatterij

4.4.1 Eerste concept warmtebatterij

Op basis van de resultaten van de uitvoering van de energypad en de numerieke analyse is een eerste warmtebatterij met energypads ontworpen. Dit ontwerp is in hoofdstuk 4.3.2 al gepresenteerd bij de verificatie van het numerieke model.

Hier wordt het detail ontwerp nogmaals toegelicht.



Figuur 27. Afmetingen energypad.

In figuur 27 is de energypad weergegeven. Het is een koperen bakje dat aan de warmte aan of afvoerende buis in het centrum is bevestigd. De energypad is aan de bovenzijde open om damptransport naar het TCM bed mogelijk te maken. Daarnaast kan de TCM vrij naar boven expanderen. De concept warmtebatterij is opgebouwd uit acht van dergelijke energypads. In figuur 28 is de test uitvoering hiervan gegeven

In deze test versie is vanwege chemische en fysische stabiliteit silica gel gebruikt.

Deze energystack wordt in een reactormodule geplaatst. In deze reactor module wordt een zeer lage druk gecreëerd. De onderzijde van de reactor module bevat de condensor/verdamper. In het vat bevindt zich een afscheiding tussen boven en onderzijde, waarin een vacuüm klep is geplaatst.

Door het deksel van de reactormodule lopen de leidingen van de warmtewisselaar en de bedrading van de thermokoppels.

In figuur 29 is weergegeven waar de thermokoppels voor het meten van de temperatuur geplaatst zijn



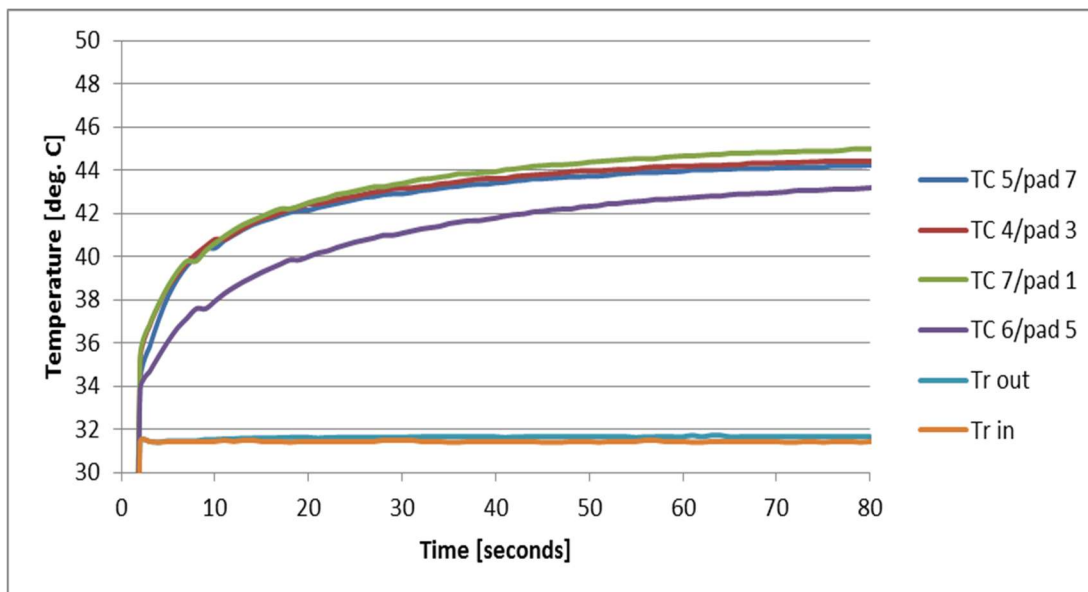
Figuur 28. De gemaakte energystack.

Allereerst worden er metingen verricht aan de warmtebatterij met silicagel om de zogenaamde verticale temperatuur distributie in de warmtebatterij te meten. Daartoe zijn thermokoppels geplaatst onder energypad 1,3,5 en 7. Er is gewerkt met drie verschillende dikte van het silicagel in de energypads. Deze diktes zijn respectievelijk 10mm, 20 mm en 30 mm.

In figuur 30 is de temperatuur responsie van de energypads te zien bij een uitvoering met een 10mm silicagel dikte in de energypads.



Figuur 29. De plaatsen van de thermokoppels



Figuur 30. Temperatuur verloop in verticale richting in de warmtebatterij.

Uit de metingen blijkt dat er geen relevant temperatuurverschil in verticale richting optreedt. De conclusie is dat de waterdamp homogeen verdeeld wordt over de verticale richting van de warmtebatterij.

Vervolgens zijn er metingen verricht met de temperatuur sensoren geplaatst in een energypad op verschillende radiale plaatsen. In figuur31 is de uitvoering hiervan getoond.



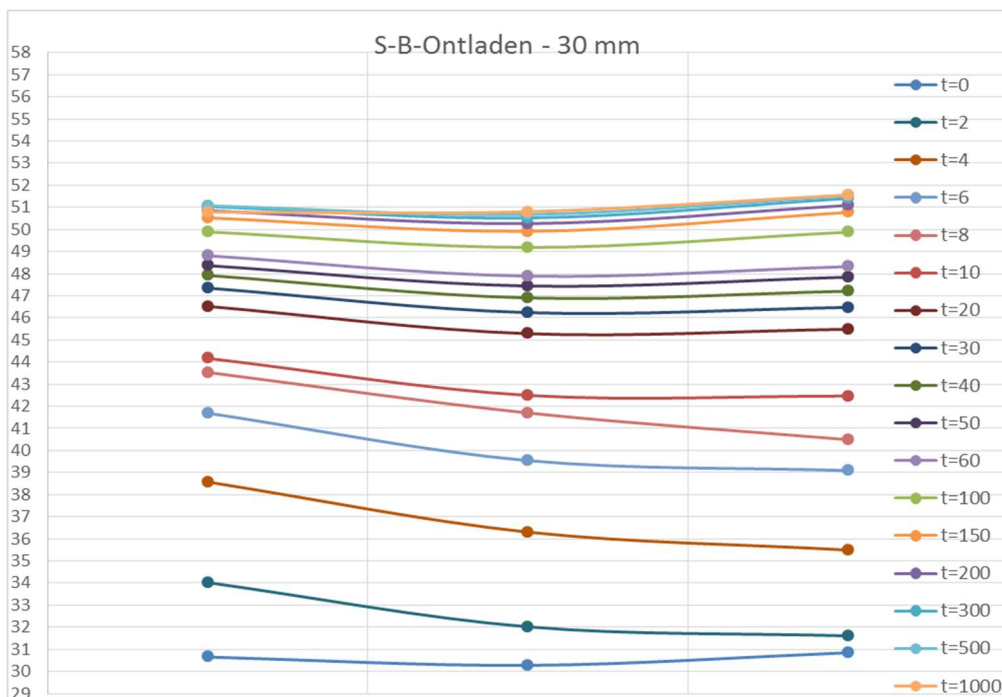
Figuur 31. Geplaatste thermokoppels in het silicagel bed.

Aan de warmtebatterij met de acht energypads en gevuld met silicagel in drie bed diktes zijn metingen uitgevoerd.

In figuur 32 is temperatuur ontwikkeling in de tijd weergegeven voor de drie temperatuur sensoren in het silicagel.

Uit de metingen is afgeleid dat het damptransport naar de energypads met silicagel onafhankelijk is van:

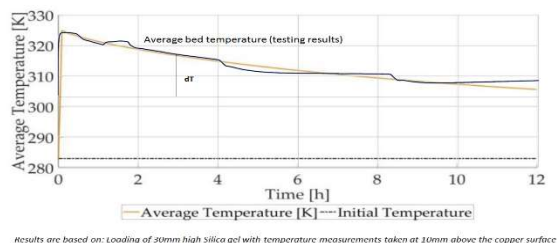
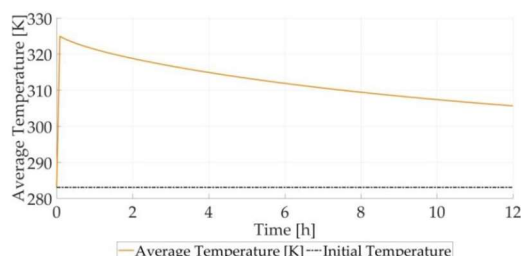
- de laagdikte van de silicagel,
- de locatie in de radiale richting in het silicagel bed
- de hoogte van de reactor



Figuur 32. Temperatuur verloop in radiale richting in de energypad.

De metingen met deze uitvoering van de warmtebatterij zijn ook gebruik voor verificatie van het numerieke rekenmodel aan de hand van de metingen.

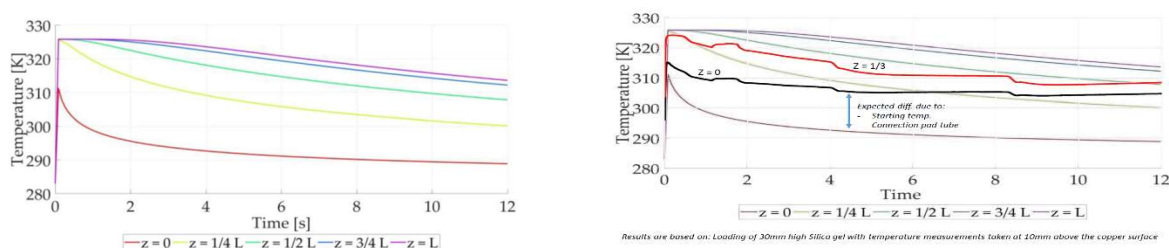
In de twee onderstaande figuren is dit weergegeven. De gemeten temperatuur van de onderzijde energypad is rechts weergegeven en de berekende temperatuur links in figuur 33. De verlopen van deze temperaturen komen goed overeen.



Results are based on: Loading of 30mm high silica gel with temperature measurements taken at 10mm above the copper surface

Figuur 33. Links berekende temperatuur en rechts gemeten temperatuur onderzijde energypad.

In figuur 34 is het verloop van de temperatuur in de silicagel laag in de energypad gegeven. Ook hier is zichtbaar dat de berekende en gemeten resultaten goed overeenkomen



Figuur 34. Links berekende temperatuur en rechts gemeten temperatuur op verschillende hoogtes in het silicagel.

4.4.2 Optimalisatie warmtebatterij

Uit de metingen van de eerste concept warmtebatterij en op grond van de numerieke analyse is geconcludeerd dat de warmtedoorgangscoefficient van TCM bed naar warmtewisselaar de grootste invloed heeft op de prestaties van de warmtebatterij. Literatuuronderzoek heeft aangetoond dat het vergroten van het contactoppervlak van de TCM met de warmtewisselende vin leidt tot een substantiële (factoren) verbetering van de vermogensafgifte. In dit project is de ontwikkeling van de energypad beperkt gebleven tot de zogenaamde koperen bakje als energypad. Om toch op systeem niveau het concept van de warmtebatterij te kunnen beproeven is besloten om met gevinde buis warmtewisselaars verder te experimenteren. Vergroting van de warmtedoorgangscoefficient staat hierbij voorop. Daarom is hier verder gebruik gemaakt van de kennis en ervaring die bij de Beijer RTB is opgedaan met de productontwikkeling van de Solabcool. Omdat in de uiteindelijke warmtebatterij Na_2S als TCM geselecteerd is, is het nodig om de energypad en dus ook de test warmtewisselaar uit te rusten met een coating. Daarom is in samenwerking met een coatingbedrijf een coating geselecteerd die geschikt is voor toepassing in vacuüm onder de werkingscondities van de E-Pad (P: 2 – 80 mbar, T_{reactor} 20 – 95 °C). In totaal zijn er 2 kleine proef wisselaars gecoat en 1 grote warmtewisselaars. Deze fungeren als warmtebatterij met de coating. Hiermee kan in de testen de invloed van de coating op de warmtebatterij geanalyseerd worden.

Ook is de door De Beijer RTB in huis ontwikkelde procedure voor het hechten van het silica-gel aan de warmtewisselaar met coating doormiddel van een polymeer proces is uitgevoerd op de 2 kleine test wisselaars en op 1 grote warmtewisselaar voor de warmtebatterij op product grootte.

De zoektocht binnen het Energypad project is voornamelijk gefocust op het zoeken naar de verhouding tussen dampweerstand en thermische weerstanden. Uit voorgaand onderzoek met de koperen “pads” is er vastgesteld dat dampweerstand een minder grote invloed heeft op de prestaties dan de thermische weerstand. Dit blijkt ook uit de gevoeligheidsanalyse met het COMSOL-rekenmodel. Hierop volgend is er besloten om een warmtewisselaar te coaten en deze coating te gebruiken als hechtmiddel voor silicagel. Hiermee wordt het contactoppervlak tussen het sorptiemateriaal en warmtewisselend oppervlakte aanzienlijk vergroot en daarmee de warmtegeleiding bevorderd.

De hypothese was dan ook dat de prestaties per massa silicagel hierdoor zouden toenemen. De eerste initiële testen hebben plaats gevonden met twee gecoate proef wisselaars met een vin

afstand van 4 mm een dampweglengte van 15 mm en met 1m² aan warmtewisselend oppervlak. De prestaties van dit type wisselaar zijn vergeleken met de prestaties van een standaard buis vin wisselaar met een vin afstand van 1.4 mm, waarin het silica-gel is opgesloten door middel van het "storten" van de silica gel.

De prestaties van de kleine proefwisselaars ten opzichte van de standaard buis-vin wisselaar zijn weergegeven in onderstaande tabel 6.

Tabel 6 Prestaties van de gecoate proefwisselaar ten opzichte van de standaard buis-vin wisselaar

Type wisselaar	verdampingsvermogen ten opzichte van standaard buis-vin wisselaar/ kg silica-gel
Standaard buis-vin wisselaar	1.00
Gecoate proef wisselaar	2.90
2 Gecoate proef wisselaars	2.50

Na de goede resultaten met de kleine warmtewisselaar is opgeschaald naar experimenten met de grote warmtewisselaar ten behoeve van de warmtebatterij.

Deze opschaling heeft plaats gevonden naar een warmtebatterij met de afmetingen zoals deze voor zijn praktische toepassing is voorzien. Deze grote warmtewisselaar is gebaseerd op de commercieel verkrijgbare gevinde buis warmtewisselaars. Binnen de ontwikkeling van de Solabcool bij de Beijer RTB wordt dit het zogenaamde "Monoblock" genoemd.

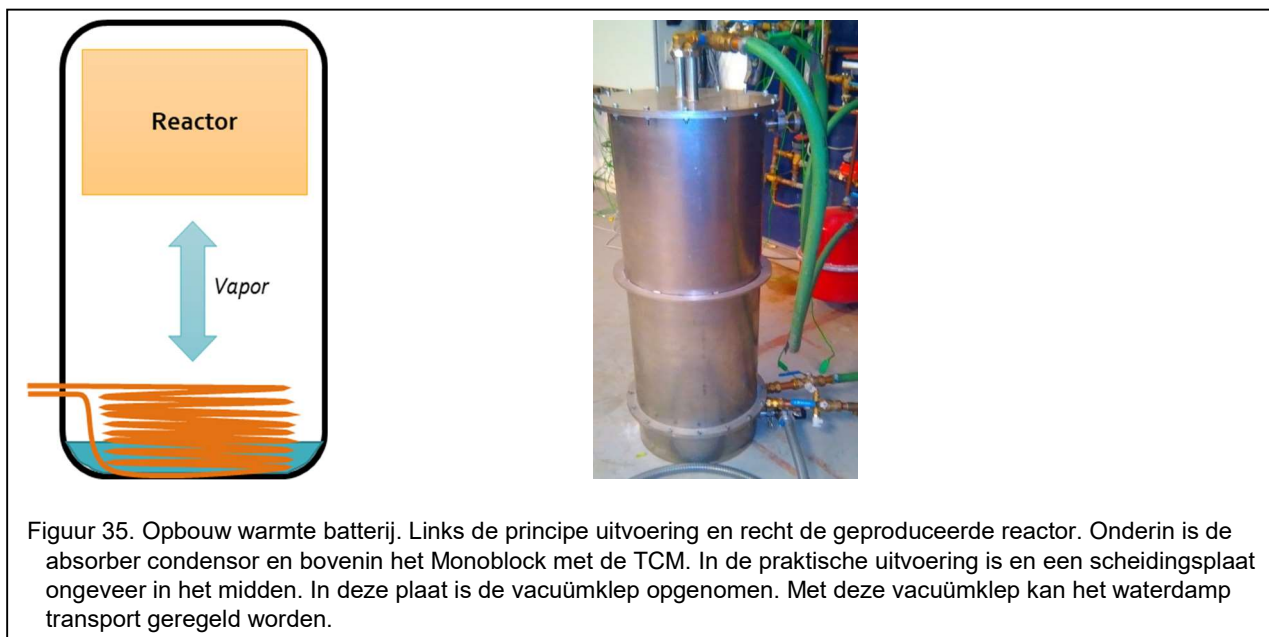
Hierbij is de vin afstand van het Monoblock iteratief vastgesteld en afgestemd op dampdoorgangen en productietechniek

In tabel 7 zijn de eigenschappen van de wisselaars vermeld waarop silicagel gecoat/geplakt is. Hierin is duidelijk te zien dat het Monoblock 14 keer zo groot oppervlak heeft dan de kleine wisselaar waarmee de eerste initiële testen mee uitgevoerd zijn.

Tabel 7. De gegevens van de kleine testwarmtewisselaar en het "Monoblock".

	Kleine wisselaar	Monoblock
Warmte overdragend oppervlak	1m ²	14 m ²
Wisselaar breedte	30 mm	221 mm
Wisselaar lengte	125 mm	192 mm
Wisselaar hoogte	495 mm	532 mm
Vin afstand	4 mm	3 mm
Silicacoating dichtheid	400 gram/m ²	500 gram/m ²

In figuur 35 is de opzet en uitvoering van de warmtebatterij uitgerust met Monoblock weergegeven. Hieraan zijn de metingen verricht om de verbetering van het verdampingsvermogen vast te stellen



Tabel 8. Prestaties van de gecoate warmtebatterij met Monoblock ten opzichte van de standaard buis-vin wisselaar.

Type wisselaar	verdampingsvermogen ten opzichte van standaard buis-vin wisselaar/ kg silica-gel
Standaard buis-vin wisselaar	1.00
Warmtebatterij	1.13

De prestaties per massa silicagel van het Monoblock gecoate warmtewisselaar in de warmtebatterij bleven achter ten opzichte van de kleinere wisselaars. Een verbetering van het verdampingsvermogen per kilogram silica-gel met een factor 2 ten opzichte van de standaard buis-vin wisselaar was verondersteld. Aangenomen wordt dat de prestaties gereduceerd worden door het verkleinen van de vin afstand 3 mm, in plaats van 4 mm

Om vast te stellen of dit een damp- of thermisch probleem was, werd het Monoblock gedeeld in 2 stukken en teruggeplaatst in de module. Hierdoor werd er een extra dampspleet in het midden van het Monoblock toegevoegd.

Hier zijn de metingen aan verricht. De resultaten hiervan staan in tabel 9. Hieruit blijkt dat de weglengte voor de damp grote invloed heeft op het vermogen. Door de halvering van de gemiddelde weglengte van damp wordt nu het verdampingsvermogen met 60% vergroot.

Tabel 9 Prestaties van de gecoate warmtebatterij ten opzichte van de standaard buis-vin wisselaar

Type wisselaar	verdampingsvermogen ten opzichte van standaard buis-vin wisselaar / kg silica-gel
Standaard buis-vin wisselaar	1.00
Halve warmtebatterij	1,6

De analyse van de experimenten leidt tot het inzicht dat de afstand tussen de vinnen en de thermische geleiding een grote invloed hebben op de prestaties van de warmtebatterij.

Relatie met TCM

Binnen dit project zijn er géén testen met K_2CO_3 en Na_2S op systeemniveau uitgevoerd. Uit de testen met Silicagel is gebleken dat de balans tussen massa en energietransport dynamisch en geometrische afhankelijkheid vertoont. Door de geometrie van de wisselaar te veranderen zal de warmte- en massatransport een andere verhouding aannemen. Dit was dan ook duidelijk te zien in de testen met de kleine wisselaar, het Monoblock en de koperen “pads”. Het doel van het Energypad project was dan ook om grip te krijgen op deze fenomenen, een COMSOL model te ontwikkelen en de ideale energypad te ontwikkelen. Doordat er nog geen grip is gekregen op de balans tussen geometrie en materiaaleigenschappen heeft het uitvoeren van testen met K_2CO_3 en Na_2S géén toegevoegde waarde. Deze materialen vertonen duidelijk zwelgedrag wat vervolgens de complexiteit een graad verder brengt. Het rekenmodel zal eerst doorontwikkeld moeten worden om hiermee inzicht te krijgen in de balans tussen geometrie, damptransport, thermisch transport in combinatie met het typerende zwelgedrag van thermo-chemische materialen.

Conclusie testen warmtebatterij

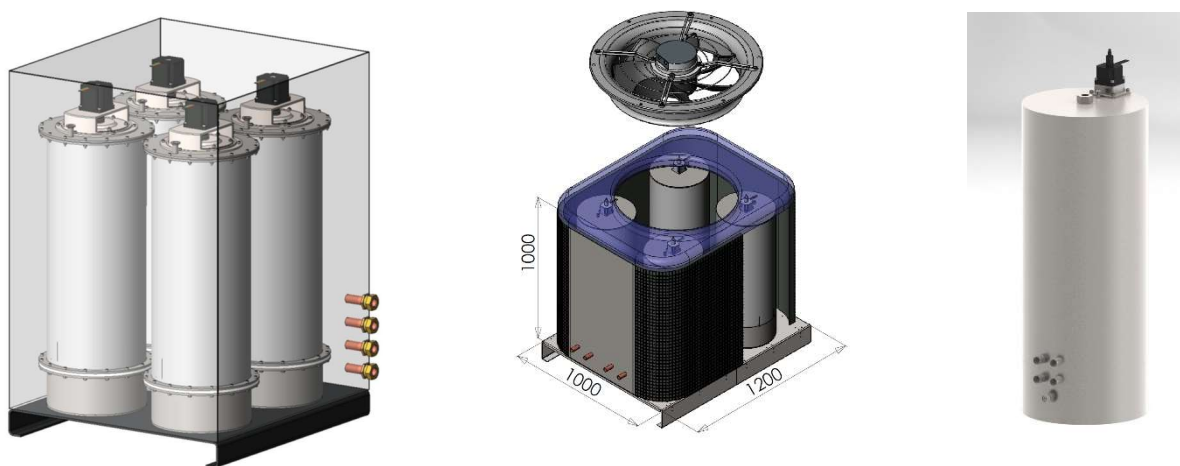
Aan de hand van de meting van de eerste versie van de warmtebatterij, uitgevoerd met koperen pads, en de numerieke analyse is duidelijk naar voren gekomen dat de warmtedoorgangscoefficient van het TCM naar de warmtewisselaar een grote invloed heeft op de prestaties. Deze warmtedoorgangscoefficient wordt bepaald door de warmtegeleiding van de TCM, de warmtegeleiding van de vin en warmteoverdracht van de vin naar de vloeistof in de warmtewisselaar. Het verbeteren van de warmtegeleiding, heeft bij de kleine proefwarmtewisselaars geleid tot een prestatieverbetering van 2.5 tot 2.9 keer ten opzichte van de standaard wisselaar. Bij het opschalen naar de warmtebatterij kwam naar voren dat het damptransport tussen de vinnen een grotere rol speelt dan werd aangenomen. De tweede warmtebatterij gebaseerd op het Monoblock van de Beijer RTB presteert slechts iets beter dan een standaard warmtewisselaar. Concreet slechts 1,13 keer het verdampervermogen per kg silica-gel, ten opzichte van de standaard wisselaar. Het doormidden zagen van de warmtebatterij levert een stuk betere prestatie op dan de complete tweede warmtebatterij met een 1.6 keer het verdampervermogen per kg silica-gel, ten opzichte van de standaard wisselaar. Invloed van het aanbrengen van de coating ter bescherming van Na_2S op de warmtedoorgangscoefficient is niet geconstateerd.

Aanbevolen wordt om de TCM door middel van een coating op de warmtewisselende vin te bevestigen, waarbij een dampkanaal met voldoende hoogte aanwezig is voor het damptransport bij een zo klein mogelijke dampweglengte. Bij het ontwerp van de warmtebatterij zijn het warmtetransport en massatransport in combinatie met de fysieke reactorgeometrie de bepalende factoren voor het functioneren van de warmtebatterij. Deze drie aspecten kennen een sterke onderlinge relatie. Het wordt aanbevolen om met het Comsol rekenmodel hiervoor een gevoeligheidsanalyse uit te voeren en dit met metingen te verifiëren.

4.5 Kostprijs analyse energypads

Om een businessplan op te stellen voor de energypads en uit te werken is het nodig om het toepassingsgebied vast te stellen. De voorziene toepassing van de energypads is in eerste instantie de warmtebatterij.

In het businessplan is uitgegaan van een warmtebatterij gebaseerd op energypads en -stacks. De afmeting van het systeem zal circa 1*1*1 m zijn. De totale warmtecapaciteit bedraagt dan 50kWh en het maximale vermogen is 5kW. Het systeem is opgebouwd uit 4 reactormodules (zie figuur 36).



Figuur 36. Warmtebatterij bestaande uit 4 modules.

Om voldoende energie opslagcapaciteit te verkrijgen wordt in de analyse gebruik gemaakt van natriumsulfide.

In het onderzoek naar de ontwikkeling van de energypads zijn in dit rapport de diverse concepten van de energypad en energy stack behandeld. Uitwerking van een concept heeft plaats gevonden in het ingediende TK Urban Energy voorstel energypad 2.0 van 11 september 2018.

In dit project is een eerste concept productieproces uitgewerkt en een kostprijs analyse gemaakt. In vertrouwelijke deliverables is dit gerapporteerd. Het initiële businessplan voor een warmtebatterij opgebouwd uit energypads en stacks is als vertrouwelijk document uitgewerkt.

Het businessplan voor de energypads is een onderdeel van het businessplan voor de warmtebatterij. Dit zal in het SWEKOS project verder worden uitgewerkt en gerapporteerd worden. Hier wordt de analyse beperkt tot het productieproces en de kostprijs voor de energypad. Het business canvas voor de warmtebatterij wordt, ter informatie, gegeven.

Hier wordt een samenvatting gepresenteerd van de uitkomsten.

4.5.1 Kostprijs warmte batterij met energy pads en energy stacks

Hier wordt de mogelijke kostprijs van de energypads gevuld met natriumsulfide geanalyseerd, op basis van een eerste concept van de energypads en stacks. De werkzame TCM is hier natriumsulfide. Uitgaande van natriumsulfide als werkzame TCM met een opslag capaciteit van 2,4 GJ per m³ is voor een thermische energieopslag van 50kWh dus 0,075 m³ (75 liter) natriumsulfide nodig. De reactormodule is opgebouwd uit een absorber/condensor in onderzijde van de unit en de energypads en stack zijn daarboven geplaatst. Tussen de energystack en de absorber/condensor is een afscheiding met vacuüm klep. Deze vacuüm klep regelt de opname of afgifte van energy aan de warmtewisselaar. De energypads/stack zijn verbonden met de warmtewisselaar. Een energypad heeft een diameter die iets kleiner is dan de diameter van de reactormodule. Dit om de weerstand voor het damptransport klein te houden. Dat betekent concreet dat er in een reactormodule, 1 energystack met ongeveer 20-30 energypads geplaatst wordt. De voorziene productie bestaat uit inkoop van de halffabricaten zoals onder andere de TCM en de carbon pad en/of vezels.

In het productieproces worden de pads gevuld met het TCM en tot een energy stack gestapeld. Verbinding van de energystack aan de warmtewisselaar vindt geautomatiseerd plaats, zodat het productieproces buizen met daaraan gemonteerd de energypads en -stacks op levert. Met de toepassing van energypads in plaats van een standaard gecoate warmtewisselaar met schalen wordt er 25% op de productiekosten bespaard. Deze besparing is gebaseerd op vermindering van de materiaalkosten, modulaire productie, automatisering en betere verwerking.

Van de overall kostprijs van een warmtebatterij beslaat de thermische eenheid (dat zijn fin & tube warmtewisselaars, met daartussen de TCM) circa 30% van de productie kosten (uren en materialen). Deze kostprijs wordt door toepassing van de energypads en stacks met 25%-30% verlaagd. Kortom de systeemprijs gaat met ongeveer 10% omlaag.

Om dit te bereiken zijn investeringen nodig in productie. De schatting voor investeringen in de eerste productie unit tot circa 5000 warmtebatterijen per jaar bedraagt 300.000 euro

Deze investeringen worden in 5 jaar afgeschreven.

Gebaseerd op de prognose van de aantallen van de warmtebatterij dat verkocht wordt kan het aantal stacks en energypads worden afgeleid. Dat is in onderstaande tabel gegeven.

Tabel 10. Prognose aantal energy pads en stacks.

Prognose aantal warmtebatterijen, stacks en pads	2020	2021	2022	2023	2024
Aantal warmtebatterijen	5	35	150	400	1500
Aantal Energy-stacks	20	140	600	1600	6000
Aantal Energy-pads	500	3500	15000	40000	150000

De productie wordt verregaand geautomatiseerd. Daarnaast zal er continue gewerkt worden aan verbetering van de kwaliteit, handling, productie en producteigenschappen. Sommatie van deze kosten leidt tot de kostprijs van de productie van de stacks. Vanaf 2023 wordt een kostprijsdaling van de energystacks voorzien ten gevolge van grootschalige inkoop, ervaring met de productie, optimalisatie productieproces en volume. De analyse in de business case van de energypads en stacks is beperkt tot de eerste 5 jaar van de productie.

Van de warmtebatterij gebaseerd op energypads en energystacks, gevuld met natriumsulfide is in het businessplan de kostprijs bepaald. Deze warmtebatterij heeft een capaciteit van 50kWh.

Tabel 11. Kostprijs warmtebatterij bij opschaling.

Aantal	50	500	1500	5000
Kostprijs	€8500	€8000	€7500	€7000

Een warmtebatterij gebaseerd op TCM zal naar verwachting een belangrijk kostenvoordeel hebben ten opzichte van de elektrische energie-opslag; namelijk een geschatte verkoopprijs van circa 200 euro per kWh versus 400 euro per kWh voor elektrische opslag.

Tenslotte is in figuur 37 het business canvas van de warmtebatterij gepresenteerd.

Business Canvas Warmte batterij gebaseerd op Energy Pads en energy-stacks

Key partners Production • Flamco Market partners • Selected Installers • Energy distribution companies • Financial Partner • RTB de Beijer Potential Financial partners • Other investors	Key activities • Product development • Production development implementation • Business development • Key resources • Secret Knowhow on TCM and systems • Network • Know how on market characteristics	Value propositions • Delivering heat and cold from renewable sources • Cheap energy supply for consumers • Improvement business case district heating • Potential of grid balancing thus lowering electricity costs	Customer relationships • District heating companies • Energy distribution companies Channels • Sales through channels of selected partners in the installation sector • New channels as energy management system suppliers • Through the district network organizations and Energy distribution companies	Customer segments • Energy Distribution Companies • District heating companies • OEM installations • End users- consumers
Cost structure • Development manufacturing plant (1Meur) • Business development and sales organization • Product development : 100.000 euro • Office and infrastructure	Revenue streams • Cost savings on energy and comfort improvement • Renting through Energy distribution companies and district heating companies • 2020: 5 systems, 2025: 4000 system (ROI per system 250 euro or RTB) •			

Figuur 37. Het zogenaamde business canvas voor de warmtebatterij.

Conclusies Kostprijs Analyse energypads

Het concept van energypads en -stacks kan leiden tot een aanzienlijke kostprijs daling van 10% van een warmtebatterij. Alhoewel dit project niet heeft geleid tot concrete te produceren energypads is de filosofie hiervan veel belovend. Ideeën voor een effectieve energypad en -stack zijn ontwikkeld. Het produceren van een warmtebatterij gebaseerd op energypads met een 50kWh capaciteit en een vermogen van 5 kW bij een afmeting van ca 1m3, geeft een prijsindicatie van lager dan 200 euro per kWh opslagcapaciteit. Dit is een factor 2 lager dan bijvoorbeeld de teslawall.

5 Conclusies en Aanbevelingen

5.1 Conclusies

Het energypad project heeft geleid tot inzicht op welke wijze een warmtebatterij kan worden gemaakt en geproduceerd. De warmtebatterij wordt uitgerust met een thermo-chemisch materiaal met een grote warmte opslag capaciteit. In deze studie zijn de gewenste eigenschappen van de warmtebatterij de volgende: een energie inhoud van circa 50kWh, een maximaal vermogen van 5kW, en een volume van circa 1 m³. De TCM die hiervoor het best in aanmerking komt is Na₂S. De TCM Na₂S is echter lastig te verwerken, zwelt door de absorptie van het medium en heeft in zijn toepassing corrosieve eigenschappen. Ook heeft Na₂S een lage warmtegeleiding (kenmerkend voor alle TCM's). Een energypad lost een aantal knelpunten op. Door de pad structuur is modulaire verwerking mogelijk en kan het materiaal "werken". In de uitvoering van de energypad wordt gekozen voor een inert en goed geleidend materiaal. Grafiet vezels zijn hier uitermate goed geschikt voor. De ontwikkeling van een energypad heeft tot het inzicht geleid dat er een pad structuur nodig is die in driedimensie de warmte goed geleid. Een energypad opgebouwd uit een grafiet doek voldoen hier niet aan. Ook is het niet mogelijk gebleken om een TCM in een expanded grafiet structuur in te brengen. Wel is het mogelijk gebleken om expanded grafiet door een TCM te mengen en zodoende een vergroting van de warmtegeleiding te verkrijgen.

Als onderdeel van het onderzoek is een numeriek rekenmodel van een energypad en energystack in de COMSOL omgeving ontwikkeld. Dit model is een finite elements model gebaseerd op de van toepassing zijnde fysische vergelijkingen. Dit model is getoetst aan de hand van eerste metingen aan een eenvoudige energypad. Deze verificatie heeft aangetoond dat de rekenresultaten van het model goed overeenkomen met de meetresultaten. Vervolgens is een gevoeligheid analyse uitgevoerd. De resultaten hiervan geven aan dat een hoge warmtedoorgangscoefficient belangrijk is voor de werking van de warmtebatterij. Het damptransport tijdens het absorptie proces heeft een minder bepalend invloed dan gedacht. Blijkbaar is de weerstand in een energie pad voor het damptransport klein. Het stapelen van energypads tot stack in een reactor is goed mogelijk. De hoogte van de reactor heeft weinig invloed op het functioneren van de energypad.

Vervolgens is een lab model van de warmtebatterij gerealiseerd gebaseerd op silicagel en met de koperen bakjes als energypad. Hieraan zijn metingen verricht. Deze metingen zijn gebruikt voor de verificatie van het rekenmodel. Vervolgens is gewerkt aan het optimaliseren van de warmtebatterij. Omdat de geschikte energypad nog niet gerealiseerd is, is tijdens de experimenten teruggevallen op de kennis bij de Beijer RTB inzake de warmtewisselaars van de Solabcool. Deze gevinde buis warmtewisselaars zijn voorzien van een coating die de corrosie van Na₂S kan weerstaan. Vervolgens is op de gecoate warmtewisselaar silicagel aangebracht door hechting via een polymeer. De conclusie van deze aanpak is dat in deze opzet de afstand tussen de vinnen en de diepte van de vinnen een belangrijke rol speelt bij de afgifte van energie. Hiermee is een eerste lab model warmtebatterij op basis van silicagel getest.

Naast het technisch inhoudelijk gedeelte van dit project is ook gekeken naar de kostprijs en een businessmodel. Hiervoor is het ook belangrijk dat er freedom to operate bestaat ten aanzien van de productie. In een patent search zijn geen blokkerende zaken gevonden. In de samenwerkingsovereenkomst is vastgelegd dat De Beijer RTB de rechten tot productie heeft. Er is kennis en ervaring opgedaan met het energypads concept binnen dit project. Dit is bestempeld als vertrouwelijk en is dan ook geheime kennis.

De inzet van de energypads kan tot een kostprijs daling leiden van circa 10% van een warmtebatterij. Daarnaast kan door het vervaardigen van energypads naar een toegesneden product worden gewerkt. Immers de energypads maken modulair opgebouwde warmtebatterij mogelijk. Dus er kunnen er diverse vermogen en capaciteiten geleverd worden. In het businessplan van de energypads is uitgegaan van levering van de energypads aan de warmtebatterij. Prognose van het aantal systemen van de warmtebatterij in de markt en de kostprijs hiervan is in de analyse meegenomen.

In het businessplan wordt een prijs van circa 200 euro per kWh voor de warmtebatterij gebaseerd op energypads als realistische en haalbaar aangegeven. Dat is circa 50% lager als de nu beschikbare elektrische energie opslag.

5.2 Aanbevelingen

Het concept van de energypads is veelbelovend voor de ontwikkeling van een modulaire warmtebatterij gebaseerd op thermo-chemische materiaal.

Aan de ontwikkeling van geschikte thermo-chemische materialen wordt verder gewerkt en wel met name in het fundamentele onderzoek aan de universiteiten. Hier moet zeker mee worden doorgegaan. Dit omdat compacte thermische energie opslag voor inzet in de gebouwde omgeving belangrijk is voor de energie transitie.

De verdere ontwikkeling van energypads dient opgepakt te worden. Driedimensionale goed warmtegeleidende structuren kunnen op basis van bijvoorbeeld grafiet worden ontwikkeld. In een vervolg voorstel Energy pads 2.0 is deze aanbeveling opgepakt.

Er is een eerste numeriek rekenmodel in COMSOL ontwikkeld. Het verdient aanbeveling dit model te valideren voor energypads en verschillende thermo-chemische werkstoffen. Vervolgens kan dit model worden ingezet om gevoeligheid analyses uit te voeren. Op basis van dit model kan een gesimplificeerd ontwerp hulpmiddel gemaakt worden.

Omdat er veel aandacht wordt besteed aan de zoektocht naar een perfecte thermo-chemische materiaal blijft de complete systeem ontwikkeling achter. In het gehonoreerde projectvoorstel SWeKOS wordt dit geadresseerd. Deze ontwikkeling is van belang omdat:

- Ontwikkeling deelcomponenten voor het systeem: absorber/condensor, warmtewisselaar, regeling sturing en elektronica plaats moet vinden;
- Ervaring met inpassing in de bestaande energie systemen moet worden opgedaan;
- Lange termijn werking van het systeem bekend moet worden;
- Efficiëntie op systeem niveau onderzocht moet worden;
- Businessplan met onderbouwing kostprijs, eindgebruikers wensen, markt, investering en productie nodig is

Tevens wordt het aanbevolen om gericht onderzoek te doen naar productiemethoden en faciliteiten waarmee thermo-chemische energiesystemen kosteneffectief, duurzaam en betrouwbaar gemaakt kunnen worden.

6 Literatuur

Literatuur

- [1] Thermochemical Energy Storage as Marketable Product, The energypad, Master thesis, L.P.M. Rijvers, June 2017. TU Eindhoven
- [2] Kinetic investigation of K₂CO₃ using thermal analysis techniques and modelling of the energypad, Master Thesis Shaik Shahanawas Ahamed, Jan 2018, TU Eindhoven
- [3] Characterization of potassium carbon salt hydrate for thermochemical energy storage in building, to be published in Energy and Buildings Journal 2018, M. Gaeini S.A. Shaik and C.C.M Rindt, TU Eindhoven
- [4] Excel model Multi Criteria Analyse TCM
- [5] COMSOL model energypads bij de TU/e in ontwikkeling
- [6] De Solabcool, zie www.solabcool.nl
- [7] SWEAT vaste stof warmtepomp: www.ares-rtb.nl/nl/referenties/sweat of www.SWEATBV.nl
- [8] More Effective use of Renewables Including compact seasonal Thermal energy Storage, FP7 project, www.merits.eu