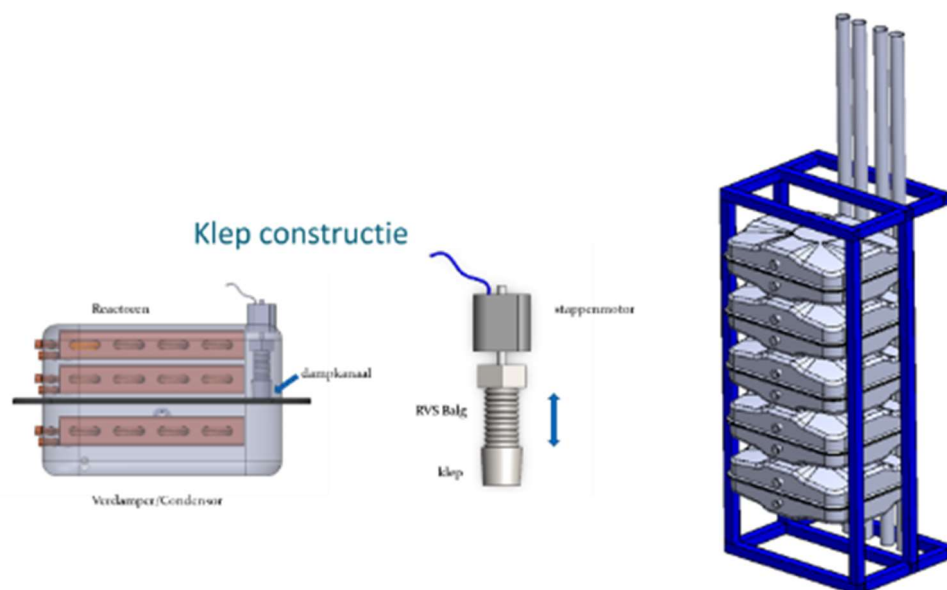




Openbaar Eindrapport SWeKOS

(Sorptie Warmte en Koude Opslag Systeem)



AUTEURS:

AART DE GEUS
HENK DE BEIJER,
JAN CNOSSEN
CAMILO RINDT,
ELIAS Vlieg
ARIE KALKMAN, RUUD CUYPERS

ARTENERGY BV, TE DELFT
DE BEIJER RTB BV, TE DUIVEN
FLAMCO BV
TU EINDHOVEN
Radboud Universiteit Nijmegen
TNO. TE DELFT

DATUM: APRIL 2021

Nadere informatie is te verkrijgen bij: A.C de Geus, aart.degeus@artenergy.nl.

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, onder projectnummer TEUE 117062.



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 voor 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, toegesneden industrieel en schaalbaar productieproces, lange levensduur en reductie van de totale systeemkosten. In het TKI project Energypads (TEID 215048) [1] is aangetoond dat energypads en energystacks inderdaad tot kostprijs daling en eenvoudiger productie van de (modulaire) warmtebatterij gaan leiden. Het project heeft ook tot het inzicht geleid dat voor een goede energypad een dampopen 3D structuur met grote warmtegeleiding noodzakelijk is, waarin de geschikte TCM wordt ingebracht. In het Energypads 2.0 project [2] is verder gewerkt aan de ontwikkeling van geschikte energypads. De resultaten zijn in 2020 ingebracht in het SWeKOS project. Op basis van deze resultaten is een nieuwe modulaire opbouw van een SWeKOS systeem tot stand gekomen en beproefd.

Doel van het project

Het SWeKOS project heeft tot doel om een volwaardig sorptie warmte en koude en opslagsysteem met silicagel als werkzame stof als volwaardig product te maken en te testen. Ook wordt er gezocht naar een nieuw en geschikt thermochemisch materiaal, beproefd in een test reactor module. De uiteindelijke hoofddoelstelling van het project is concreet uitzicht te hebben op de realisatie van een markt conform en industrieel te produceren compact warmte- en koude-opslagsysteem gebaseerd op een thermo chemisch materiaal. Het door de TU Eindhoven in ontwikkeling zijnde rekenmodel van een TCM opslag systeem wordt doorontwikkeld naar een systeem model geverifieerd aan de hand van de resultaten van dit project.

Korte omschrijving van de activiteiten

Om te komen tot een warmte- en koude- opslagsysteem wordt allereerst een reactor module op 100% schaal met als werkzame stof silicagel ontworpen, gebouwd en getest.

Op basis van deze reactor module wordt het complete systeem samengesteld, inclusief regel en sturing, aansluiting op de installatie en dergelijke. Dit complete systeem wordt getest. Een gedetailleerd rekenmodel (COMSOL) van de reactor module wordt geverifieerd en uitgebreid naar een thermochemisch materiaal. Op basis van de testresultaten, de input vanuit het Energypads 2 project en de kennis en ervaring uit de industrie wordt een herontwerp gemaakt van de module (Sorptie Energie Module) waaruit SWeKOS wordt opgebouwd.

De productiewijze, industrialisatie en opschaling wordt onderzocht. Vanuit de kennis van Solid State Chemistry wordt gewerkt aan toegesneden TCM's met eigenschappen zoals vastgesteld in het programma van eisen. Beperkte hoeveelheden van deze ontworpen TCM's worden beproefd. In een reactor module wordt de gekozen TCM ingebracht en beproefd.

Resultaat

Het project heeft geresulteerd in het ontwerp, bouw en testen van een Sorptie Energie Module (SEM). In figuur 1 is een schematische weergave gepresenteerd. De modulaire opbouw is de stapeling en koppeling van sorptie energie modules tot SWeKOS. Er is uiteindelijk gekozen voor een vin-buis warmtewisselaar die gecoat wordt en gevuld wordt met de geselecteerde TCM. De testresultaten hebben laten zien dat de SEM voldoet aan de energie specificaties maar dat versterking nodig is om aan het vacuüm te kunnen voldoen. Het concept productie en investeringsplan is opgesteld en is onderdeel van het businessplan. Het numeriek model van de TU/e heeft geleid tot inzicht in het damp- en warmtetransport in de SEM. De emulator van TNO is zodanig aangepast dat een volwaardig SWeKOS systeem nu onder actuele en dynamische condities van een gebouw getest kan worden. TCM's op basis van alcoholen of ammonia zijn nog niet geschikt voor toepassing in de SEM. Daarom is teruggevallen op Na_2S . In het vervolg project SWeKOS 2 wordt een modulair systeem gebaseerd op de SEM gevuld met TCM gebouwd in de emulator getest. Op basis hiervan wordt het finale ontwerp, productie en businessplan opgesteld.



Figuur 1 Sorptie Energie Module



Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
1. Inleiding	8
2. Doelstelling van het SWeKOS project.....	9
3. Project aanpak en Werkwijze	10
3.1 Projectplan	10
3.2 Aanpak.....	10
3.3 Aansluiting op TKI Energypads 2.0 project.....	11
4. Resultaten.....	12
4.1 Freedom to Operate & IPR strategy	12
4.2 Ontwerp, bouw en test reactor op volle schaal	13
4.2.1 Inleiding	13
4.2.2 Ontwerp test reactor	14
4.2.2.1 Packed bed configuraties	14
4.2.2.2 Lijmen van Silicagel.....	15
4.2.2.3 Silicagel Dipcoating.....	16
4.2.2.4 Overzicht van de resultaten.....	17
4.2.3 Constructie test reactor.....	18
4.2.3.1 Interne vacuümklepconstructie.....	18
4.2.3.2 Verdamer & condensor	18
4.2.3.3 Vacuümdichtheid.....	19
4.2.3.4 Buitenisolatie	19
4.2.4 Meetresultaten test reactor	20
4.2.4.1 Stilstandsverliezen.....	21
4.2.4.2 De soortelijke warmte	21
4.2.4.3 Sorptiesnelheden.....	22
4.2.4.4 Tweetraps hoge temperatuur principe	23
4.3 Doorontwikkeling COMSOL numeriek model TCM energie opslag.....	26
4.3.1 Inleiding	26
4.3.2 Korte achtergrond fysica model	26
4.3.3 Model validatie van silica gel.....	27
4.3.4 Resultaten en analyse.....	29
4.3.4.1 Energypad met Silicagel als werkzame stof.....	29



4.3.4.2	Energypad met een thermo chemisch materiaal als werkzame stof	30
4.3.4.4	Rekenresultaten SWeKOS met meerdere energypads.....	32
4.3.4.4	Gevoeligheid analyse Energypad.....	34
4.4	Ontwerp, bouw en test marktconform concept SWeKOS.....	39
4.4.1.	Ontwerp van het complete concept systeem	39
4.4.2	Realisatie complete SWeKOS systeem	40
4.4.3	Regel- en opslagstrategieën	41
4.4.4	Deeltesten complete systeem.....	43
4.4.5	Testen complete systeem.....	43
4.5	Emulator en systeem studie	47
4.5.1	Simulatie en sturingsprogramma Emulator	47
4.5.2	Systeemstudie toepassing SWeKOS	48
4.6	Resultaten Onderzoek naar thermo chemisch materiaal	50
4.6.1	Inleiding	50
4.6.2	Sneltoets.....	50
4.5.3	Kristalgroei en Structuurbepaling.....	51
4.6.4	Thermische analyse	52
4.7	Resultaten Onderzoek naar bekende thermo chemisch materialen	54
4.7.1	Inleiding	55
4.7.2	Cycleer experimenten	55
4.7.3	Effectieve warmtegeleiding metingen	56
4.8	Redesign SWeKOS en concept productieplan	59
4.8.1	Inleiding	59
4.8.2	Programma van eisen.....	59
4.8.3	Nieuw ontwerp SWeKOS: de energiebatterij.....	61
4.8.4	Uitwerking Productieproces.....	63
4.8.5	Kostprijs	63
4.9	Testen Sorptie Energie Module	65
4.9.1	Inleiding	65
4.9.2	Druk test vacuüm behuizing	66
4.9.3	De functionele test	66
5.9.4	Blauwdruk sorptie energie module.....	68
4.10	Businessplan en analyse.....	71
4.10.1	Inleiding	71
4.10.2	Marktontwikkeling	71



4.10.3 Productieproces: investeringen en kosten.....	72
4.10.4 Omzet, winst en verlies rekening	72
5 Conclusies en Aanbevelingen	75
5.1 Conclusies.....	75
5.2 Aanbevelingen.....	76
6 Vervolg.....	76
Literatuur.....	77
Bijlage 1. Openbaar projectplan SWeKOS.....	78



Figuur 1 Sorptie Energie Module.....	2
Figuur 2 Projectplanning van het SWeKOS project	11
Figuur 3 Schematische weergave van de opslagmodule.....	13
Figuur 4 Verschillende Packed bed configuratie met (links) 3 losse reactoren, (midden) Monoblock ongevuld, (rechts) gevulde & geïnstalleerde Monoblock	15
Figuur 5 Lijmen van silicagel op een buis-vin wisselaar	16
Figuur 6 Dipcoaten van wisselaar zonder (links) en mét grafiet (rechts) voor het toevoegen van extra warmtegeleiding.....	17
Figuur 7 De SWeKOS module	18
Figuur 8 SWeKOS module - condensor & verdamper	19
Figuur 9 De gegevens van de gebouwde testreactor en een foto ervan.	20
Figuur 10 Sorptiesnelheid bij verschillende temperatuurstappen.....	22
Figuur 11 Temperatuurrespons 2-traps hoge temperatuur levering.....	24
Figuur 12 Vermogensrespons 2-traps hoge temperatuur levering.....	24
Figuur 13 Modelering Energypad	26
Figuur 14 Vergelijking meet en rekenresultaten.....	27
Figuur 15 Thermokoppels in de energypad.....	27
Figuur 16 Model verificatie aan de hand van de experimentele resultaten van Wu et al.....	28
Figuur 17 (a) De temperatuur verdeling [°C] of Epad op verschillende tijden, (b) snelheidsveld in de Epad op verschillende tijden (2D as- symmetrisch)	29
Figuur 18 Temperatuurvariatie in de tijd ter plaatse van de sondes in het zouthydraatbed.	30
Figuur 19 Reactievoortgang (α) met de tijd op de locatie van de sondes in het zouthydraat bed.....	31
Figuur 20 Uitgangsvermogen van warmteoverdrachtsvloeistof met de tijd voor één Epad zouthydraat	31
Figuur 21 Temperatuurvariatie in de meerdere Epad op verschillende tijdstippen.....	32
Figuur 22 De temperatuurvariatie op verschillende probepunten in de tijd.....	32
Figuur 23 Waterdampconcentratie in de meervoudige Epad op verschillende tijdstippen	33
Figuur 24 HTF-uitgangsvermogen voor meerdere Epads in de tijd.....	33
Figuur 25 Het vermogen van HTF voor drie verschillende bed diktes in de tijd	34
Figuur 26 Het vermogen van HTF voor drie verschillende bed diameters in de tijd.....	35
Figuur 27 Het uitgangsvermogen van HTF voor drie verschillende afstanden tussen Epad.....	36
Figuur 28 Het uitgangsvermogen van HTF voor drie verschillende thermische geleidbaarheid van silicagel.	37
Figuur 29 De variatie van energie en piekvermogen met een silicagel laag	38
Figuur 30 Boven aanzicht van het SWeKOS systeem met vier modules	40
Figuur 31 Aanzicht van het complete SWeKOS systeem.....	40
Figuur 32 Realisatie complete systeem.....	41
Figuur 33 Overzicht praktijksituaties waarin SWeKOS actief zal zijn.	44
Figuur 34 SWeKOS systeem in testopstelling bij de Beijer RTB	44
Figuur 35 Temperatuurstap hoge temperatuur tapwater bij ontladen van twee modules (°C) als functie van de tijd [sec].	45
Figuur 36 Flexibele testopstelling.....	47
Figuur 37 TNO lab met actuatoren en klimaatkamer.....	47
Figuur 38 Gemeten en berekende temperatuur in klimaatkamer.....	47
Figuur 39 Markt voor Energie opslag systemen.....	48
Figuur 40 Woningen typologie voor SWeKOS.....	48
Figuur 41 Technologie positie SWeKOS.....	49



Figuur 42 Structuur van $\text{CoBr}_2 \bullet 6 \text{ methanol}$, gezien langs verschillende assen. Paars: Co, bruin: Br, rood: O, grijs: C, wit: H	51
Figuur 43 DSC curves van drie $\text{CaBr}_2 \times 6 \text{ methanol}$ monsters, gemeten onder stikstof en met $1^\circ\text{C}/\text{min}$ temperatuur stijging.....	52
Figuur 44 Genormaliseerd gewicht en berekende solvatatie voor drie $\text{CaBr}_2 \bullet 6 \text{ methanol}$ monsters. De desolvatie gebeurt duidelijk in meerdere stappen, wat op het bestaan van andere solvaten met minder alcohol wijst.	53
Figuur 45 Overzicht van alle cycli.	54
Figuur 46 Overzicht van alle desolvatie stappen van de cycli.	54
Figuur 47 Honeycomb energypad met aan de onderzijde gaas.....	55
Figuur 48 Gecoate honeycomb gevuld met Na_2S	55
Figuur 49 Cycleren van K_2CO_3 , temperatuur en damspanning in de tijd.	56
Figuur 50 Meetresultaten voor de honeycomb energypad gevuld met K_2CO_3	57
Figuur 51 Opbouw van de modulaire energie batterij.....	61
Figuur 52 De module: energie batterij.	62
Figuur 53 Modulaire opbouw van een SWeKOS met energie batterijen geplaatst in een rek	62
Figuur 54 Opbouw module.....	63
Figuur 55 De opbouw van de SEM module. De rechthoekige onder en bovenkanten de tussenplaat met doorvoer.	65
Figuur 56 De complete SEM	65
Figuur 57 Energie capaciteit van de SEM bij een aantal cycli	66
Figuur 58: Vermogen reactor bij verschillende temperaturen.	67
Figuur 59: Verdampervermogen bij een hydratatie temperatuur van respectievelijk 30, 40 en 50°C ...	68
Figuur 60 Bijgesteld ontwerp SEM module.....	69
Figuur 61 Uitvoering nieuwe SEM module.....	69
Figuur 62 Break even analyse SWeKOS.....	73
Figuur 63 Overzicht SWeKOS bv 2023-2027.....	73
 Tabel 1 Uitgangspunten SWeKOS 1e generatie en 2e generatie	13
Tabel 2 Stilstandsverliezen van de reactor en C/V tijdens laden	21
Tabel 3 Soortelijke systeemwarmte van reactor en C/V.....	21
Tabel 4 Twee traps hoge temperatuur meetcondities.....	23
Tabel 5 Deelresultaten 2-trap hoge temperatuur levering	23
Tabel 6: Energiedichtheden van verschillende materialen.	52



1. Inleiding

In de warmtevisie (2020) van het kabinet wordt aangegeven dat de beschikbare duurzame bronnen beter benut moeten worden. Voor de realisatie van energie-neutrale gebouwen is de inzet van duurzame energiebronnen in combinatie met energie-opslag noodzakelijk. Energie-opslag maakt het mogelijk om met een grillig duurzaam energie aanbod de variabele energievraag te kunnen voldoen. Om energie neutraal te kunnen bouwen en renoveren, is het noodzakelijk om compact, verliesvrij en veilig warmte en koude te kunnen opslaan. Een compact warmte/koude opslagsysteem dat een goede prestaties in de vorm van opslagcapaciteit, vermogen en efficiency koppelt aan kosten effectiviteit en schaalbaarheid. Een oplossingsrichting waaraan door veel partijen wordt gewerkt is het inzetten van thermochemische opslag materialen. Een thermische energie-opslagsysteem wordt dan veel compacter dan opslag in de bodem of in een boiler en warmte kan gedurende langere tijd vrijwel verliesvrij opgeslagen worden. Binnen Europa is Nederland een van de forerunners op dit gebied. De consortiumpartners zijn bij de een groot deel van de lopende onderzoeksprojecten op dit gebied aangesloten. In de roadmap van Compacte Conversie en Opslag van de TKI wordt deze ontwikkelingsrichting aangegeven en aan gewerkt. (www.projectcco.org). Zoals beschreven in deze roadmap is het noodzakelijk om tot een warmtebatterij te komen. Nieuwe inzichten leiden ertoe dat de thermochemische opslag uitgebreid moet worden met de optie koelen en dat de optie seizoensopslag wordt vervangen door een opslag periode van enkele dagen tot weken. In het TKI project Energypads (TEID 215048) [1] is aangetoond dat energypads en energystacks inderdaad tot kostprijs daling en eenvoudiger productie van de (modulaire) warmtebatterij gaan leiden. Het project heeft ook tot het inzicht geleid dat voor een goede energypad een dampopen 3D structuur met grote warmtegeleiding noodzakelijk is, waarin de geschikte TCM wordt ingebracht. Dit project heeft geen bruikbare energypad/energy stack opgeleverd. Er zijn echter wel duidelijk mogelijkheden hiertoe gesignaleerd. Deze zijn in het Energypads 2.0 project [2] verder onderzocht. De resultaten van dit project zijn 1-2-2021 gerapporteerd [2]. De uitkomsten van dit project zijn in 2020 ingebracht in het SWeKOS project. In q3 van 2020 is op basis van deze resultaten een nieuwe modulaire opbouw van een SWeKOS systeem opgezet en wordt in het SWeKOS project beproefd. De zoektocht naar een ultiem geschikte TCM wordt in het SWeKOS vervolgd door onderzoek aan de Radboud Universiteit in Nijmegen. De TCM Na_2S blijft een TCM met voor een belangrijk deel de gewenste eigenschappen. Restgassen (H_2S), verwerking en corrosie zijn de belangrijkste aandachtspunten voor toepassing van Na_2S . Het Energypads 2.0 project heeft de energie opslag systemen, gebaseerd op Na_2S , die in het MERITS project (EU MERITS project , 2014-2018) zijn gebouwd en gebruikt geanalyseerd. Uit deze analyse is gebleken dat de zogenaamde KTL coating een goede coating is om corrosie ten gevolge van Na_2S te voorkomen. Ook is vastgesteld dat de stabiliteit van Na_2S na verloop van jaren goed was en de productie van restgassen laag bleek te zijn. .Om de toepasbaarheid van een sorptie warmte en koude opslagsysteem vast te stellen is een systeem op volledige schaal met regeling en sturing nodig. In het SWeKOS project wordt dit verder ontwikkeld en onderzocht met silicagel als eerste werkzame stof om de stap naar een marktconform systeem mogelijk te maken. Onderzoek naar andere toepasbare TCM's vindt parallel plaats zodat aan het einde van het SWeKOS project in een vervolgproject de stap kan worden gezet naar een energie opslag systeem gebaseerd op een werkzame TCM met de gewenste prestaties, afmetingen en kostprijs.



2. Doelstelling van het SWeKOS project

Zoals in de inleiding is aangegeven zijn energypads [1] een beloftevolle oplossing om modulaire energieopslagsystemen gebaseerd op een TCM te produceren. Voor het realiseren van een compacte warmte en koude opslag systeem zijn er momenteel een aantal thermochemische materialen (TCM) bekend en in ontwikkeling. Daarnaast moet ook echter de technologie, maakbaarheid en industriële productie van een compleet opslagsysteem verder ontwikkeld worden. Aspecten zoals een effectieve absorber en condensor, warmtewisselaar, regeling, kleppen in vacuüm, afmetingen en produceerbaarheid zijn van groot belang voor de technologie van het systeem.

Het doel van het project is om aan te tonen dat een sorptie warmte- en koude-opslagsysteem op ware schaal grootte (globale afmetingen 1 m hoog, 1,2m * 1m) gemaakt kan worden en dat de goede werking, de produceerbaarheid en een marktconforme kostprijs hiervan aangetoond kan worden.

Hierbij richt het project zich op het realiseren van het systeem gebaseerd op silicagel (adsorptie principe). Dit systeem zou met een geschikte TCM een energie-inhoud hebben van circa 60 kWh en een vermogen van 5 kW en warmte voor LT-verwarming (45°C) en of koeling (ca 15°C) leveren gedurende een periode van enige dagen of weken. Door modules van het systeem in cascade te schakelen is het mogelijk om warm tapwater mee te produceren (>60°C)

De richting voor een hogere energiedichtheid door middel van toepassing van een geschikt thermochemisch materiaal wordt i.s.m. de universiteiten uitgewerkt

In dit voorstel worden twee essentiële technische hoofdvragen geadresseerd en opgelost:

- Op welke wijze kan een sorptie warmte- en koude-opslagsysteem kosteneffectief geproduceerd worden?
- Welk thermochemisch materiaal kan worden geproduceerd om in een marktconform systeem te kunnen worden toegepast?

Beiden ontwikkelingen zijn nodig om tot een kosten effectief compact, verliesvrij warmte- en koude-opslagsysteem te komen.

In bijlage 1 is het openbare projectplan opgenomen.



3. Project aanpak en Werkwijze

3.1 Projectplan

Voor de uitvoering van het project is een projectplan opgesteld bestaande uit 6 werkpakketten. Deze 6 werkpakketten omvatten de volgende activiteiten.

Werkpakketten SWeKOS project

Werkpakket 1: Ontwerp, bouw en test reactor module,

Doelstelling: Ontwerpen, bouwen en testen van reactor module gebaseerd op silicagel

Werkpakket 2: Ontwerp, bouw en test concept marktsysteem met vier reactor modules,

Doelstelling: Compleet systeem realiseren

Werkpakket 3: Testen Demo model van het complete systeem

Doelstelling: Testen compleet systeem gebaseerd op silicagel

Werkpakket 4: Ontwikkeling Concept productie en test modellen,

Doelstelling: Ontwikkeling concept productie en test modellen

Werkpakket 5: Voorbereidende ontwikkeling reactor voor TCM ,

Doelstelling: Bouwen en testen van een test reactor t.b.v. warmte opslag

Werkpakket 6: Disseminatie en projectmanagement.

Doelstelling: Kennisoverdracht en management van het project

Uitvoering

Het project is ten uitvoering gebracht overeenkomstig de beschrijving van de werkpakketten en de bijdragen van de 6 deelnemers. Praktisch toepassing gericht onderzoek (o.a. het maken van het concept SWeKOS systeem en het testen hiervan) heeft parallel plaats gevonden aan de meer fundamentele kennisontwikkeling ten behoeve van het zoeken naar nieuwe en geschikte thermochemische materialen en door ontwikkelen van een fysisch numeriek rekenmodel van het SWeKOS systeem in COMSOL.

Gedurende het testen van het complete demo systeem werd vastgesteld dat de sturing en regeling te complex en duur is. Daarnaast zijn de resultaten van het Energypads 2 project ingebracht in het SWeKOS project. Dit betekende dat er een redesign van het SWeKOS systeem nodig was.

Dit redesign heeft geleid tot een andere opbouw van het modulaire SWeKOS systeem.

Vervolgens is er een module voor TCM gemaakt en getest.

Op basis van de resultaten bij de uitvoering van het project zijn gaandeweg aanpassingen uitgevoerd aan de werkzaamheden. Deze aanpassingen van de werkpakketten zijn geformaliseerd. Het uiteindelijke doel van het SWeKOS project is niet veranderd.

3.2 Aanpak

Het project is voor en belangrijk deel overeenkomstig het originele projectplan uitgevoerd.

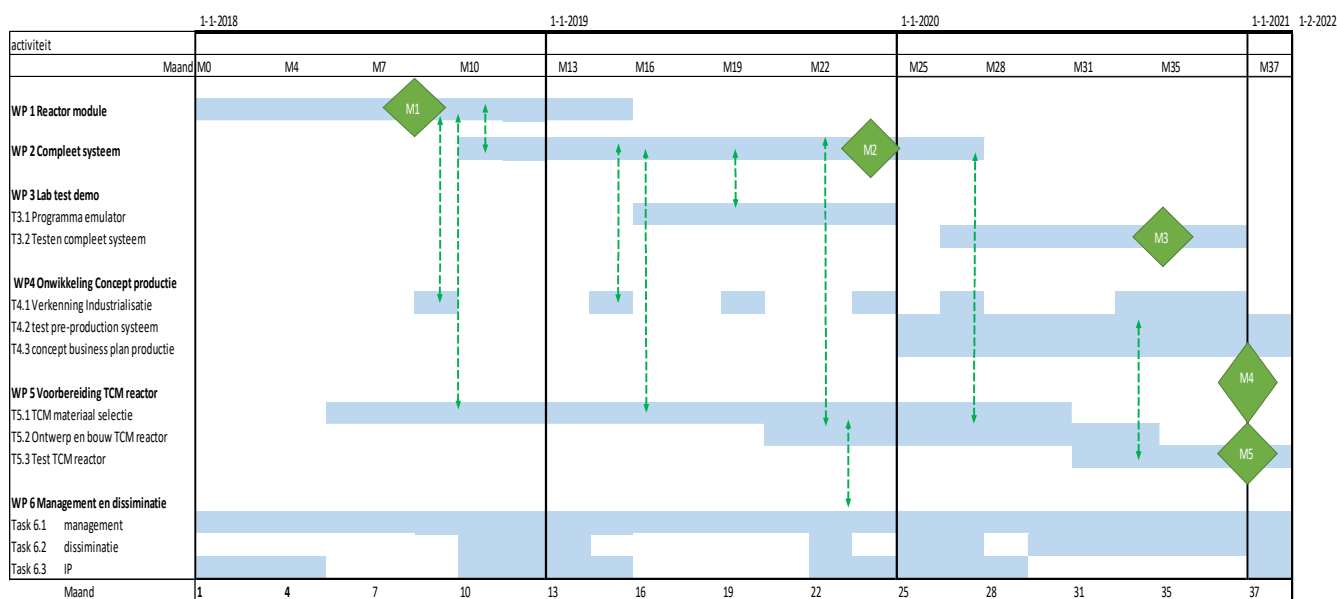
Werkpakket 1, 2 en 3 zijn in samenhang met elkaar uitgevoerd (zie figuur 1 met de project planning).

De conclusie van werkpakket 2 heeft geleid tot een andere aanpak in werkpakket 4. Voortschrijdend inzicht in de complexiteit van een SWeKOS systeem dat zowel verwarmen, koelen en de productie van warm tapwater tegelijkertijd kan, heeft tot aanpassingen in de project uitvoering geleid.

Daarnaast heeft het resultaat van het Energypad 2.0 project ook geleid tot praktische aanpassingen in het project. In plaats van een aantal testmodellen te maken, heeft er een herontwerp van SWeKOS plaatsgevonden. De resultaten van het Energypads 2 project zijn bij dit herontwerp gebruikt. Dit



heeft er toe geleid dat er gecoate gevinde buis warmtewisselaars gevuld met de TCM gebruikt gaan worden. Deze worden ook op basis van de resultaten van Energypads 2 gecoat met KTL lak die bestand is tegen Na₂S. Werkpakket 5 heeft niet geleid tot een nieuwe en geschikte TCM en daarom is teruggevallen op de bekende TCM's (CaCl₂, K₂CO₃ en Na₂S). Uiteindelijk is er aan het eind van het project een SWeKOS energy batterij gebouwd met de TCM, Na₂S. Parallel aan de ontwikkeling van een concreet SWeKOS is het COMSOL model verder ontwikkeld en geverifieerd met beschikbare meetdata van het project.



Figuur 2 Projectplanning van het SWeKOS project

3.3 Aansluiting op TKI Energypads 2.0 project

Binnen dit project vindt de ontwikkeling van een compleet sorptie gebaseerd warmte en koude opslag plaats. In de eerste ontwikkellijn wordt een compleet systeem gemaakt en getest, gebaseerd op silicagel als sorptie materiaal. In de tweede parallel lopende ontwikkellijn wordt eerst een thermo chemische materiaal ontwikkeld en geselecteerd en vervolgens toegepast in een test reactor in een 1 op 4 schaal. In het SWeKOS project worden de resultaten van het TKI Energypads 2 project toegepast in de vorm van met energypads modulaire opgebouwde stacks met in SWeKOS geselecteerde TCM materiaal. De resultaten van een verbeterde energypad en -stack als uitkomst van dit TKI Energypads 2.0 project worden toegepast in de tweede ontwikkellijn. Dit vindt eind 2020 plaats. De test reactor zal worden opgebouwd met de hier ontwikkelde en geteste energypad en -stack.



4. Resultaten

4.1 Freedom to Operate & IPR strategy

Voor de business strategie van de ontwikkeling en productie van het SWeKOS systeem is het nodig om een Intellectual Property Right strategie te ontwikkelen en de zogenaamde freedom-to-operate te kennen. Daartoe zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- Aandacht besteden binnen de ontwikkeling van SWeKOS om nieuwe ideeën of, concepten geheim te houden en na te gaan of er patent voor kan worden aangevraagd.
- Duidelijke afspraken te maken inzake hoe om te gaan met geheime kennis, bijvoorbeeld van productie, materialen of recepturen. Dit is vastgelegd in de samenwerkingsovereenkomst en binnen de project meetings wordt hieraan aandacht besteed.

De conclusie van de patenten analyse uit de diverse gerelateerde projecten (Energypads, en Energypads 2 en SWeKOS) was dat er freedom-to-operate is voor de ontwikkeling van energypads in combinatie met toepassing van 3 D structuren met warmte geleidende (carbon) vezels ten behoeve van thermo-chemische opslag. Deze freedom-to-operate is belangrijk voor de verdere IPR strategie. Een Intellectual Property Rights strategie is meer dan het ontwikkelen van patenten. Voor de ontwikkeling van de energypads bestaat de IPR-strategie uit de volgende onderdelen:

- Voor de projectdeelnemers is er een samenwerkingsovereenkomst opgesteld waarin de geheimhouding van geheime kennis is geregeld.
- De ontwikkelde geheime kennis komt ten goede aan de productontwikkeling van thermo chemische opslag bij de Beijer RTB. De Beijer RTB kan vrijelijk deze kennis en ervaring inzetten in de productontwikkeling van TCM opslagsystemen en het brengen van deze producten naar de markt.

Daar waar mogelijk en nuttig zullen patenten worden ontwikkeld, in overleg met de projectpartners. De kennis en ervaring ontwikkeld en opgedaan in het SWeKOS project wordt binnen het consortium geheimgehouden op basis van afspraken gemaakt tijdens de project overleggen.

Publicaties en presentaties worden voorgelegd aan de consortium partners en na hun toestemming openbaar gemaakt.

Het eindrapport van dit project kent een publieke versie die door de consortium partners is goedgekeurd.

Conclusie IP & Freedom to operate

Uit patent onderzoek is gebleken dat er geen belemmeringen zijn om de energypad verder te ontwikkelen. Daarnaast is de IP-strategie vast gelegd met garanties voor De Beijer RTB om het product verder te kunnen ontwikkelen. Aan het einde van het project is een patentaanvraag ingediend voor een rechthoekige en modulaire SWEKOS systeem



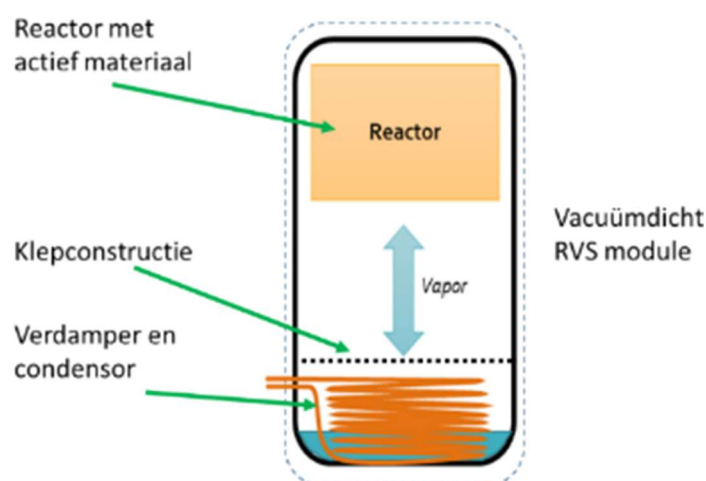
4.2 Ontwerp, bouw en test reactor op volle schaal

4.2.1 Inleiding

Het uiteindelijke doel van de TCM projecten is het realiseren van om een thermo chemisch opslagsysteem die ten minstens 5kW koel- en verwarmingsvermogen heeft en met een totale capaciteit van circa 60kWh bezit. Met een uitgangsontwerp van 4 modules betekent dit een modulecapaciteit van 15kWh. Het doel van SWeKOS project is het realiseren van een werkzaam, markt conform systeem. Allereerst wordt er als actief materiaal Silicagel gebruikt gaan worden (1e generatie). Silicagel bezit niet de nadelige effecten dat TCM wel heeft. Silicagel bezit namelijk een solide structuur waar het Sorbaat een oppervlaktereactie aangaat (physisorptie). Hierdoor behoudt het silicagel zijn originele structuur en vorm. De gewenste module opslagdichtheid van 15kWh zal worden bereikt in een 2^e generatie SWeKOS systeem, gevuld met een geschikt TCM. In onderstaande tabel 1 staan de uitgangspunten op module- en systeemniveau uitgewerkt. In onderstaande figuur is een schematische weergave van een module te zien. Hierop is de samenstelling van de module met reactor, interne klepconstructie en verdamper/condensor weergegeven. Het dimensioneren en perfectioneren van de individuele componenten zal in het volgende hoofdstuk besproken worden.

Uitgangspunten	1e generatie	2e generatie
Capaciteit	8 kWh systeem 2 kWh module	60 kWh systeem 15 kWh module
Koelvermogen	5 kW module 20 kW systeem	5 kW module 20 kW systeem
Verwarmingsvermogen	5 kW module 20 kW systeem	5 kW module 20 kW systeem
Systeem geometrie (LxBxH)	1000mm*1200mm* 1000mm	1000mm*1200mm* 1000mm
TCM materiaal	Silicagel (SiO ₂)	Natrium Sulfide (Na ₂ S) Kaliumcarbonaat (KCO ₃)
Sorbaat	Water (H ₂ O)	Water (H ₂ O)
Vacuüm klepconstructie	Intern	Intern

Tabel 1 Uitgangspunten SWeKOS 1e generatie en 2e generatie



Figuur 3 Schematische weergave van de opslagmodule



4.2.2 Ontwerp test reactor

Zoals in de inleiding besproken is zal in eerste instantie de reactor gemaakt worden met Silicagel (SiO_2). Dit materiaal regenereert vanaf circa 50°C en is daarmee uitermate geschikt om de eerste generatie thermochemische opslagsysteem mee te bouwen.

Voor de test reactor wordt “Granulaat silicagel 123” van de fabrikant Grace Davison gebruikt. Dit materiaal heeft een deeltjes grootte spreiding van 0,8 tot 1,5mm en een adsorptiecapaciteit van $2512 \text{ [kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}]$ oftewel met een maximale verzadiging van 35 wt% een capaciteit van $880 \text{ [kJ/kg}_{\text{silica}}]$ oftewel $0,25 \text{ [kWh/kg}_{\text{silica}}]$.

In voorgaande onderzoeken is geconcludeerd dat de balans tussen sorptievermogen en capaciteit afhankelijk is van de damptoetreding, warmtegeleiding van het sorptiemateriaal en geometrische afhankelijkheden. Daarom zijn 3 verschillende reactor configuraties zijn onderzocht.

4.2.2.1 Packed bed configuraties

Om de maximale capaciteiten te bereiken zal er een maximale vulling van het beschikbare volume bewerkstelligd moeten worden. Dit kan door de warmtewisselaar volledig met adsorptiemateriaal te vullen volgens het Packed Bed principe. Afhankelijk van de type wisselaar kan er hiermee ook vermogen aan toegevoegd worden door de dampweglengte te verminderen.

Monoblock wisselaar

Om een maximale capaciteit te bereiken, oftewel het maximaal gewicht aan adsorptiemateriaal, is er een buis-vin wisselaar gevuld met silicagel (zie figuur 5). Het vulgewicht van deze warmtewisselaar was 12 kg. Er zijn vervolgens verschillende vermogens- en capaciteitstesten uitgevoerd om de grenzen van deze configuratie op te zoeken. Hierbij werd de reactor gecombineerd met een voldoende grote verdamper om een stabiele verdamper overdruk te realiseren. Uit de testresultaten kwam naar voren dat deze configuratie een effectieve genormaliseerde capaciteit van $59 \text{ [Wh/L}_{\text{module}}]$.

3 losse reactoren

Om ten opzichte van het Monoblock een hoger gemiddeld vermogen te generen is er een grotere damptoetreding gecreëerd door het Monoblock op te splitsen in 3 losse reactoren die naast elkaar gepositioneerd zijn (zie figuur 5). Door tussen de wisselaars een damp open ruimte van circa 1 tot 1,5cm te creëren zal daardoor kortstondig méér Silicagel actief worden wat in een hoger vermogen zou moeten resulteren. Deze hypothese is dan ook doormiddel van metingen bevestigd doordat een gemiddeld vermogen van $120 \text{ [W/L}_{\text{module}}]$ gemeten is en daarnaast een capaciteit van $44 \text{ [Wh/L}_{\text{module}}]$. Het was mogelijk om 3kg silicagel in elke wisselaar te storten wat het totaalgewicht silicagel op 9 [kg] eindigde.



Figuur 4 Verschillende Packed bed configuratie met (links) 3 losse reactoren, (midden) Monoblock ongevuld, (rechts) gevulde & geïnstalleerde Monoblock

4.2.2.2 *Lijmen van Silicagel*

Bij de voorgaande Packed bed configuraties heeft er een variatie plaatsgevonden tussen geometrie en het minimaliseren van dampweerstand. Om méér instantaan adsorptievermogen per massa eenheid silicagel te genereren is er ook de mogelijkheid om de thermische weglengte te optimaliseren door het silicagel op de wisselaar “vast te plakken”. Hierbij zal een enkele of een dubbele laag korrels op de warmtewisselaar gelijmd worden waardoor de warmte overdragend oppervlakte vergroot wordt en hierdoor de korrel zijn maximale sorptiesnelheid kan behouden.

Aan de hand van literatuuronderzoek is er gekozen om de warmtewisselaar te voorzien van een speciale elastische coating. Deze coating wordt er doormiddel van hydrostatisch coaten of doormiddel van onderdompeling in coatingpoeder voorzien van deze elastische laag. Nadat de coating op de wisselaar is aangebracht wordt de volledige wisselaar met sorptiemateriaal volgestort en wordt het geheel in een oven verwarmt waardoor de elastische coating plastisch wordt, het silicagel deels inkapselt en vervolgens uithardt doordat de weekmakers eruit verdampen. Hierdoor ontstaat er een solide mechanische (niet chemische) verbinding tussen de wisselaar en het sorptiemateriaal. Doordat maar een deel van het silicagel met de coating in contact staat heeft het silicagel nog voldoende oppervlak om damp in op te nemen. Het resultaat is hieronder in figuur 6 te zien.

Aan de hand van de resultaten kwam naar voren dat het specifiek koelvermogen per massa eenheid silicagel uitermate groot was, maar dat de netto capaciteit en het gemiddeld koelvermogen per volume- eenheid achter bleven. Dit was te verwachten doordat er netto maar 5,6 kg silicagel geplakt was, en een relatief grote warmtecapaciteit aan wisselaar aanwezig was, wat een traagheid in het afgegeven vermogen veroorzaakte.



Figuur 5 Lijmen van silicagel op een buis-vin wisselaar

4.2.2.3 *Silicagel Dipcoating*

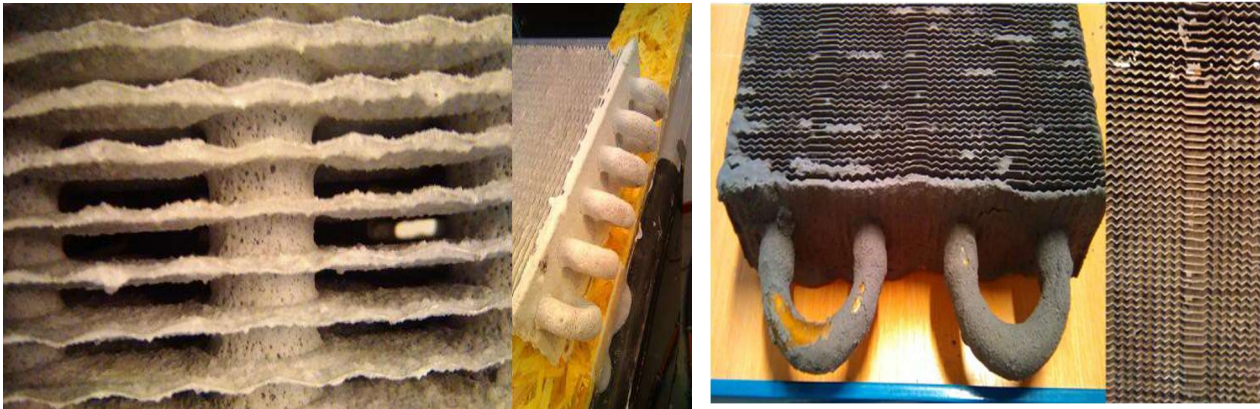
De derde configuratie is ontwikkeld doormiddel van een dipcoating. In de zoektocht naar compactere wisselaars waarbij er méér vinnen per hoogte eenheid voorzien zijn van silicagel is er een dipcoating ontwikkeld. Silicagel korrels werden vermalen tot poeder en gemixt met een bepaald type bindmiddel (ethylcellulose) en oplosmiddel (water). Afhankelijk van de hoeveelheid bindmiddel ontstond er een viskeuze vloeistof met daarin kleine silicagel deeltjes. Vervolgens werd de wisselaar doormiddel van diptechnologie ondergedompeld in deze viskeuze vloeistof. Doormiddel van adhesie krachten blijft deze mix achter op de vinnen van de wisselaar. Door gedurende het proces de temperatuur van de wisselaar te verhogen wordt de oplossing eruit verdampt waardoor er een “harde” korst van silicagel en bindmiddel achterblijft. Om vervolgens al het water uit de laag te krijgen om het netto toegevoegde gewicht te bepalen werd de wisselaar in een oven op een hoge temperatuur gebracht. Er blijft dan vervolgens een poreuze laag over van vermalen silicagel en bindmiddel.

In de testen die uitgevoerd zijn op deze wisselaar met dipcoating, blijkt dat het specifieke vermogen per massa eenheid silicagel erg hoog lag. Dit bevestigde de hypothese dat de warmteoverdracht van- en naar het materiaal toe was gestegen t.o.v. een Packed bed configuratie. De hoeveelheid capaciteit was zeer beperkt bij deze configuratie. Na het optimaliseren van de mix verhouding is de minimale vin afstand bepaald om de volledige vin van coating te voorzien. Deze legt direct de beperking op de hoeveelheid silicagel dat daadwerkelijk op een bepaalde wisselaar gecoat kan worden.

Dipcoating met grafiet

Om de gemiddelde warmtegeleiding van de poreuze silicagel laag te vergroten is er een minimale hoeveelheid grafietpoeder toegevoegd. Door deze toevoeging krijgt de coating een donkergrijze kleur zoals ook te zien is in figuur 7. Het toevoegen van grafiet zorgde voor een stijging van het specifieke vermogen per massa eenheid. Het silicagel kon hierdoor nóg sneller zijn reactiewarmte

kwijt, wat ervoor zorgde dat de sorptiesnelheid gemaximaliseerd werd. Overigens blijft ook hier de capaciteit achter wat het voor opslag doeleinden onaantrekkelijk blijft.



Figuur 6 Dipcoaten van wisselaar zonder (links) en mét grafiet (rechts) voor het toevoegen van extra warmtegeleiding

4.2.2.4 *Overzicht van de resultaten*

Het doel is een eerste generatie opslagmodule te ontwerpen die ten minste 2kWh aan capaciteit bezit en een gemiddeld vermogen van circa 5kW aan verwarming en koeling kan realiseren. Daarnaast is bepaald dat er een reactor volume beschikbaar is van 45 liter met een diameter van 0,3m en een hoogte van 0,65m. Aan de hand van deze eisen en randvoorwaarden voldoet de configuratie met de 3 losse reactoren. Met deze reactor configuratie kan er een specifiek vermogen van 5,4kW en een capaciteit van 1,9 kWh gerealiseerd worden. De overige configuraties zijn in dit project ongeschikt om zowel vermogen als capaciteit te leveren.

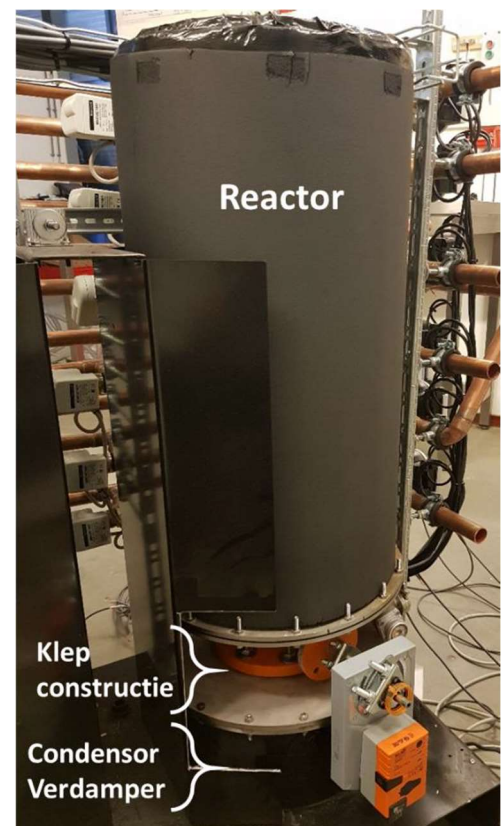
4.2.3 Constructie test reactor

De testreactor zal in het reactorgedeelte 3 warmtewisselaars gevuld met silicagel bevatten. Deze reactor zal een capaciteit hebben van 2 kWh en een vermogen voor koelen en verwarmen van circa 5 kW. In dit paragraaf worden de overige componenten berekend en bepaald.

4.2.3.1 Interne vacuümklepconstructie

Om ten minste 5kW aan koeling en warmte te kunnen leveren zal de toevoer van damp voldoende moeten zijn en daarmee de dampweerstand geminimaliseerd moeten worden. Bij 5 kW aan verdamping zal er dus tenminste, berekend met de verdampingswaarde van water van circa 2300 [kJ/kg], circa 2 tot 3 [gram_{H2O}/seconde] getransporteerd moeten worden. Daarnaast dient de klepconstructie, in verband met prijs en inbouwruimte, zo compact mogelijk ontworpen worden. Voor de interne vacuümklep is er de eis gesteld dat het geen hogere weerstand, oftewel druk val, mag hebben dan 1 mbar. Uit druk val berekeningen komt naar voren dat er een minimaal doorlaat oppervlak benodigd is van 1900 mm² wat overeenkomt met een rond gat ter grootte van circa 50mm.

Verder geldt dat de klep in een vacuümomgeving géén condenseerbare gasen mag produceren, en dat het een interne- en externe vacuüm dichte afdichting heeft. Op basis van prijs, kwaliteit, compactheid en betrouwbaarheid is een EVFS dubbel geflensde vlinderklep naar geselecteerd, die al jaren veelvuldig in verschillende procesindustrieën toegepast worden. Naast dat het een robuust ontwerp betreft, en aan de gewenste vacuüm dichtheidseisen voldoet, is deze klep in eerste instantie ook nog aanzienlijk goedkoper dan alle andere zelf ontworpen oplossingen. Aan de hand van verschillende lektesten, is gebleken dat deze klep een lekratio heeft van 5×10^{-6} [mbar l/s]. Daarnaast is er gekozen voor een uitvoering met een interne diameter van 80[mm]. Hierdoor blijft bij de gewenste vermogens de druk val over deze klep onder de 1 [mbar]. Het benodigde koppel voor de actuator van de klep is 16 [nm]. Op basis van goede ervaringen met actuatoren van het merk Belimo is er gekozen voor de 16MQ-24 uitvoering. De samenbouw van de componenten is in figuur 7 terug te zien.



Figuur 7 De SWeKOS module

4.2.3.2 Verdamer & condensor

Aan de onderzijde van de SWeKOS module bevindt zich de condensor en verdamer. Belangrijk is dat deze wisselaar 2 functies moet uit kunnen oefenen, namelijk condenseren en verdampen. In combinatie met de huidige reactor met een capaciteit van 2kWh zal er daarnaast tenminste 3,15kg aan water verdampt en gecondenseerd moeten kunnen worden om de maximale verzadigingsgraad van 35% te bereiken.

Om de functie van condenseren en verdampen in te vullen is er gekozen om gebruik te maken van een koperen spiraal wisselaar. In figuur 8 is het bovenaanzicht van de wisselaar afgebeeld.



Aan de hand van berekeningen en mogelijke inbouwruimtes is ervoor gekozen om de helft van het warmtewisselend oppervlak direct in contact te laten zijn met het condensaat/water en de ander helft boven de oppervlakte te positioneren. Concreet betekent dat de onderste 3 tot 4cm van de wisselaar bij maximale condensatie in het waterbad staat. Aan de hand van berekeningen en praktijktesten is gebleken dat deze configuratie voldoende is om de gewenste condensatie- en verdampingsvermogens aan te leveren.

4.2.3.3 *Vacuïmdichtheid*

Om een goed functionerende opslagmodule te hebben zullen de componenten van de module vacuïmdicht moeten zijn. Binnen de definitie vacuüm dichtheid is er aangenomen dat er een maximale lekkage van 5×10^{-6} mbar l/s mag zijn. Om deze minimale eis te behalen wordt de buitenmantel van de module van Roest Vast Staal gemaakt, wat daarnaast ook een hoge sterkte, corrosie vast, lage prijs en een lage warmtecapaciteit heeft. Er worden doorvoeren en aansluitingen RVS gelast. Tussen de condensor/verdamper – klep – reactordeel zitten O-ring afdichtingen die speciaal voor vacuüm dichte constructies geschikt zijn. Deze onderlinge componenten worden door middel van bout verbindingen op elkaar geklemd. Hierdoor zorgt de Viton O-ring met vacuüm afdichtingsmiddel voor de geëiste afdichtingsgraad.



Figuur 8 SWeKOS module - condensor & verdamper

4.2.3.4 *Buitenisolatie*

De opslagmodule wordt om 2 redenen thermisch geïsoleerd t.o.v. de buitenomgeving. De eerste reden is om ongewenste condensatie op de reactorwand te minimaliseren. Bij de eerste keren laden van de module zal er toch condensatie optreden op de reactordeel van de module. Door deze condensatie zal de reactorwand opwarmen wat ervoor zorgt dat bij een volgende cycli de condensatievoorkeur bij de condensor ligt. Door de reactor modulewand thermisch te isoleren zal deze condensatievoorkeur in stand blijven.

De tweede reden om isolatie toe te voegen aan de module is om tijdens verdamping zo min mogelijk omgevingswarmte naar de verdamper wand te transporteren. Hierdoor zal de verdampingsvoorkeur zo maximaal mogelijk bij de verdamper zelf liggen waardoor de thermische COP van de module gemaximaliseerd wordt. De toegepaste isolatie betreft een elastomeerschuim op basis van synthetisch rubber wat een zeer hoge flexibiliteit heeft met een gesloten celstructuur tegen condensatie op de buitenwand van module. Dit materiaal wordt toegepast met een dikte van 13mm en heeft een isolatiewaarde van 0,033 [W/mK].

4.2.4 Meetresultaten test reactor

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de diverse beproevingen aan de ontworpen en gebouwde test reactor (fig 9) de weergegeven. Onderzocht worden de stilstandsverliezen, de soortelijke warmte van het systeem, de snelheid van sorptie en desorptie en welke prestaties er behaald worden bij het leveren van hoge desorptie temperaturen ten behoeve van warm tapwater levering.

Geometrische eigenschappen

Totale hoogte 92 cm

Diameter 30 cm

Volume 65 liter

Constructie eigenschappen

RVS 316L gelaste onderdelen

Reactor/klep/C/V geflensde samenbouw

Minimale vacuüm dichtheid van 5×10^{-6} [mbar/s]

13mm thermische isolatie met $\lambda=0,033$ [W/mK]

4x 22mm hydraulische aansluitingen

Reactor eigenschappen

9kg Silicagel 123 granular 0,8-1,5[mm]

3x buis-vin wisselaar

Capaciteit: 44 [Wh/L_{module}], oftewel 2 [kWh]

Gewogen vermogen: 120 [W/L_{module}], oftewel 5 [kW]

Thermische stilstandsverlies: 5 [W/ΔK]

Soortelijke warmte verz. = 90 [J/kgK]

Soortelijke warmte onverz. = 120 [J/kgK]

Vacuümklep eigenschappen

Vlindervacuümklep DN80

Dampdrukval <1 [mbar]

Lekdichtheid van < 5×10^{-6} [mbar/s]

Actuator Belimo 16 [Nm]

Condensor & verdamper

Spiraal buiswisselaar (koper) – 1^e generatie

Geschikt voor 10 [kW] verdamping en 2 [kWh] capaciteit

Thermische stilstandsverlies: 39 [W/ΔK]

Soortelijke warmte verz. = 755 [J/kgK]

Soortelijke warmte onverz. = 1568 [J/kgK]

1^e generatie opslagmodule



Figuur 9 De gegevens van de gebouwde testreactor en een foto ervan.



4.2.4.1 Stilstandsverliezen

Om de stilstandsverliezen te meten is er een module samengebouwd zoals in de vorige paragraaf is beschreven. De reactor wordt op een temperatuur van 84°C ($\pm 0,4^{\circ}\text{C}$) gehouden terwijl de Condensor/verdamper (C/V) op $26,2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,4^{\circ}\text{C}$) werd gehouden bij een omgevingstemperatuur van 25°C . Bij een gefixeerde volumestroom van $1[\text{m}^3/\text{h}]$ werden de temperaturen tussen in- en uitgaande waterstroom gemeten. Met deze waarden werd vervolgens het afgegeven vermogen bepaald die vervolgens genormaliseerd werd met de omgevingstemperatuur. Deze zijn in de onderstaande tabel terug te vinden.

	Reactor	Condensor & verdamper
Stilstandsverliezen	5 [W/ ΔK]	39 [W/ ΔK]

Tabel 2 Stilstandsverliezen van de reactor en C/V tijdens laden

In de tabel komt duidelijk naar voren dat er 8 keer meer energie verloren gaat aan de C/V zijde dan aan de reactor zijde. Dit bevestigt de hypothese dat door een direct contact van het condensaat met de wand ervoor zorgt dat het warmtetransport via directe geleiding hoger ligt dan bij de reactor. De reactor kan voornamelijk zijn warmte kwijt worden door convectie en via straling.

4.2.4.2 De soortelijke warmte

Van de afzonderlijke materialen zijn er genoeg gegevens bekend wat betreft de soortelijke warmte. Hoe het zich gedraagt als een volledig systeem is moeilijk theoretisch te bepalen. Om te bepalen hoeveel energie er benodigd is om de componenten in de module per graad temperatuur te laten stijgen, zijn er verschillende testen uitgevoerd.

Aan de hand van de vermogensafgifte en de in- en uitgaande temperatuur kan de soortelijke systeemwarmte bepaald worden. De massa voor de systemen is genormaliseerd naar de effectieve massa. Dit betekent dat de massa van een 30% verzadigde reactor uitkomt op 11,5kg, een onverzadigde reactor 9,5kg, een verzadigde C/V komt uit op 2,5 kg waarbij een onverzadigde C/V uitkomt op 0,5kg. De gemeten vermogens zijn gecorrigeerd met behulp van de stilstandsverliezen zoals in de vorige paragraaf bepaald is. De gebruikte opwarm temperatuurstap is $84^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 27^{\circ}\text{C}$.

	Reactor	Condensor & verdamper
Verzadigd ($\pm 30\text{wt}\%$)	90 [J/kgK]	755 [J/kgK]
Onverzadigd ($\pm 5\text{wt}\%$)	120 [J/kgK]	1568 [J/kgK]

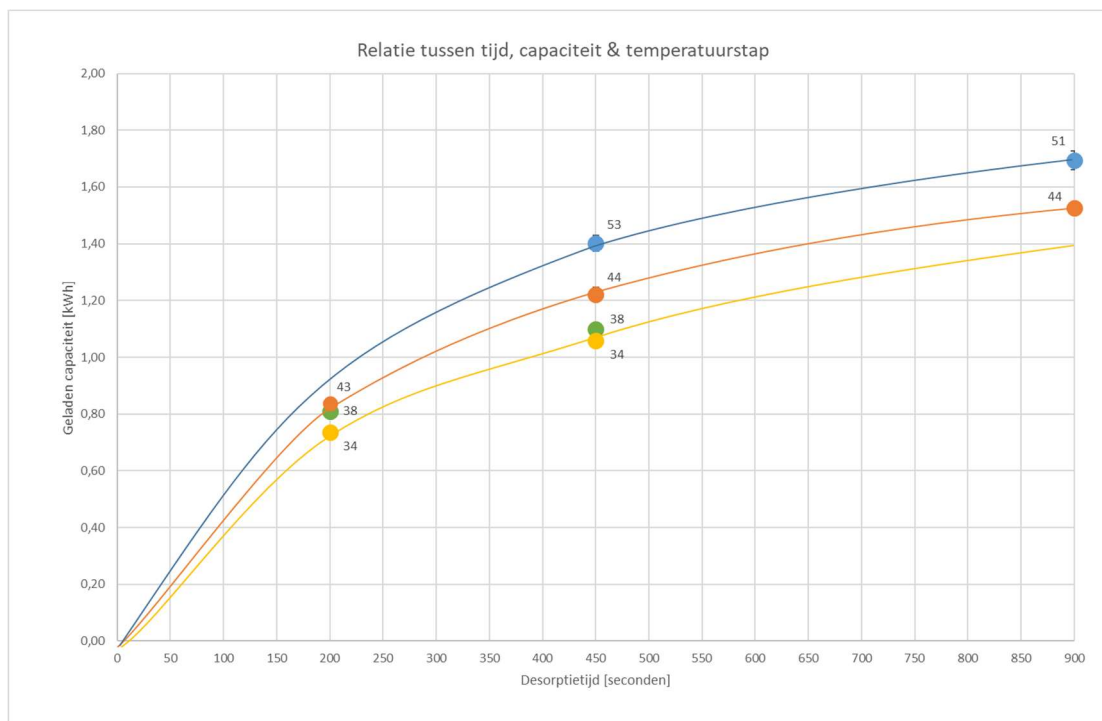
Tabel 3 Soortelijke systeemwarmte van reactor en C/V

Zoals in tabel 3 te zien is, ligt de soortelijke warmte bij onverzadigde toestand hoger dan bij verzadigde toestand. Dit betekent dat er dus méér energie nodig is om een temperatuurstijging van het systeem te verkrijgen. Dit is naar alle waarschijnlijkheid te verklaren doordat een onverzadigde reactor een relatief lagere gemiddelde warmtegeleiding heeft en daardoor een hogere temperatuurstap nodig heeft om in dezelfde tijdseenheid evenveel energie te transporteren. Hierdoor stijgt in dit geval de soortelijke systeemwarmte. Daarnaast is ook te zien dat de soortelijke warmte hoger is bij de C/V dan bij de reactor. Dit komt omdat de effectieve massa van water ten opzichte van de spiraalwisselaar aanzienlijk hoger zal liggen dan bij de buis-vin wisselaar van de reactor. Hierdoor komt de soortelijke systeemwarmte dicht bij de waarde van vloeibaar water te liggen ($4180 [\text{J}/\text{kgK}]$).



4.2.4.3 Sorptiesnelheden

In het kader van energieopslag is het noodzakelijk om te weten hoe lang de maximale opslagcapaciteit te benutten is. Om hier inzicht in te krijgen zijn er metingen uitgevoerd waarbij er tijdens het laden (desorptie) een temperatuurstap tussen de reactor en condensor is opgelegd die bepalend is voor de snelheid van het systeem. De hypothese is dan ook, hoe hoger de temperatuurstap, des te groter het dampdrukverschil tussen reactor en condensor, des te sneller het systeem geladen is. Er zijn met verschillende tijdsduren temperatuurverschillen tussen reactor en condensor van circa 34, 44 en 53 graden op het systeem gezet. Door vervolgens de integraal te nemen over het berekende afgegeven vermogen, en te corrigeren voor de meetfout en stilstandsverliezen, zijn de bereikte capaciteiten per tijdseenheid bepaald. Hieronder in figuur 10 zijn de resultaten van de testen te zien. In de grafiek is terug te zien dat de hypothese inderdaad past bij de behaalde resultaten. Hierbij is ook te zien dat door het exponentiele karakter van de grafiek het relatief lang duurt voordat het systeem maximaal geladen is en de maximale hoeveelheid water uit het sorptiemateriaal is onttrokken.



Figuur 10 Sorptiesnelheid bij verschillende temperatuurstappen



4.2.4.4 Tweetraps hoge temperatuur principe

Een van de doelen van dit project is om met de SWeKOS opstelling hoge temperatuur tapwater en verwarming te leveren. Aangezien normaliter een momentaan vermogen van circa 24 kW in een gemiddeld huis gevraagd wordt voor tapwater, en ervan uit wordt gegaan dat thermochemie dit niet 1 op 1 kan leveren, zal er een extra buffervat benodigd zijn. De SWeKOS zorgt er dan met een lager vermogen en een hoge temperatuur ervoor dat het buffervat tijdig weer op de gewenste temperatuur is. Om te onderzoeken hoeveel vermogen, en welke temperatuurstap de SWeKOS bij verschillende ingaande temperaturen kan produceren is er hiernaar onderzoek gedaan. Er zijn in totaal 3 testen uitgevoerd welke de karakteristieken hadden zoals in onderstaande tabel 4 is weergegeven.

	Reactor Laad /ontlaad temperatuur	Condensatie temperatuur	Verdampings-temperatuur	Flow Reactor	Flow C/V
Test 1	60°C	10°C	40°C	5 l/min	16,7 l/min
Test 2	70°C				
Test 3	75°C				

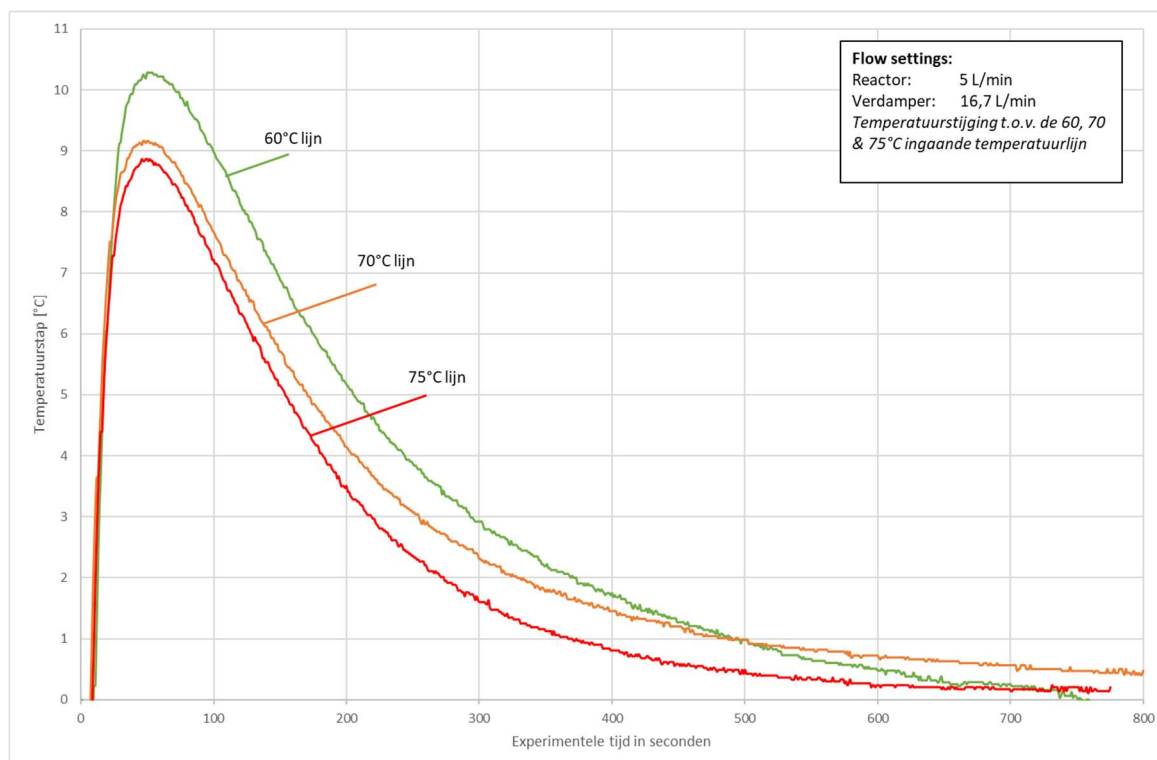
Tabel 4 Tweetraps hoge temperatuur meetcondities

Voor het ontladen is er een temperatuur van circa 40°C gebruikt om het condensaat te verdampen. Deze temperatuur is afkomstig uit het 2-traps principe waarbij een 1^e module ontladen wordt en daarbij de adsorptiewarmte aan de verdamper van de 2^e module wordt toegediend. Hierbij wordt er dus uitgegaan dat deze waterstroom een temperatuur heeft van circa 40°C. Het reactordebiet van de 2^e machine wordt op een lager niveau ingesteld dan bij de andere testen, namelijk 5 L/min i.p.v. 16,7L/min. De reden hiervoor is omdat er vanuit dit scenario ervan uit is gegaan dat het een separaat watervat opwarmt, en dus niet direct gekoppeld zit aan de warmtapwater stroom.

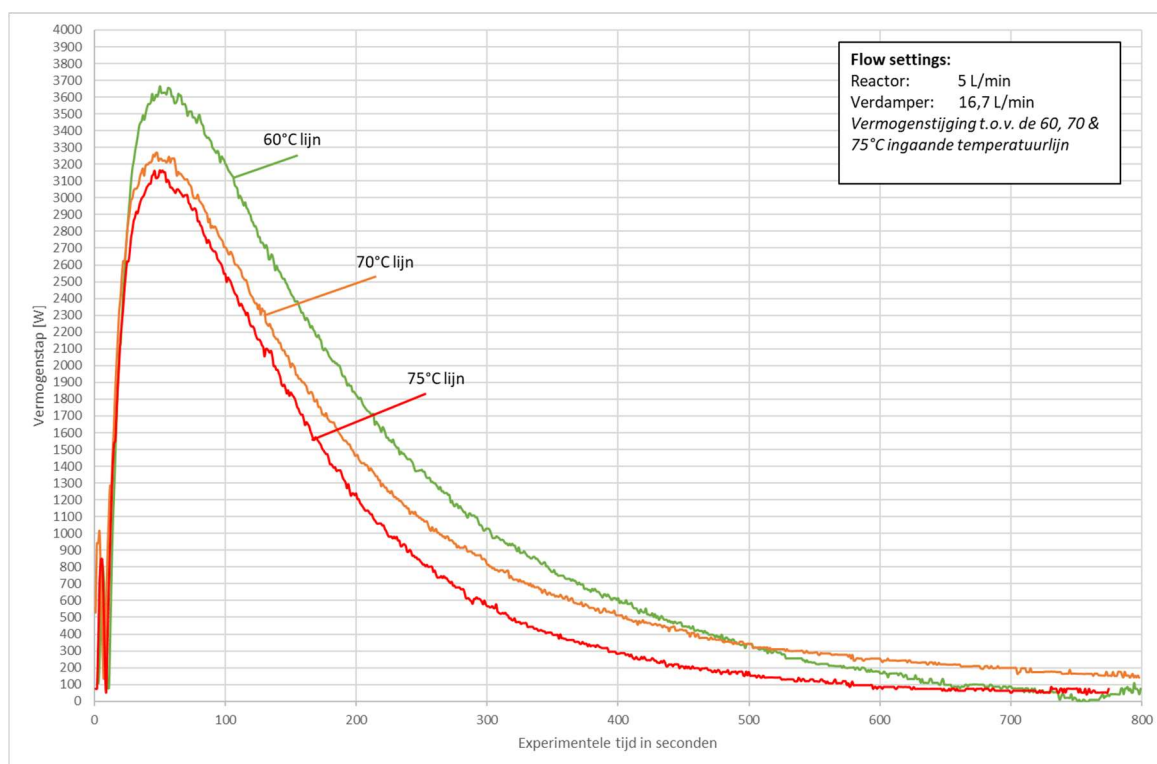
In figuur 11 & 12 zijn de resultaten weergegeven. Hierbij is in figuur 11 te zien dat er bij een 60°C aanvoertemperatuur een piek in temperatuurstijging van maximaal 10°C wordt gehaald met een piekvermogen van circa 3600 [W]. Ook is te zien dat wanneer de aanvoertemperatuur stijgt naar 70°C & 75°C, de piek in temperatuurstijging lichtelijk afneemt en het piekvermogen rond 3000 [W] blijft. De deelresultaten zijn hieronder in tabel 5 terug te vinden.

	Reactor Laad/ontlaad temperatuur	Gemiddelde temp. Stijging gedurende 800[s]	Gemiddeld reactor vermogen gedurende 800 [s]
Test 1	60°C	3°C	1192 [W]
Test 2	70°C	2°C	960 [W]
Test 3	75°C	2°C	950 [W]

Tabel 5 Deelresultaten 2-trap hoge temperatuur levering



Figuur 11 Temperatuurrepons 2-traps hoge temperatuur levering



Figuur 12 Vermogensrespons 2-traps hoge temperatuur levering

**CONCLUSIE** Reactor module

Het programma van eisen is vertaald naar een testreactor op marktconforme schaal. De testen hebben geleid tot de selectie van een packed bed configuratie met 3 afzonderlijke warmtewisselaars waar de silicagel wordt aangebracht. Het beproeven van de testreactor heeft aangetoond dat de uitgangspunten met betrekking tot vermogen gehaald worden. De energie opslag capaciteit is nog eens stuk lager omdat nog niet met een thermo chemisch materiaal gewerkt wordt. Het ontwerp van de test reactor wordt in het complete systeem gebruikt en wordt beproefd inclusief hydraulische aansluitingen, regeling en sturing.

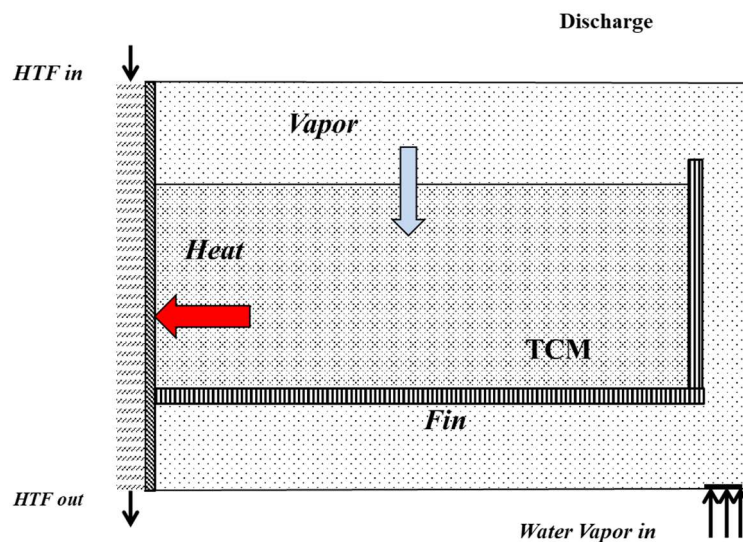
4.3 Doorontwikkeling COMSOL numeriek model TCM energie opslag

4.3.1 Inleiding

In het TKI energypad project [1] dat voorafging aan het SWeKOS project is een numeriek model van een energypad in een opslagmodule in COMSOL ontwikkeld. In het Energypad 2.0 project [4] dat gedeeltelijk parallel aan het SWeKOS project heeft gelopen is dit model verder doorontwikkeld. In dat project zijn met name andere uitvoeringsvormen van de energypad doorgerekend. In dit project hebben twee ontwikkelingen aan het model plaatsgevonden. Een belangrijke stap is gezet om van de berekening van 1 energypad over te gaan naar een energystack, een reeks energypads en of fin and tube warmtewisselaar. De tweede stap is om van de werkzame stof silicagel nu in de modellering aan een thermo-chemische materiaal (TCM) te rekenen. Daarnaast heeft eerste verificatie van het rekenmodel plaats gevonden.

4.3.2 Korte achtergrond fysica model

Thermochemische materialen worden op een koperen vin geplaatst, die fungeert als warmtetransportmedium van TCM naar warmteoverdrachtsvloeistof (HTF) die door de koperen buis stroomt. In de koperen buis wordt water toegevoerd als warmteoverdrachtsvloeistof met een constant debiet. De thermochemische materialen reageren met waterdamp die wordt aangevoerd door de verdamper en produceert warmte. Het werkpaar dat in de huidige studie wordt gebruikt, is silicagel-water. Voor een systeem met waterdamp is de heersende warmteoverdrachtsmodus



Figuur 13 Modelering Energypad

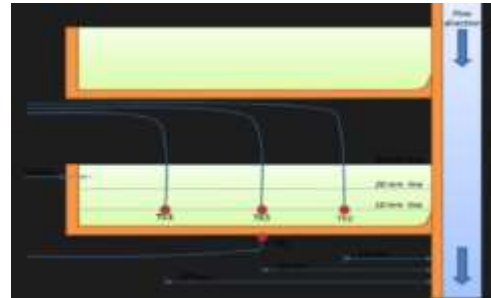
geleiding is. Daarom wordt warmte in het poreuze medium met waterdamp overgedragen door geleiding volgens de wet van Fourier. Warmteoverdracht door convectie in het poreuze medium wordt verwaarloosd omdat de reactie tussen de silicagel en de waterdamp onmiddellijk en volledig moet zijn, zodat er geen convectie is tussen het zout en de waterdamp. Het damptransport in de TCM kan van het type Knudsen, Darcy of inertiaële stroming zijn. Dit hangt af van de dampspanning en snelheid aan de poreuze mediagrenzen. De vloeistof stroomt door het TCM-bed van ongeveer bolvormige deeltjes met globale porositeit. Waterdamp wordt beschouwd als een ideaal gas vanwege de lage concentratie en partiële druk. Het poreuze reactieve bed is van silicagel-deeltjes stromende gas in ons geval is waterdamp (moleculaire diameter van $2,9 \text{ \AA}$) met een vrij gemiddeld pad van $4,70303 \times 10^{-6} \text{ m}$. Door de Knudsen-formule toe te passen ($K_n = \lambda/L$), waarbij λ het vrije gemiddelde pad is en L de karakteristieke lengte van het systeem is) wordt een Knudsen-getal van 0,0095 verkregen. Bijgevolg kan de stroom van Darcy of traagheid zijn. Zeer kleine permeabiliteitswaarde van het bed (tabel 2.1) consolideert, zoals de bewering dat de massaoverdracht een Darcy-wet volgt en dat de damp die uit de verdamper komt een lage snelheid



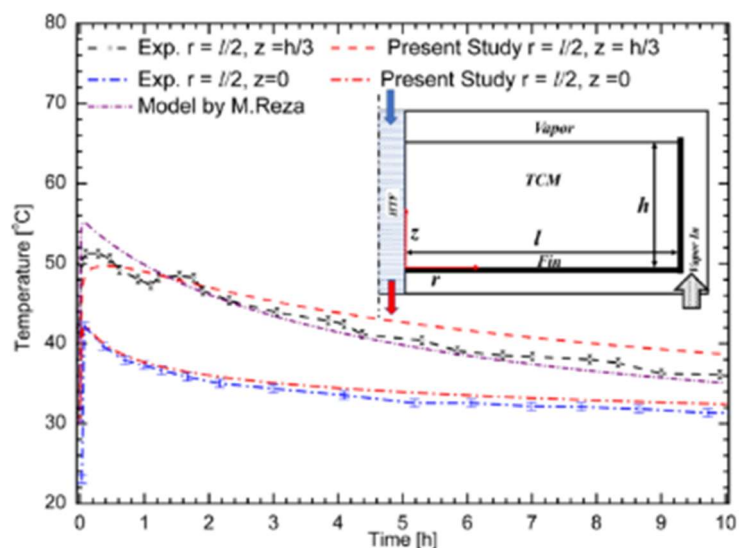
heeft. Onder waterdampsystemen wordt aangenomen dat de totale drukken allemaal waterdampdrukken zijn.

4.3.3 Model validatie van silica gel

Om het ontwikkelde numerieke model toe te passen voor verdere berekeningen, is het nodig om het te valideren met experimentele resultaten. Een van onze projectpartners (RTB de Beijer) had het experimentele onderzoek uitgevoerd om de prestaties van één Epad te evalueren. In het experiment was de bed diameter 0,14 m beschouwd en de hoogte van silicagel Epad is 0,03 m. De verdamper-, begin- en HTF-inlaattemperatuur waren respectievelijk ingesteld op 10 °C, 30 °C en 30 °C. De temperatuurvariatie op twee verschillende hoogtes vanaf de onderste koperen vin was gemeten. Het de / resorptiegedrag van het TCM-bed wordt waargenomen aan de hand van de temperatuur gemeten door thermokoppels die in de TCM-bedden zijn geplaatst. Om één Epad te testen, worden de thermokoppels geplaatst zoals getoond in figuur 15 ($z = 0$ en 10 mm). De temperatuur variatie gemeten door thermokoppels wordt vergeleken met de simulatie resultaten verkregen door het ontwikkelde numerieke model. De experimentele resultaten komen goed overeen met gesimuleerde resultaten, die te zien zijn in figuur 14. De gemiddelde bed temperatuur is ook berekend vanuit het ontwikkelde thermische model en vergeleken met de experimentele resultaten en er is gevonden dat de experimentele en simulatie gemiddelde temperatuurvariatie een goede overeenkomst met elkaar is. Daarom kan het ontwikkelde model voor silicagel van toepassing zijn voor verdere berekeningen. De resultaten van ons numerieke model zijn ook vergeleken met een eerder ontwikkeld numeriek model van M. Reza, dat ook is weergegeven in figuur 16. Het door M. Reza ontwikkelde model houdt geen rekening met de convectieterm in de diffusievergelijking, maar hij vermenigvuldigde de diffusiecoëfficiënt met 100, waardoor het effect van de convectieterm in de diffusievergelijking wordt overwonnen.



Figuur 15 Thermokoppels in de energypad

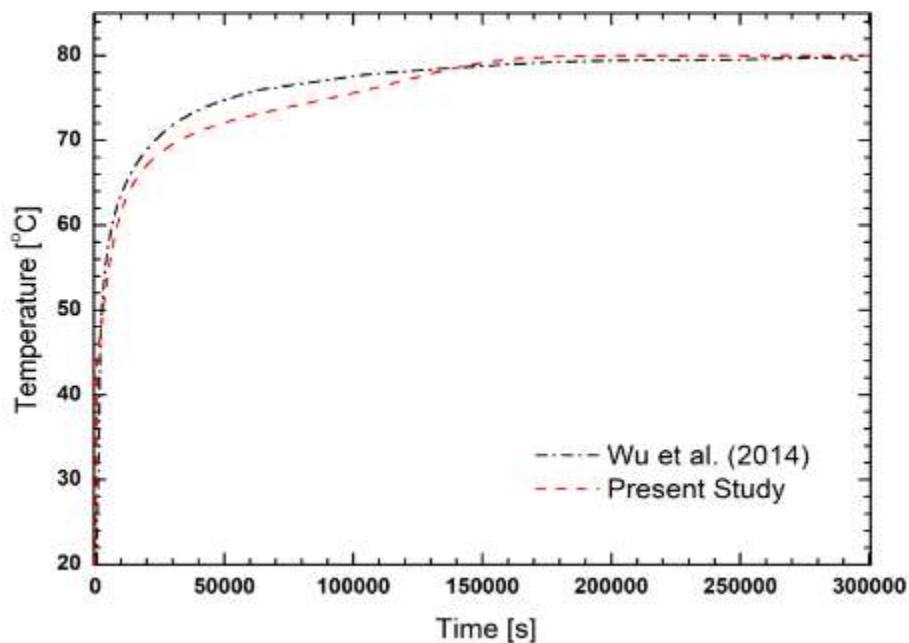


Figuur 14 Vergelijking meet en rekenresultaten

Het ontwikkelde model is gevalideerd met experimentele resultaten verkregen door De Beijer RTB, en ook gevalideerd met de experimentele studie van Wu et al. (2014) [17] (zie figuur 3.4). Wu et al. (2014) [17] hebben een cilindrisch silicagel bed beschouwd van respectievelijk 0,11 m en 0,01 m buitenste en binnenste straal. Aan het buitenoppervlak van het silicagel bed is een watermantel geïnstalleerd die als warmtebron fungeert. Het hete water komt de watermantel binnen en de warmte wordt overgebracht naar het silicagel bed. Aan het binnen oppervlak van silicagel is een condensor met een druk van 2337 [Pa] aangesloten die de waterdamp condenseert. De aanvankelijke druk en temperatuur



zijn respectievelijk 1000 [Pa] en 20 °C. De verwarmings- en koelwatertemperatuur waren respectievelijk 80oC en 20 oC. De warmte die naar het bed wordt getransporteerd, zorgt voor de uitdroging van silicagel en slaat thermische energie op. De temperatuurvariatie bij de straal 100 [mm] werd gemeten met het thermokoppel. De gemeten experimentele temperatuurvariatie wordt vergeleken met de resultaten verkregen door het ontwikkelde thermische model en getoond in figuur 16. De verkregen temperatuurvariatie laat zien dat het TU/e COMSOL model goed overeenkomt met de eerdere experimentele studie van Wu et al. [17]. Zodoende kan het ontwikkelde COMSOL model verder ingezet worden voor berekeningen aan de SWeKOS.



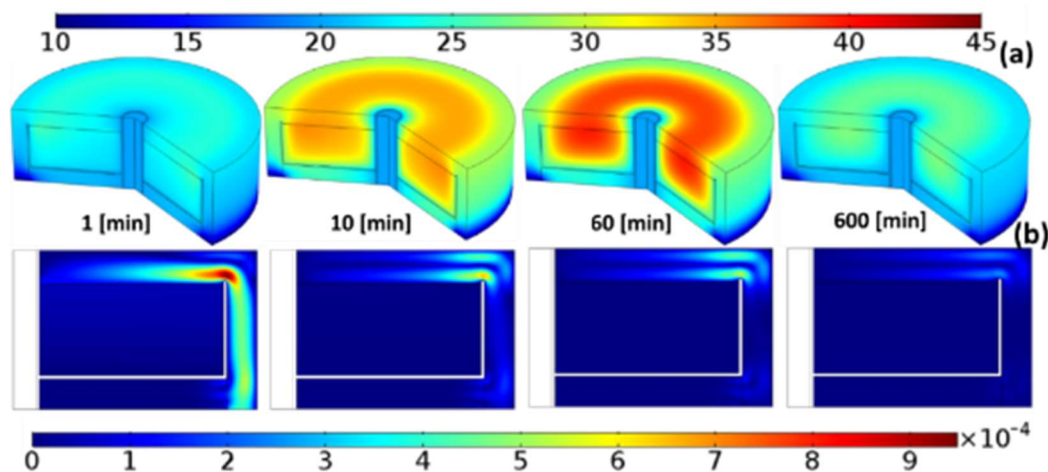
Figuur 16 Model verificatie aan de hand van de experimentele resultaten van Wu et al



4.3.4 Resultaten en analyse

4.3.4.1 *Energypad met Silicagel als werkzame stof*

In de energypad studie [1] is reeds uitgebreid gerapporteerd over de rekenresultaten aan een energypad gevuld met silicagel.. Een aantal typerende rekenresultaten worden hier gegeven. Allereerst wordt in figuur 17 de temperatuur verdeling voor verschillende tijdstippen gegeven.



Figuur 17 (a) De temperatuur verdeling [°C] of Epad op verschillende tijden, (b) snelheidsveld in de Epad op verschillende tijden (2D as- symmetrisch)

De warmte- en massaoverdracht in de Epad is van groot belang en dit fenomeen vindt plaats door de adsorptie van waterdamp in thermochemische materialen. De warmte wordt gegenereerd door de adsorptie van de waterdamp in het bed, waardoor de temperatuur van het systeem stijgt. De temperatuurvariatie van Epad is sterk verbonden via de reactiekinetiek. Figuur 17 (a), (b) laat de berekende temperatuurvariatie en het snelheidsveld van Epad respectievelijk op 1 min], 10 min, 60 min en 600 min zien. Bij 1 min, wat de beginfase is van waterdampbelasting, is de temperatuur van de Epad lager in vergelijking met 10 [min] en 60 [min]. In de beginfase van het laden komt de waterdamp met een hogere snelheid de Epad binnen, zoals weergegeven in figuur 17 (b). Naarmate de tijd vordert, neemt de adsorptiesnelheid van waterdamp met silicagel af, wat het lagere damptransport naar de Epad veroorzaakt, zoals weergegeven in figuur 17 (b) bij 10 min en 60 min. Door de vermindering van de absorptiesnelheid van waterdamp en de extractie van opgewekte warmte door middel van HTF, worden de dampnelheid en temperatuur verlaagd in de Epad.

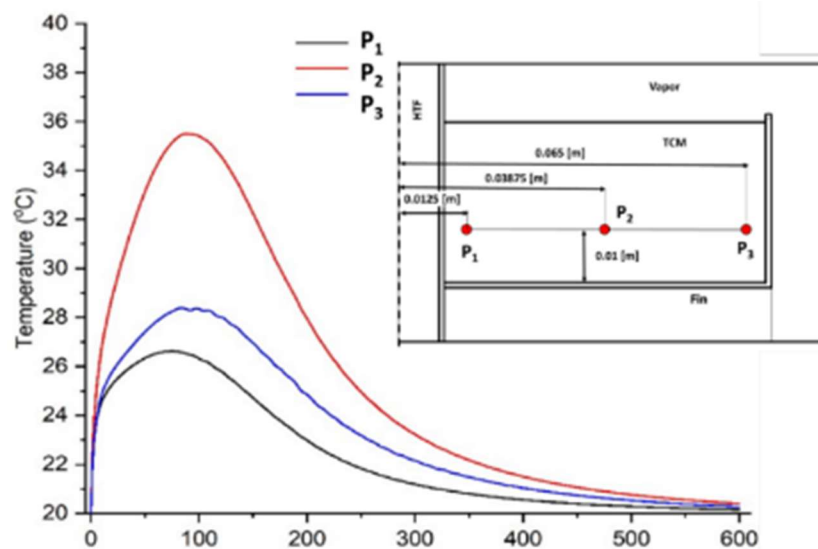
Met het rekenmodel is inzicht verkrijgen in de werking van de energypad in de loop van de tijd. De temperatuurverdeling, de waterdamp concentratie, de afgifte of opname van energie e.d. is als functie van de tijd te berekenen. Dit biedt de mogelijkheid om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren om de belangrijkste van invloed zijn parameters vast te stellen. In hoofdstuk 5.3.3.3 wordt deze gegeven.



4.3.4.2 *Energypad met een thermo chemisch materiaal als werkzame stof*

De reactiekinetiek van zouthydraat is anders dan die van silicagel, daarom zijn de warmte- en massa overdrachtseigenschappen van Epad in beide gevallen verschillend. In dit hoofdstuk worden de temperatuurvariatie, reactievoortgang en vermogen geanalyseerd voor de TCM $\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Dit is voor een energypad uitgevoerd. Tijdens de hydratatie van zout wordt de verdampertemperatuur op 10°C gehouden en de inlaattemperatuur van de warmteoverdrachtfluidum is 20°C . De begintemperatuur en de druk van het bed zijn respectievelijk 20°C en 100 Pa. De numerieke simulatie is voor een periode van 10 uur uitgevoerd voor één Epad.

Figuur 18 toont de temperatuurvariatie in het zouthydraat (TCM) op verschillende meetpunten in de tijd. De temperatuur van het TCM-bed loopt sterk op tot 120 [min] en begint daarna te dalen. De

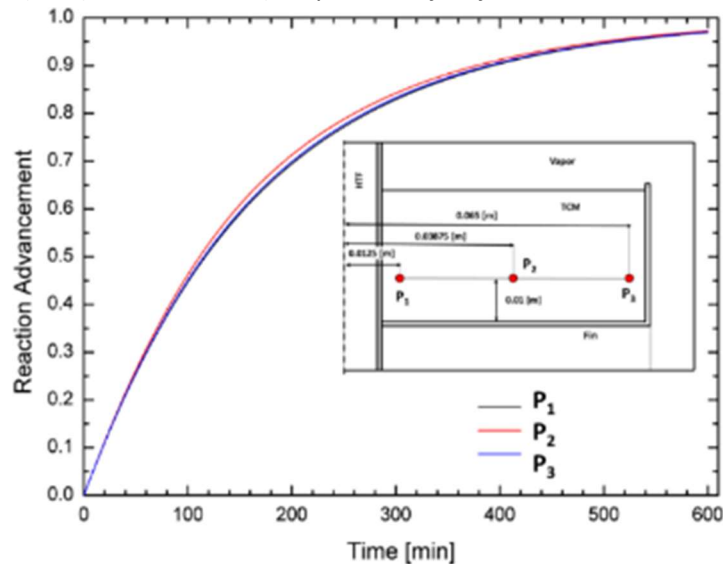


Figuur 18 Temperatuurvariatie in de tijd ter plaatse van de sondes in het zouthydraatbed.

temperatuurvariatie op drie sondepunten, d.w.z. P1, P2 en P3, wordt getoond in figuur 18. De coördinaten van deze sondepunten P1, P2 en P3 zijn respectievelijk (0,0125, 0,01), (0,03875, 0,01) en (0,065, 0,01), wat ook wordt getoond in figuur 18. De maximum temperatuur voor sondepunt P1, P2 en P3 bereikt $26,5^\circ\text{C}$, $35,80^\circ\text{C}$ en $28,27^\circ\text{C}$ bij respectievelijk 85 min, 101 min en 98 min. De temperatuur van het sondepunt P3, dat zich dicht bij de HTF-buis bevindt, is het laagst in vergelijking met P1 en P2 vanwege de warmte die wordt gegenereerd in de TCM op dit punt en gemakkelijk naar de HTF wordt getransporteerd door middel van de koperen vin. Aan het einde van de simulatie is de temperatuur bij de puntsonde P1, P2 en P3 respectievelijk $20,15^\circ\text{C}$, $20,47^\circ\text{C}$ en $20,27^\circ\text{C}$, wat zeer dicht bij de HTF-inlaattemperatuur ligt. Hieruit blijkt dat voor 600 min het vermogen dat wordt verkregen aan de uitgang van HTF bijna hetzelfde is als het vermogen dat wordt opgewekt in de TCM.

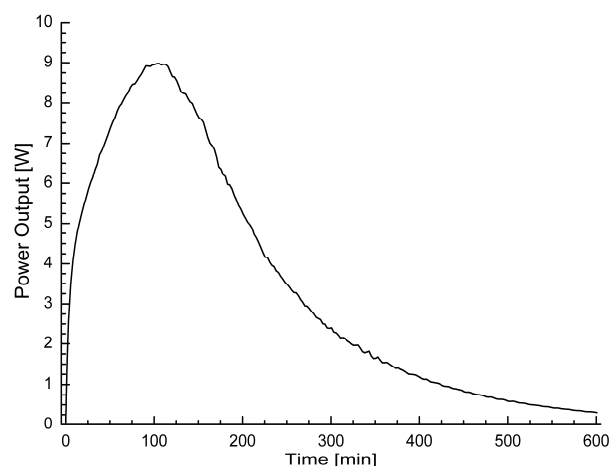


De voortgang van de reactie (α) van de chemische reactie wordt getoond in figuur 19 op verschillende sonde punten. De reactievoortgang α is iets hoger in het midden van Epad en lager bij de vinnen. De waarde van α is 0,96964, 0,97231 en 0,97041 voor puntsonde (0,01176, 0,015), (0,03875, 0,015) en (0,06573, 0,015) respectievelijk bij 600 min.



Figuur 19 Reactievoortgang (α) met de tijd op de locatie van de sondes in het zouthydraat bed

Het vermogen van de warmtegeleidende vloeistof neemt toe naarmate de tijd toeneemt tot 113 [min] en begint daarna geleidelijk af te nemen. Het maximale uitgangsvermogen bereikt de waarde van 8,95 [W] bij 113 [min] en begint daarna geleidelijk af te nemen en bereikt de waarde van 0,30 [W] bij 600 [min].



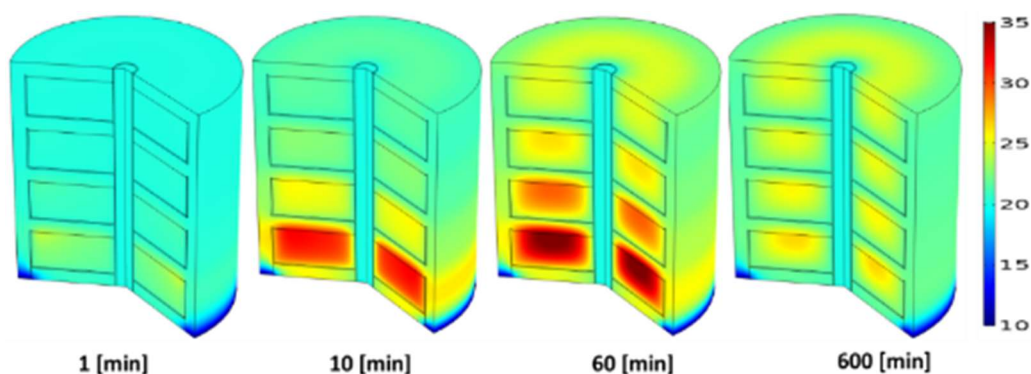
Figuur 20 Uitgangsvermogen van warmteoverdrachtsvloeistof met de tijd voor één Epad zouthydraat



4.3.4.4 Rekenresultaten SWeKOS met meerdere energypads

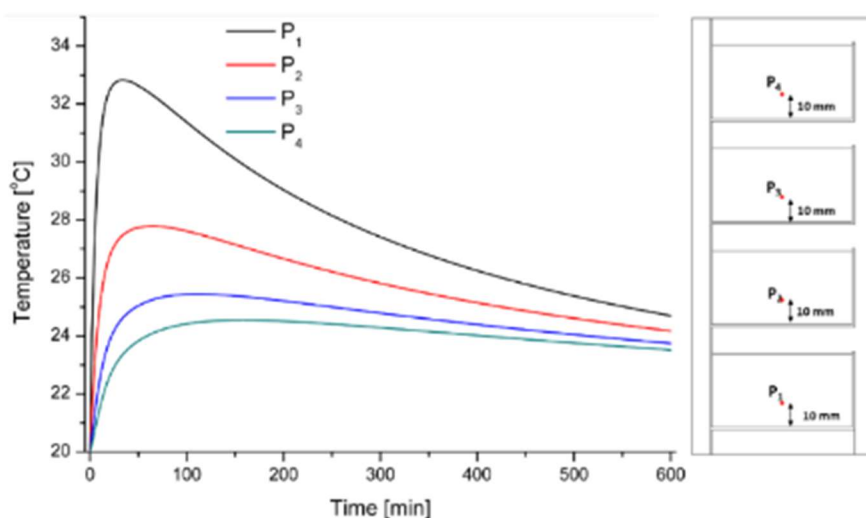
Er is een rekenstudie uitgevoerd met een systeem opgebouwd uit meerder energypads voor de 600 [min]. De resultaten worden gepresenteerd als plaatjes van de het temperatuur profiel, profiel van de concentratie van waterdamp en het genormaliseerde vermogen. In totaal zijn 4 Epads met elkaar z verbonden en vanaf de onderkant van de Epad in het systeem wordt de waterdamp geïnjecteerd. De warmteoverdrachtsvloeistoffen komen binnen via de bovenkant van de HTF-buis en het vermogen wordt berekend aan de onderkant van de HTF.

Figuur 21 geeft de kleurcontour weer van temperatuurvariatie van meerdere Epad op 1 min, 10 min], 60 min en 600 min. De temperatuur van Epad begint te dalen van onder naar boven Epads als de verdamer aan het onderoppervlak is bevestigd, daarom is de concentratie van de waterdamp hoog in de bodem, wat een hogere reactiesnelheid in de onderste vin veroorzaakt. De temperatuur in de Epad stijgt tot een bepaalde tijd en begint te dalen vanwege de afname van de silicagel.



Figuur 21 Temperatuurvariatie in de meerdere Epad op verschillende tijdstippen.

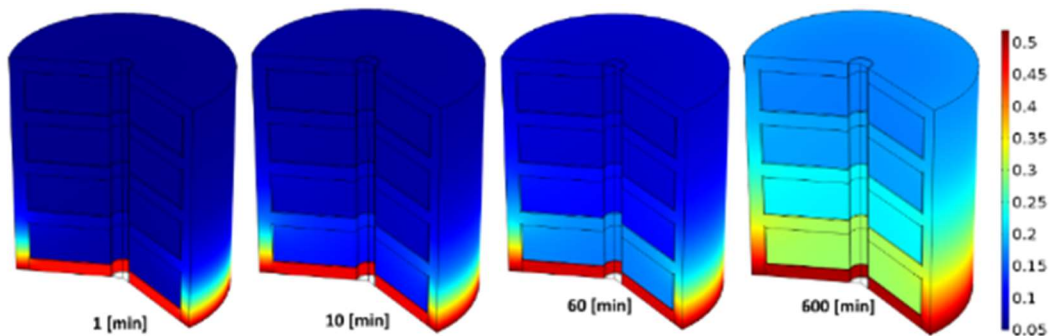
De temperatuurvariatie op 4 verschillende sondepunten in meerdere Epad configuraties wordt getoond in figuur 23. De temperatuur op het probepunt P₁ wordt sterk verhoogd tot zijn maximale waarde en begint met de tijd af te nemen. Evenzo bereikt het voor andere probepunten zijn piekwaarde en begint dan te dalen, maar de helling van de temperatuurcurve is lager. Dit komt door de grotere hoeveelheid waterdamp die in het onderste Epad reageert, verder neemt de hoeveelheid waterdamp die in het bovenste gebied bereikt af.



Figuur 22 De temperatuurvariatie op verschillende probepunten in de tijd

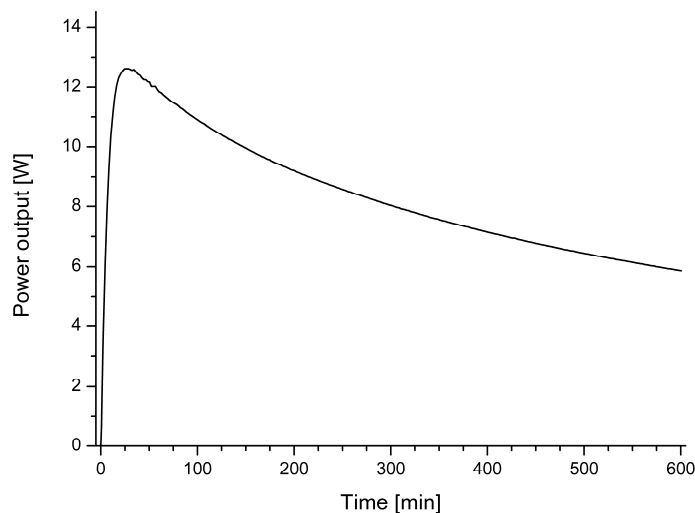


Figuur 24 geeft de kleurcontour weer van de waterdampconcentratie in meerdere Epad-configuraties op verschillende tijdstippen. Het transport van waterdamp in de energypad is te wijten aan de drukgradiënt die wordt veroorzaakt door de adsorptie van waterdamp door silicagel en diffusie op zichzelf. Daarom is de waterdampconcentratie maximaal bij de inlaat en neemt deze af naar de hoogte van de Multiple Epad-configuratie. De concentratie in de configuratie met meerdere energie-kussens op verschillende sondepunten is ook berekend. Bij het openen van de verdamperklep neemt de waterdampconcentratie gedurende een bepaalde tijd sterk toe en wordt daarna geleidelijk. De oplopende volgorde van waterdampconcentratie op verschillende probepunten is $P4 < P3 < P2 < P1$.



Figuur 23 Waterdampconcentratie in de meervoudige Epad op verschillende tijdstippen

Figuur 23 laat de kleurcontourgrafiek van waterdampbelasting zien op verschillende tijdstippen, d.w.z. 1 min, 10 min, 60 min] en 600 min. Uit deze figuur is te zien dat de belasting van waterdamp in elke Epad toeneemt met een toename in tijd, omdat de waarde hoger is in het lagere energypad in vergelijking met de hogere.



Figuur 24 HTF-uitgangsvermogen voor meerdere Epads in de tijd

Figuur 24 toont de variatie van het HTF-uitgangsvermogen in de tijd. Het uitgangsvermogen kenmerk is hetzelfde als voor 1 Epad-configuratie; de grootte wordt echter gewijzigd voor meerdere Epad-configuraties. Het uitgangsvermogen is afhankelijk van het aantal bijgevoegde Epads.

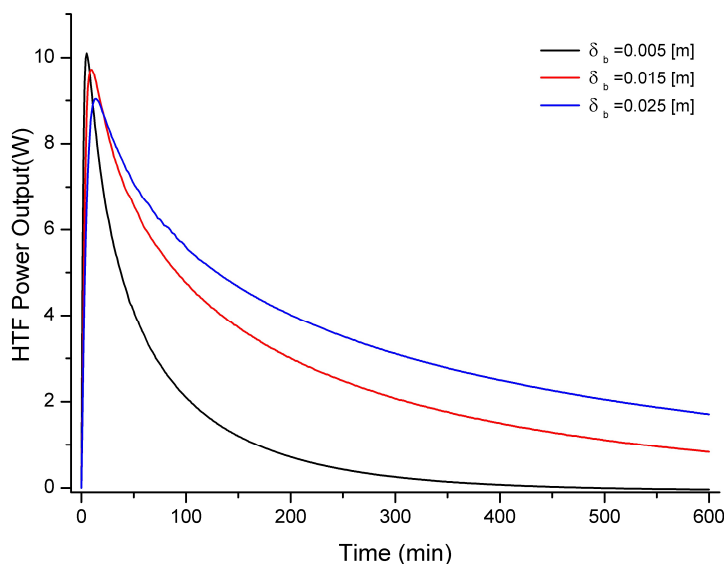


4.3.4.4 Gevoeligheid analyse Energypad

Er is een parametrische studie is uitgevoerd om een gevoeligheidsanalyse van de energypad te bepalen. Het onderzoek is uitgevoerd voor de verschillende diktes van het bed van de werkzame stof, energypad diameters, thermische geleidbaarheid van de TCM en openingsruimte tussen de energypads onderling en de wand van het vat. De begin- en randvoorwaarden zijn voor alle gevallen gelijk.

a. Effect van bed dikte

Figuur 25 geeft de variatie weer van het HTF-uitgangsvermogen voor drie verschillende bed diktes, d.w.z. 0,005 m, 0,015 m en 0,025 m met een bed diameter van 0,14 m. Het uitgangsvermogen van HTF bereikt snel zijn maximale waarde in de beginfase van de reactie voor alle drie-bed diktes. Het piekvermogen van HTF is maximaal voor de laagste bed dikte, d.w.z. voor 0,005 m en minimum voor de hoogste bed dikte, d.w.z. 0,025 m]. Vanwege de lagere bed dikte van de TCM, reageerde de grotere hoeveelheid waterdamp met de TCM nabij de koperen vin, wat de hogere warmteontwikkeling bij de koperen vin veroorzaakt. De geproduceerde warmte nabij de vin kan gemakkelijk naar de HTF worden getransporteerd, die een hoger piekvermogen produceert. Met de vermindering van de bed dikte neemt het volume silicagelmateriaal af, wat een lagere warmteopslagcapaciteit van het energiekussen veroorzaakt. Door de vermindering van het bed volume wordt het vermogen na een bepaalde tijd hoger voor de grotere bed dikte en lager voor een lagere bed dikte, zoals weergegeven in figuur 25. Voor de lagere bed dikte van TCM wordt het HTF-uitgangsvermogen nul in de kortere tijdsduur, maar het duurt het langst voor de hoogste dikte van TCM.

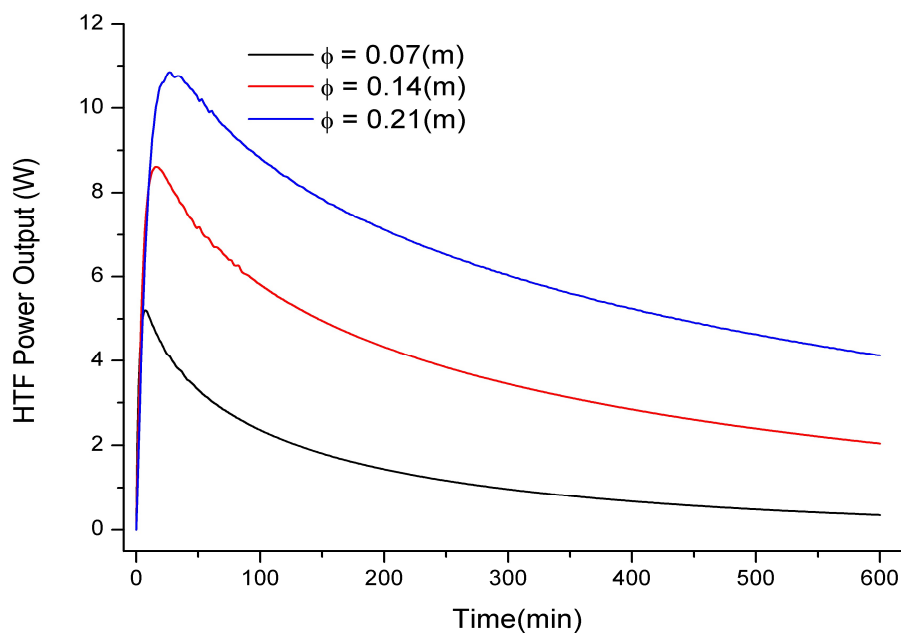


Figuur 25 Het vermogen van HTF voor drie verschillende bed diktes in de tijd



B. Effect van bed diameter

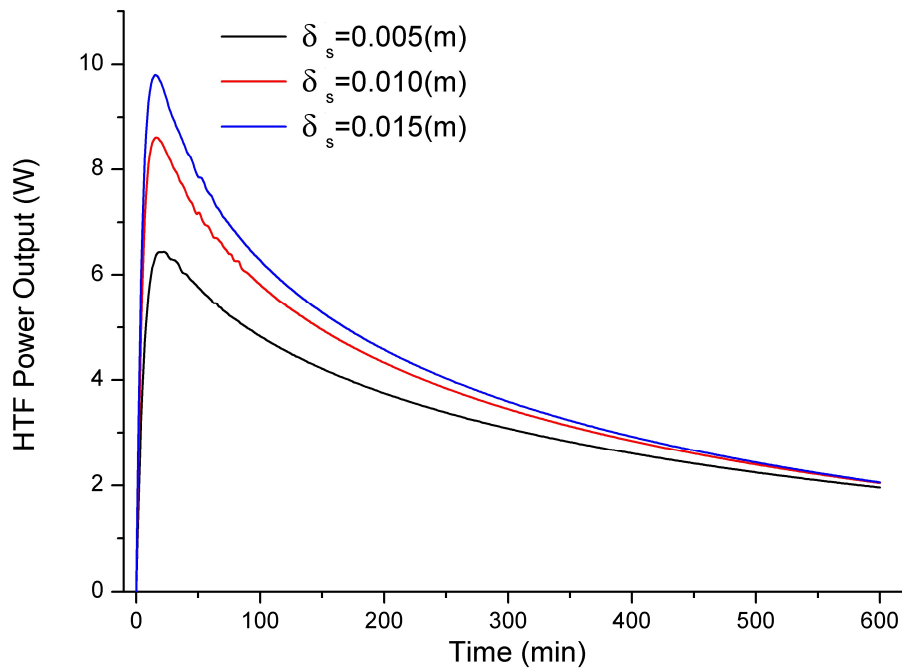
De berekeningen zijn uitgevoerd voor de drie verschillende bed diameters, d.w.z. 0,07 m, 0,14 m, 0,21 m met een bed dikte van 0,03 m. Figuur 26 toont het effect van de bed diameter op het vermogen van HTF in de tijd. Het vermogen van HTF wordt verhoogd met een toename van de bed diameter. Dit komt door de grotere massa opslagmateriaal met een grotere diameter. Na het bereiken van de maximale waarde van het uitgangsvermogen begint het sterk af te nemen met de tijd en geleidelijk te worden naarmate de tijd toeneemt.



Figuur 26 Het vermogen van HTF voor drie verschillende bed diameters in de tijd

C. Effect van het uit elkaar plaatsen van het openen

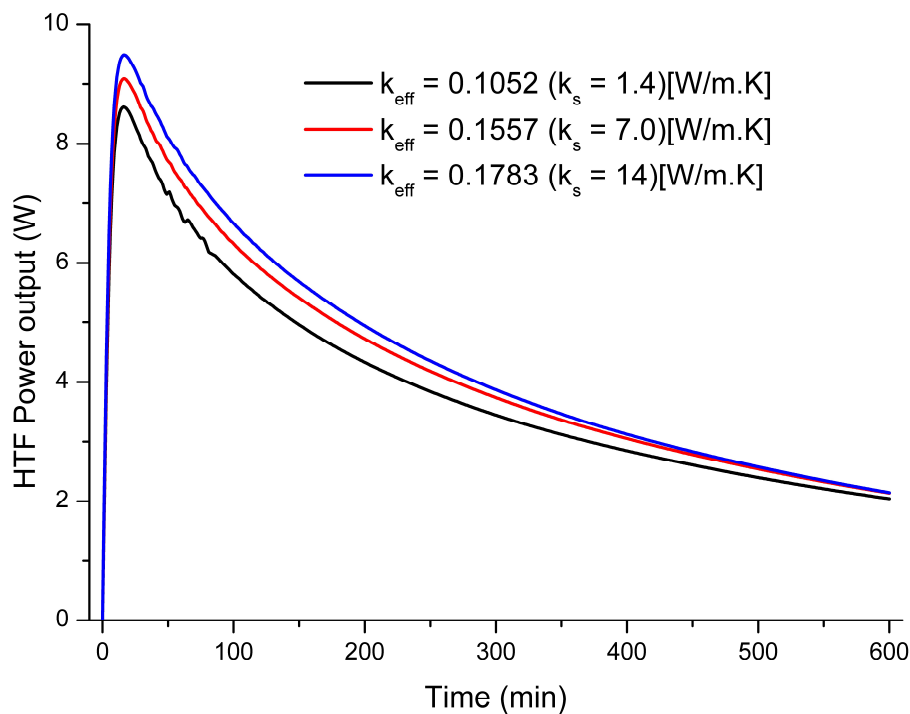
De afstand tussen de twee Epads beïnvloedt het waterdamp transport en daardoor het uitgangsvermogen van HTF. Fig. 4.13 toont de variatie van het uitgangsvermogen van HTF voor drie afstanden tussen Epads, d.w.z. 0,005 m, 0,010 m en 0,015 m met een bed diameter. 0,14 m en dikte 0,03 m. Voor de grotere afstand tussen de Epads is het piekvermogen hoger, wat te zien is in Fig. 4.13. Na enige tijd is het uitgangsvermogen echter hoger voor kleinere tussenruimten. Dit komt door de grotere hoeveelheid waterdamp die reageert met TCM-materiaal wanneer er grotere afstanden zijn en een hogere warmte-energie produceert.



Figuur 27 Het uitgangsvermogen van HTF voor drie verschillende afstanden tussen Epad

D Effect van thermische geleidbaarheid van Solid TCM

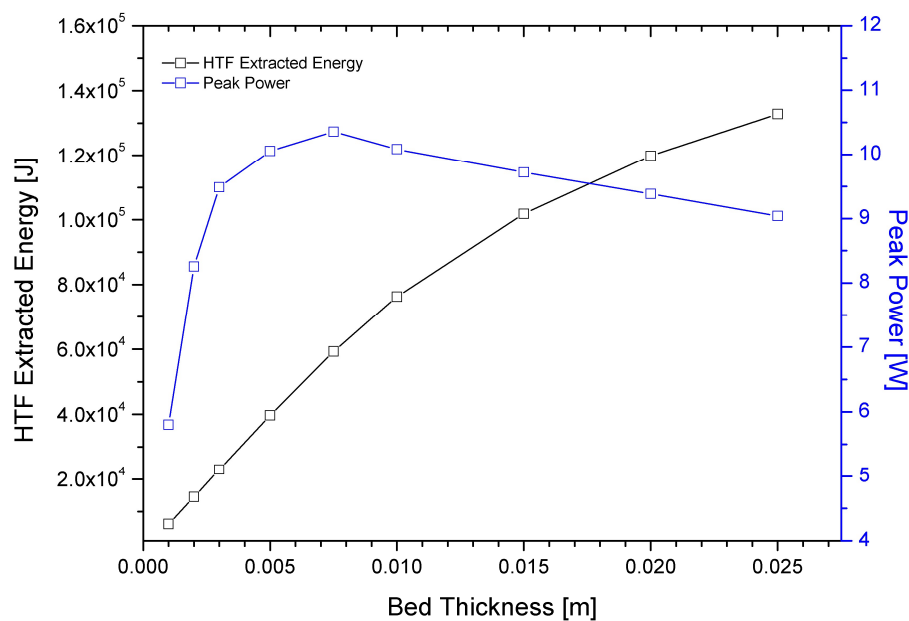
De thermische geleidbaarheid van vaste silicagel heeft ook invloed op de prestaties van Epad. Figuur 28 geeft de variatie weer van het uitgangsvermogen van één Epad met een bed dikte van 0,03 m bij drie thermische geleidbaarheid van vaste silicagel. Uit figuur 28 wordt het maximale piekvermogen verkregen met de hogere thermische geleidbaarheid en het neemt af met een afname van de thermische geleidbaarheid. Na een bepaalde tijd is het uitgangsvermogen echter hoger voor een lagere thermische geleidbaarheid en lager voor een hogere thermische geleidbaarheid. Uit de figuur blijkt duidelijk dat de hoger thermisch geleidende silicagel meer vermogen produceert in een kortere tijdsduur in vergelijking met lager thermisch geleidende silicagel. Daarom verbetert de hoger thermisch geleidende silicagel de prestaties van Epad.



Figuur 28 Het uitgangsvermogen van HTF voor drie verschillende thermische geleidbaarheid van silicagel.

E Variatie van gewonnen energie en piekvermogen met bed dikte

De HTF-energie en het piekvermogen met de verschillende diktes van de silicagel laag worden getoond in figuur 29 gedurende 600 minuten. In deze studie zijn de bed diameter en de opening van de ruimte 0,14 m en 0,010 m. De energieopbrengst van de HTF zal toenemen met een toename van de bed dikte naarmate de massa van de silicagel toeneemt. Het piekvermogen van de HTF neemt toe tot 0,0075 m bed dikte en begint daarna af te nemen. De reden voor een lager piekvermogen bij een lagere bed dikte van silicagel is de lage warmtecapaciteit van Epad, die niet genoeg warmte produceert die de temperatuur van de koperen vin kan verhogen. Als de bed dikte toeneemt, neemt ook de warmte die in het bed wordt gegenereerd toe, waardoor de temperatuur van de koperen lamellen toeneemt en de warmte die naar de HTF wordt getransporteerd ook toeneemt, daarom is het piekvermogen hoger voor een grotere bed dikte. Vanwege de lagere warmteoverdracht van silicagel naar koper vin, begint het piekvermogen af te nemen na een bepaalde bed dikte. De optimale bed dikte die het maximale piekvermogen produceert, hangt af van de geometrie van de Epad, de bedrijfsomstandigheden en de thermo fysische eigenschappen van de silicagel.



Figuur 29 De variatie van energie en piekvermogen met een silicagel laag

CONCLUSIE COMSOL rekenmodel

Het ontwikkelde numerieke rekenmodel is met succes gevalideerd met experimentele resultaten van de metingen bij De Beijer RTB en literatuur voor silicagel. Het model is ook gevalideerd met de literatuur voor de reactievoortgang van $\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor één Epad van silicagel om het effect van bed dikte, bed diameter, openingsruimte, de thermische geleidbaarheid van vaste silicagel te onderzoeken. Uit de gevoeligheidsanalyse zijn de volgende resultaten verkregen: (i) de hogere bed dikte leidt tot een lager piekvermogen, (ii) de grotere bed diameter leidt tot een hoger piekvermogen, (iii) de hogere opening ruimte leidt tot een hoger piekvermogen omdat er een lagere weerstand is voor damptransport in het vacuüm, (iv) de hogere thermische geleidbaarheid van vaste silicagel leidt tot een hoger piekvermogen. De variatie van onttrokken energie en piekvermogen met bed dikte is ook onderzocht en er werd vastgesteld dat de onttrokken energie toeneemt met een toename van de bed dikte, maar het piekvermogen is maximaal bij een bepaalde bed dikte die afhangt van de bedrijfsomstandigheden en thermo fysische eigenschappen van silicagel. Het onderzoek is ook uitgevoerd voor de volledige cyclus, d.w.z. hydratatie en uitdroging van silicagel en zouthydraat. De numerieke simulatie is ook uitgevoerd voor een systeem met meerdere Epad van silicagel. Het in ontwikkeling zijnde COMSOL rekenmodel wordt ingezet voor de verdere optimalisatie van het SWeKOS concept. Dit zal de basis vormen voor een ontwerphulpmiddel. Dit wordt in het SWeKOS 2 project verder vormgegeven



4.4 Ontwerp, bouw en test marktconform concept SWeKOS

4.4.1. Ontwerp van het complete concept systeem

Het systeem moet toepasbaar zijn voor lage temperatuur ($<40^{\circ}\text{C}$) en midden temperatuur (40°C - 60°C) verwarmingssystemen. Daarnaast moet de warmte zich in de ruimte kunnen afstaan aan de lucht doormiddel van radiatoren, vloerverwarming of combinatie van beide.

Er wordt gebruik wordt gemaakt van 4 modules die gevuld zijn met silicagel als sorptiemateriaal.

Doordat iedere module een maximale opslagcapaciteit van 2 kWh heeft zal er een totale opslagcapaciteit zijn van 8 kWh. De modules worden uitgevoerd zoals in hoofdstuk 4.2 is omschreven. Iedere module bezit daarmee in totaal 4 hydraulische connecties (2 in/uit gaande voor de reactor en 2 in/uitgaande voor de condensor/verdamer).

Lage temperatuur warm water wordt geleverd door de interne vacuümklep te openen en een duurzame warmtebron, zoals buitenlucht temperatuur (dry cooler), op de verdamer te zetten. Door het verdampingsproces zal het waterdamp op het silicagel gaan condenseren, en zal er condensatiewarmte vrijkomen in de reactor. Dit levert een temperatuurverhoging op dat in de range zit van lage temperatuur warmte ($>30^{\circ}\text{C} \leq 50^{\circ}\text{C}$).

Het totale systeem moet in staat te zijn om meerdere functies tegelijk uit te kunnen voeren. Dit betekent dat er meerdere modules tegelijk geladen kunnen worden terwijl een andere module koud water aan het produceren is. Zelfde geldt voor dat er twee modules werkzaam zijn om hoge temperatuur warm water te produceren terwijl de overige 2 modules lage temperatuur warm water aan het produceren zijn.

De aansturing van het systeem zal in deze fase van het project met Labview uitgevoerd worden.

Hierbij zal de automatisering tot een basisniveau worden gebracht. Dit betekent dat er per module een status gedefinieerd kan worden; laden/ tapwater/ LT-verwarming/ koeling, en dat vervolgens de kleppen op de juiste manier geactiveerd worden.

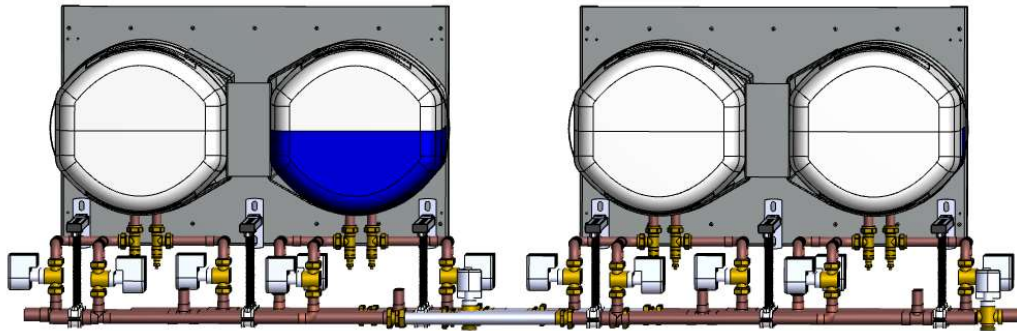
Rekening houdende met de gelijktijdigheideisen zullen er meerdere hydraulische circuits benodigd zijn. Kortweg betekent dit een circuit voor Hoge laad temperatuur; Tapwater; LT-verwarming; Koeling.

Het systeem dient d.m.v. een palletwagen verplaatsbaar te zijn. Daarnaast dient het systeem zo compact en robuust mogelijk met standaard componenten samengesteld en gebouwd te worden.

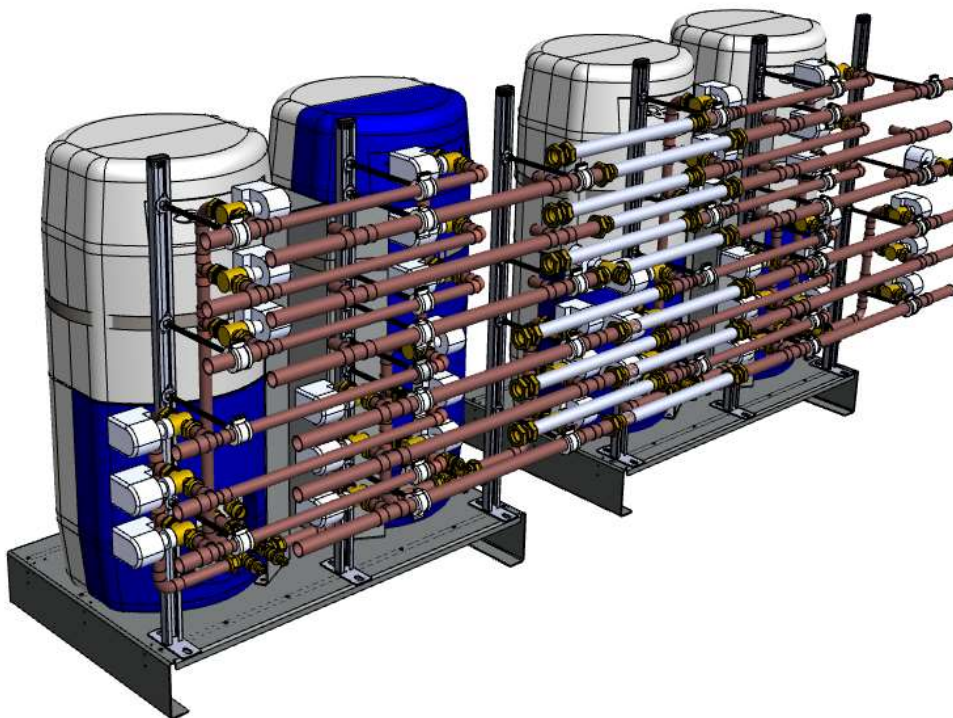
De figuren 30 en 31 tonen het 3D aanzicht en bovenaanzicht van de ontworpen SWeKOS testopstelling. Hierin zijn de 4 modules te zien die doormiddel van leidingwerk aan hydraulisch aangesloten zijn. Hierbij is ook te zien dat de volledige opstelling bestaat uit 2 skid's die doormiddel



van flexibele slangen het hydraulische circuit verbinden.



Figuur 30 Boven aanzicht van het SWeKOS systeem met vier modules



Figuur 31 Aanzicht van het complete SWeKOS systeem.

4.4.2 Realisatie complete SWeKOS systeem

In de onderstaande figuur 32 is de gerealiseerde testopstelling met het concept SWeKOS systeem te zien, inclusief testbord en besturingskast te zien. Hierbij is het duidelijk dat de opstelling uit 2 skid's bestaat die doormiddel van flexibele slangen elkaar hydraulisch verbinden. De benodigde dry cooler is indirect via het testbord aangesloten. Buiten het gebouw staat een 45kW dry cooler die een 300L buffervat op temperatuur brengt. Het testbord is hierdoor dus indirect met de dry cooler verbonden.



Figuur 32 Realisatie complete systeem

4.4.3 Regel- en opslagstrategieën

Om het SWeKOS testbord de benodigde functies uit te laten oefenen is er een basis regelstrategie ontworpen. Hieronder worden de strategieën in combinatie met de scenario's verder uitgelegd.

Laden

Wanneer het scenario "laden" geactiveerd wordt er gezorgd dat de reactor van de desbetreffende module op hoge temperatuur gebracht wordt. Door gelijktijdig de condensor te koppelen met een lage temperatuur bron (in dit geval een dry cooler die de waterstroom afkoelt naar omgevingslucht



temperatuur) en de interne vacuümklep te openen, zal het dehydratatie proces gestart worden. De waterdamp zal uit het reactorpakket verdampen en condenseren op de condensor. Het laden is gereed wanneer het temperatuurverschil tussen de in- en uitgaande waterstroom kleiner is dan 2°C. Dit is dan het teken het reactorpakket nog maar een minimale hoeveelheid warmte aan het hydraulisch circuit onttrekt. Op dat moment zal de interne vacuümklep sluiten waardoor het opslagpotentieel behouden blijft. In het basis ontwerp zit er ook een maximale laadtemperatuur verwerkt van 1200 seconden. Dit is overigens een eerste voorstel voor een tijdsbeperking die voortkomt uit het regelgedrag van het product SolabChiller van het bedrijf SolabCool b.v. Hierbij is er uitgegaan van het scenario dat er minimaal 70°C water wordt toegevoerd en een condensor temperatuur van <27°C gehanteerd wordt. In een latere fase zou dit geoptimaliseerd kunnen worden door een dynamisch model te ontwikkelen dat gekoppeld is aan de toegevoerde laad temperatuur. Dit is zeker benodigd wanneer de warmteproductie van de warmteopwekker sterk kan fluctueren.

Ontladen

In het ontladen, het genereren van de hydratatiereactie, zijn er meerdere scenario's mogelijk, bijvoorbeeld; Lage temperatuur verwarming, Koeling, hoge temperatuur tapwater. Hieronder worden ze verder toegelicht.

Lage temperatuurverwarming

Bij aanvang van dit scenario dient de module volledig geladen te zijn. Dit betekent dat het geladen is en dat de vacuümklep gesloten is. Bij de activatie van het lage temperatuurverwarming scenario wordt de warmte uit de buitenlucht gebruikt (verkregen via de dry cooler) om het verdampingsproces op te starten. De verdamper zal dan ook eerst op temperatuur gebracht worden. Vervolgens zal de vacuümklep geopend worden zodat de damp bij het reactorpakket kan komen, en de hydratatiereactie opgestart gaat worden. Al gevolg van de hydratatiereactie zal het reactorpakket opwarmen. Deze warmte wordt afgevoerd met als doel lage temperatuur verwarming. Met behulp van een variabele volumestroom zal de gewenste uitgaande temperatuur naar de setpoint geregeld worden. Indien de uitgaande temperatuur 25% ernaast zit, zal het ontladen van de des betreffende module stopgezet worden. Indien de vraag voor warmte nog actief is, zal de eerstvolgende module de functie overnemen.

Koeling

Bij aanvang van dit scenario dient de module volledig geladen te zijn. Bij het activeren van het koelscenario wordt het reactorpakket aan de dry cooler gekoppeld. Hierdoor wordt de warmte die vrijkomt uit de hydratatiereactie naar de buitenlucht afgevoerd. De warmte voor verdamping zal onttrokken worden uit het koelcircuit waardoor er koeling ontstaat. Indien de uitgaande temperatuur 15% ernaast zit, zal het ontladen van de des betreffende module stopgezet worden. Indien de vraag voor koeling nog actief is, zal de eest volgende module de functie overnemen.

Hoge temperatuur tapwater

Hoge temperatuur tapwater ontstaat door twee modules tegelijkertijd te laten ontladen en in serie te zetten. Dit betekent dat de hydratatie reactiewarmte van module 1 gebruikt wordt als verdampingswarmte bij de 2^e module. Hierdoor zal de verdamping in de 2^e module op een hogere temperatuur plaatsvinden, waardoor er een hogere reactie temperatuur bereikt kan worden. De verdampingswarmte voor de eerste module is afkomstig vanuit de dry cooler. Als de uitgaande hoge temperatuur 5 graden onder het gewenste setpoint ligt, zal de volgende set modules de gevraagde functie overnemen.



4.4.4 Deeltesten complete systeem

Voordat het complete systeem inclusief regeling getest wordt zijn de van belang zijnde deeltesten uitgevoerd. Hier worden de resultaten van de controles gegeven. Deze controles betreffen:

- Controle vacuüm van de opslagvaten
- Controle werking afsluiter en regelkleppen
- Controle werking van de regeling
- Controle van goede werking en aansluiting leidingen

Het systeem is visueel geïnspecteerd. Hierbij is op een aantal plekken oxidatie van de koperen leidingen geconstateerd. Dit duidt op lekkages in de soldeerverbindingen, bij het vullen en op druk brengen van het hydraulische systeem zal worden ingeschat of er reparaties nodig zijn.

Ten tweede is de onderdruk in de modules gemeten. Uit onderzoek is gebleken dat er geen niet-condenseerbare gassen in de modules aanwezig waren. De prestaties van de modules zijn in één jaar tijd meerdere malen gemeten en deze bleven op een constant niveau.

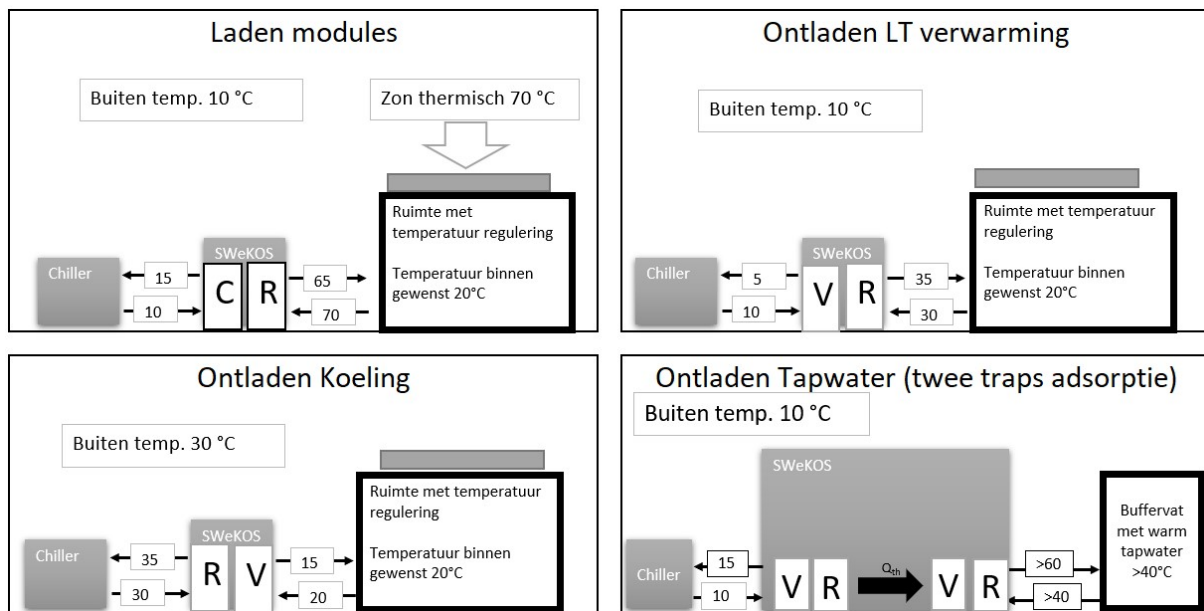
Bij het waterzijdig vullen en ontluchten is geconstateerd dat een aantal soldeerverbindingen lekken. De lekkages zijn minimaal en zullen de metingen niet beïnvloeden. Er lekt ongeveer 10 gram per uur per verbinding, terwijl een debiet is ingesteld van 1000 kg per uur. Dit geeft een afwijking van 0,001% en dit valt binnen de meetfout van de debietmeters en temperatuursensoren.

De regeling van de 2-weg kleppen, 3-weg kleppen en pompen op basis van de temperatuursensoren functioneerde naar behoren. Het schakelen tussen de verschillende modi werkte zoals verwacht, de gewenste temperatuur niveaus werden bereikt, het ingestelde en gewenste debiet werd bereikt in alle modules.

4.4.5 Testen complete systeem

Het oorspronkelijke plan in het SWeKOS project was het testen van het concept SWeKOS systeem in de emulator bij TNO. Het gerealiseerde systeem bleek echter veel te complex en dus ook te kostbaar om in deze vorm als concept marktsysteem te dienen. Daarom is besloten om een vereenvoudiging in de regeling en sturing te gaan toepassen bij het her ontwerp. Het complete concept systeem is in de testopstelling bij de Beijer RTB beproefd op de essentiële functionaliteit (figuur 34). De emulator bij TNO is binnen dit project aangepast om in het vervolg traject (SWeKOS 2) een compleet systeem onder realistische gesimuleerde praktijkconditie te kunnen testen. In hoofdstuk 4.4.X is de emulator beschreven.

Het testplan is opgesteld op basis van de werking van de thermochemische warmtepomp, de praktijksituaties waarin de thermochemische warmtepomp als energieopslag gaat functioneren en de mogelijkheden van de testopstelling. Het systeem is getest voor de praktijksituaties zoals gepresenteerd in figuur 34. De ingestelde temperaturen en volumestromen zijn gekozen op basis van de uiteindelijke praktijksituaties waarin SWeKOS zal functioneren. Het SWeKOS systeem is na de inspectie aangesloten op het meetbord en het hydraulische systeem. De vijf verschillende modi worden getest. Er wordt achtereenvolgens energie opgeslagen, gekoeld (ontladen koelen), lage temperatuur warmte geleverd (ontladen LTV), tapwater geleverd (O.HTT) en ten slotte wordt de opslag modus ingesteld. De testen zullen vervolgens de regel strategie worden uitgevoerd.



Figuur 33 Overzicht praktijksituaties waarin SWeKOS actief zal zijn.



Figuur 34 SWeKOS systeem in testopstelling bij de Beijer RTB

Er worden vijf functies voor het systeem onderscheiden. Dit zijn laden (energie opslaan), ontladen koeling, ontladen lage temperatuur verwarming en levering tapwater en energie in opslag houden. In hoofdlijnen voldoet het concept SWeKOS systeem aan de verwachtingen. De 4 modules leveren tezamen de gespecificeerde vermogens en capaciteiten. In figuur 3 zijn de verwachte specificaties gegeven.

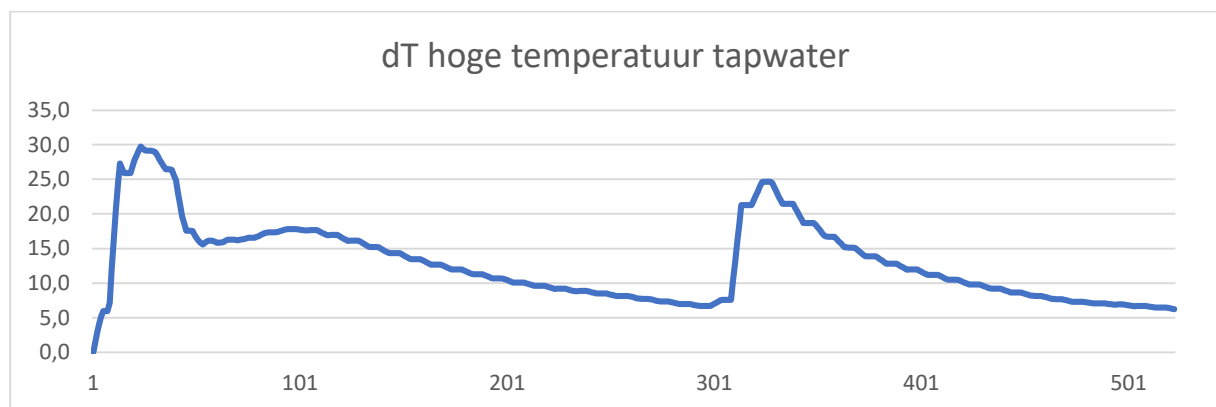
Bij het laden wordt een gemiddeld vermogen van 7,77 kW thermische energie opgeslagen per module. Er is een capaciteit van 1,9 kWh beschikbaar per module, waarmee de totale systeem capaciteit op 7,6 kWh komt.



SWeKOS voldoet aan de verwachtingen en levert koeling op een gemiddeld temperatuur niveau van 17°C. De koelcapaciteit van het systeem ligt in de lijn der verwachting op 7,6 kWh.

Elke module heeft de ontwerp vermogens en capaciteiten geleverd ten aanzien van de lage temperatuur verwarming. Het vermogen per module ligt op $\pm 44 \text{ Wh/L}_{\text{module}}$. Hierbij is L_{module} het interne volume van de reactor en condensor/verdamper behuizing. Met een totale capaciteit van 1,9kWh per module. De totale capaciteit van het systeem komt daarmee op 7,6 kWh.

De demonstratieopstelling van SWeKOS kan door middel van een tweetraps cyclus een hogere uitstroomtemperatuur creëren waarmee warm tapwater kan worden bereid. Het geleverde vermogen heeft een sterk verloop door de relatief grote waterdamp drukverschillen in de module. De drukverschillen zijn sterk afhankelijk van de ingestelde aanvoertemperaturen en volumestromen bij de verdamper en de reactor. Duidelijk is dat er een tapwater buffer kan worden geladen met een thermochemisch opslagsysteem. In dit geval is er een gemiddeld vermogen van 7,3 kW geleverd voor een periode van 8 minuten.. In 37 is de delta T te zien waarmee het warm tapwater kan worden geleverd.



Figuur 35 Temperatuurstap hoge temperatuur tapwater bij ontladen van twee modules (°C) als functie van de tijd [sec].

De opslag van energie functioneert zoals verwacht. De kleppen sluiten de reactorkamer en de condensor/verdamper kamer af. Dit biedt de mogelijkheid om voor een langere periode energie op te slaan. Zoals beschreven is er nauwelijks isolatiemateriaal aan de opstelling toegevoegd. Hierdoor zullen de verliezen relatief groot zijn. De energiedichtheid van silicagel is te laag om commercieel in de markt te worden gezet. Bij het SWeKOS 2 project zal de stap naar een effectievere TCM worden gemaakt.

Tijdens de beproeving in de meetopstelling is ook de samenwerking van de elektronica en mechanische componenten getest. Er is gekeken of het mogelijk is om gelijktijdig een module te laden terwijl een andere module kan worden ontladen in een modus (lage temperatuur verwarming, koeling, hoge temperatuur tapwater). De gebruikte regel strategieën zijn getoetst onder lab condities met positieve resultaten. Echter, de kostprijs en complexiteit van dit stuur en regelsysteem zijn hoog. Daarom zullen de geleerde lessen worden meegenomen in de ontwikkeling van een regeling voor het SWeKOS 2 systeem. In deze regeling wordt vereenvoudiging doorgezet vermindering van de temperatuursensoren en regelkleppen. Dit zal een aanzienlijke kostprijs verlaging opleveren.



Conclusie

De conclusie van de testen is dat de 4 modules presteren zoals verwacht. Er wordt een gemiddeld vermogen van 5,4 kW en een capaciteit van 1,9 kWh per module gemeten. De regeling en schakeling van de kleppen, pompen op basis van de temperatuursensoren functioneert naar behoren. De grote hoeveelheid kleppen en sensoren maakt het systeem erg duur. Daarom wordt bij het herontwerp de gelijktijdigheid van laden en ontladen van de verschillende modules losgelaten

4.5 Emulator en systeem studie

In de testfaciliteit bij TNO kunnen warmtepompen en dus ook thermochemische systemen getest worden op basis van beschikbare en representatieve klimaatdata. Ten behoeve van de emulatie zijn typerende toepassingen nodig. In 4.5.1 wordt de emulator kost beschreven en in 4.5.2 worden de toepassingsgebieden van SWeKOS gegeven

4.5.1 Simulatie en sturingsprogramma Emulator

Het te testen systeem wordt in een testopstelling ingebouwd (figuur 36). Er wordt op basis van de gekozen klimaatdata en de geselecteerde woning een dynamische simulatie uitgevoerd waarmee de momentane energievraag wordt berekend. Deze energievraag wordt aan het systeem aangeboden. De energie levering van het systeem wordt weer ingevoerd in de simulatie. Op deze wijze ontstaat een dynamische test situatie. Om het SWeKOS systeem (of een warmtepomp) te testen is een behoorlijke testperiode nodig, teneinde de karakteristieke omstandigheden te kunnen doorlopen



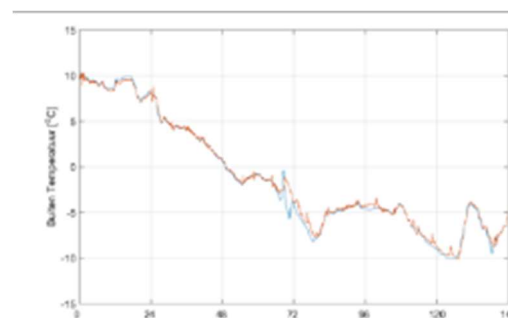
Figuur 36 Flexibele testopstelling



Figuur 37 TNO lab met actuatoren en klimaatkamer

Voor het berekenen van de warmte en koude vraag van een referentiewoning is een zeer uitgebreid en gedetailleerd rekenmodel van een karakteristiek woning ontwikkeld (zie D3.1).

De gebruikte klimaatdata is gebaseerd op de NEN5060. Op basis van deze klimaatdata wordt de energievraag van de referentiewoning berekend en wordt in de klimaatkamer de buitenlucht temperatuur en de luchtvochtigheid geëmuleerd.



Figuur 38 Gemeten en berekende temperatuur in klimaatkamer

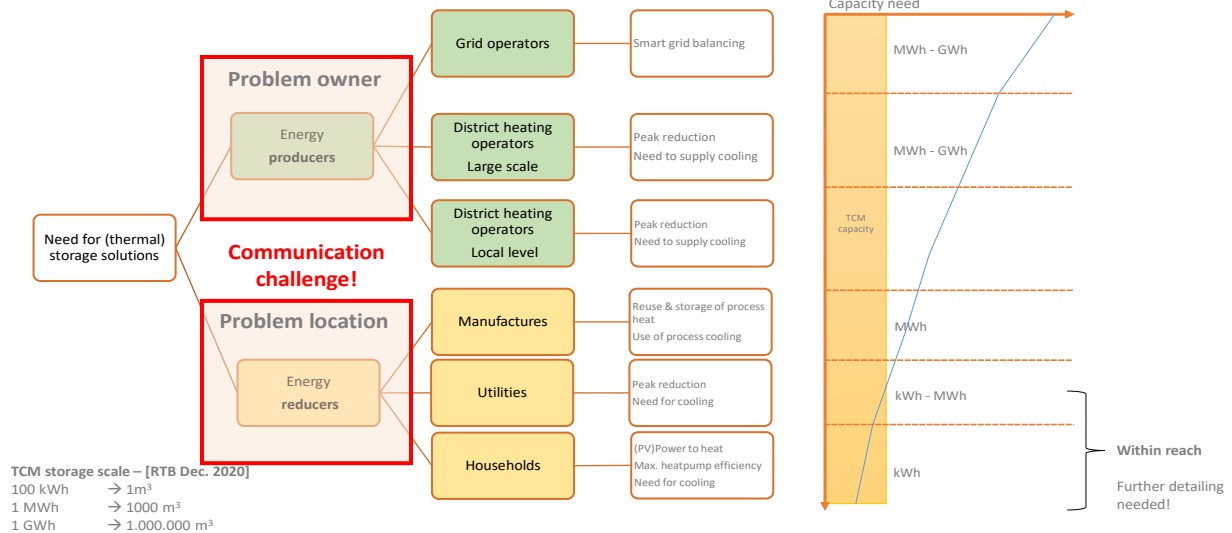


4.5.2 Systeemstudie toepassing SWeKOS

In del 3.4 is de markt analyse voor toepassing van een SWeKOS systeem beschreven. In figuur 39 is de globale analyse weergegeven. Gegeven de te verwachten capaciteit van een thermo chemische energie opslag systeem zijn de marktsegment woningen, kantoren en producenten interessant voor deze toepassing.

Market outline

"What is demanded"



©De Beijer RTB. 2020. All rights reserved, also regarding any disposal, exploitation, reproduction, editing, distribution as well as in the event of applications for industrial property rights.

Figuur 39 Markt voor Energie opslag systemen

In figuur 40 is ingezoomd op het marktsegment woningen om de toepassing van een SWeKOS systeem nader te kunnen bepalen.

Market outline

"What is demanded"

What is the heating demand on daily level?

Detached house	2 under 1 roof	Corner house	Terraced house	Flat & apartment
Heating demand [kWh]	Heating demand [kWh]	Heating demand [kWh]	Heating demand [kWh]	Heating demand [kWh]
Annual 21.492	Annual 16.412	Annual 13.970	Annual 11.625	Annual 8206
Daily avg. 59	Daily avg. 45	Daily avg. 38	Daily avg. 32	Daily avg. 22
Daily max. 132	Daily max. 101	Daily max. 81	Daily max. 71	Daily max. 50
Daily min. 11	Daily min. 8	Daily min. 7	Daily min. 6	Daily min. 4

Distinction needed between New and existing build to detail out market requirements

Requested capacity

Desired heat output power based on max. heating demand				
Daily max 132 kWh	Daily max 101 kWh	Daily max 81 kWh	Daily max 71 kWh	Daily max 50 kWh
24 hours 5.5 kW	24 hours 4.2 kW	24 hours 3.4 kW	24 hours 3.0 kW	24 hours 2.1 kW
18 hours 7.3 kW	18 hours 5.6 kW	18 hours 4.5 kW	18 hours 4.0 kW	18 hours 2.8 kW
12 hours 11 kW	12 hours 8.4 kW	12 hours 6.8 kW	12 hours 6.0 kW	12 hours 4.2 kW
6 hours 22 kW	6 hours 16.8 kW	6 hours 13.5 kW	6 hours 11.8 kW	6 hours 8.3 kW

Requested power

Tap water demand
Temperature 65 °C
Average hot water consumption in the Netherlands is 64.5 L/person/day

Household	Daily capacity [kWh]
1 person	4
2 persons	8
3 persons	11
4 persons	15
5 persons	19

Tap profile	Flow at 60°C	Flow at 40°C
CW3 [M]	6 [l/min]	10 [l/min]
CW4 [L]	7,5 [l/min]	12,5 [l/min]
CW5 [XL]	9 [l/min]	15 [l/min]
CW6 [XXL]	11 [l/min]	22 [l/min]

Sources: CBS (2020), Vewin (2017), EDSN (2013)

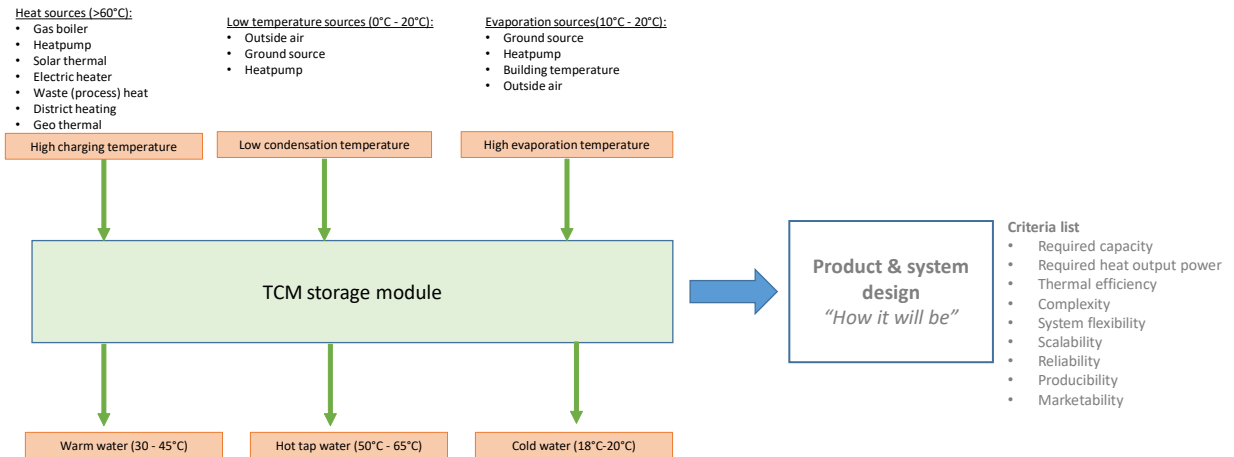
©De Beijer RTB. 2020. All rights reserved, also regarding any disposal, exploitation, reproduction, editing, distribution as well as in the event of applications for industrial property rights.

Figuur 40 Woningen typologie voor SWeKOS



Technology outline

"What can be delivered"



©De Beijer RTB. 2020. All rights reserved, also regarding any disposal, exploitation, reproduction, editing, distribution as well as in the event of applications for industrial property rights.

Figuur 41 Technologie positie SWeKOS

In figuur 41 is de plaats van een SWeKOS in een energiesysteem weergegeven. De focus op basis van de systeem studie zal liggen bij een modulaair systeem dat op verschillende temperatuur niveaus energie kan opnemen en leveren. Deze verschillende systeem configuratie zijn ook van belang voor de inrichting van de dynamische energie vraag en aanbod in de emulatie omgeving van TNO

Conclusie Emulator en systeemstudie

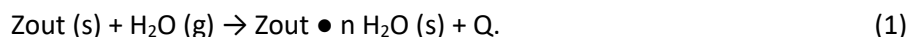
De emulator bij TNO is geschikt gemaakt met een toegesneden testopstelling en referentiemodel om onder karakteristieke gebruiksomstandigheden een SWeKOS systeem dynamisch te kunnen testen. De systeem studie laat zien dat er in de gebouwde omgeving verschillende aanbieders van energie geschikt zijn voor een SWeKOS systeem. Voor woningen en gebouwen kan SWeKOS voorzien in warmte en koude en warmtapwater.



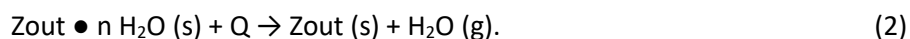
4.6 Resultaten Onderzoek naar thermo chemisch materiaal

4.6.1 Inleiding

Het is mogelijk om warmte op te slaan in een reversibele chemische reactie. Vaak wordt hiervoor de hydratatie van zouten gebruikt:



Om warmte op te slaan wordt het zout hydraat verwarmt tot het water weer verdampt:



Om een warmteopslagsysteem te ontwerpen dat geschikt is voor verliesvrij en lange termijn energie opslag, is er een aantal eisen aan het materiaal opgesteld door Donkers et al. [1]. Een geschikt materiaal zou energiedichtheid van $\geq 1,3 \text{ GJ/m}^3$, een hydratatietemperaatuur $\geq 50^\circ\text{C}$ en een dehydratie temperatuur $<120^\circ\text{C}$ moeten hebben. Met die condities is het afgegeven water warm genoeg voor warm water en verwarming, kan een zonneboiler efficiënt het materiaal dehydrateren en is een opslagsysteem van maximaal ca. 10 m^3 haalbaar. Daarnaast zijn ook het smeltpunt van het materiaal, de prijs en veiligheidsoverwegingen belangrijk.

Het nadeel van het gebruik van hydraten is dat water bij lage temperaturen een lage dampspanning heeft. Dat betekent dat een op water gebaseerde reactor in een koude omgeving minder vermogen levert. Naast zouthydraten bestaan er ook complexen met andere oplosmiddelen met een hogere dampdruk zoals ethanol en methanol¹. Behalve de hogere dampdruk is er nog een andere reden om alcoholaten als thermochemische materialen te onderzoeken: doordat alcoholen typisch minder sterk gebonden zijn in het kristalrooster dan water verlaten zij bij een lagere temperatuur het materiaal. Hierdoor komen zouten in aanmerking die als hydraat wel een hoge energiedichtheid hebben, maar buiten het temperatuurbereik van een zonneboiler dehydrateren.

Tot nu toe is er weinig onderzoek gedaan naar de thermische eigenschappen van alcoholaten. Het enige recente onderzoek, van Korhammer et al. [10,11], keek naar ethanol en methanol complexen van CaCl_2 en MgCl_2 . MgCl_2 bleek neven reacties te vertonen met de alcoholen, maar $\text{CaCl}_2 \bullet 2 \text{ methanol}$ kan minstens 18 keer gesolvateerd en gedevolvateerd worden. De gerapporteerde energiedichtheden zijn ca. 108 kJ/mol (0.94 GJ/m^3) voor $\text{CaCl}_2 \bullet 2 \text{ methanol}$ en 111 kJ/mol voor $\text{CaCl}_2 \bullet 2 \text{ ethanol}$ ². Deze resultaten laten zien dat het de moeite waard is om alcoholcomplexen nader te onderzoeken.

4.6.2 Sneltoets

Om snel te kunnen testen of een zout-oplosmiddel paar interessant is voor verder onderzoek, is een sneltoets bedacht. Hierin wordt 0.1 g van het gedroogde zout in een flesje met een septum, een thermometer en een roervlo gedaan. De temperatuur wordt genoteerd en dan wordt 1 ml watervrij oplosmiddel onder roeren toegevoegd. Als er energie vrij komt, warmt het mengsel nu op. Als het verschil tussen de maximale temperatuur en de uitgangstemperatuur kleiner dan 2°C is, is het oplosmiddel paar niet interessant voor verdere analyse. In totaal zijn er 44 paren getest). Daarvan bleken er 18 geschikt voor nader onderzoek.

¹ Ammonia kan ook zoutcomplexen vormen en heeft een nog hogere dampdruk maar is te gevaarlijk voor gebruik in een woonhuis.

² Voor dit solvaat is geen dichtheid bekend, dus kan er niet omgerekend worden naar energie per volume.

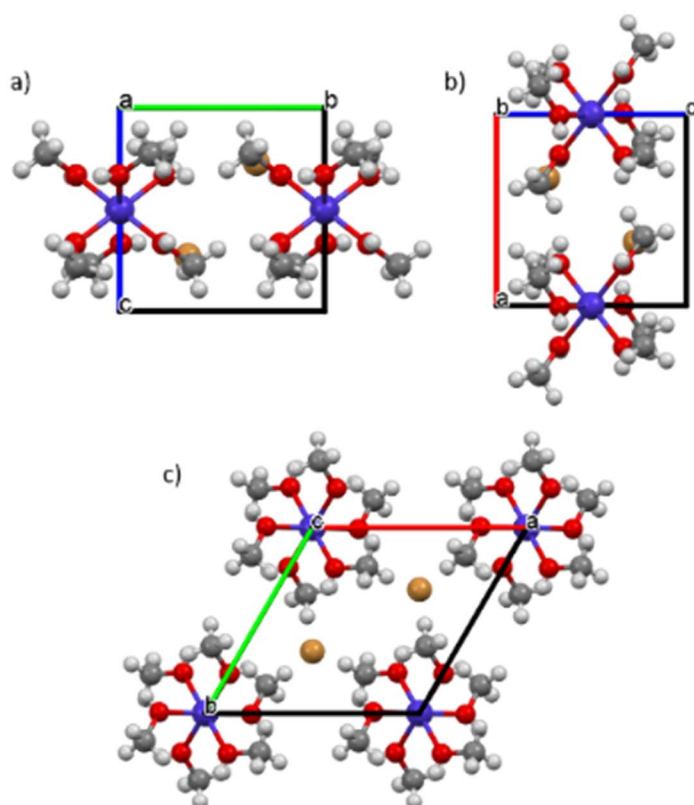


4.5.3 Kristalgroei en Structuurbepaling

Om de materialen verder te analyseren, zijn kristallen van de solvaten gegroeid. Dit is gedaan door een oververzadigde oplossing van het zout in watervrij oplosmiddel te verwarmen in een afgesloten flesje, zodat alles oplost, en over nacht langzaam af te koelen. Door langzaam genoeg te koelen, groeien kristallen in plaats van dat er alleen een poeder gevormd wordt.

Van deze kristallen is de kristalstructuur bepaald door middel van röntgendiffractie. De kristallen van alle materialen zijn sterk hygroscopisch en trekken over het algemeen genoeg water uit de omgevingslucht aan om daarin op te lossen. Daarom zijn de kristallen uit de flesjes direct onder microscoopolie gebracht en in een cryostaat met een droge stikstofatmosfeer bij $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemeten op een Bruker D8 Quest Apex3 diffractometer met $\text{Mo K}\alpha$ straling gemeten.

In totaal zijn er zo vier nieuwe structuren gevonden. Als voorbeeld is de structuur van $\text{CoBr}_2 \bullet 6 \text{ Methanol}$, die tot nu toe nog onbekend was, afgebeeld in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden**.⁴⁴ Zoals daar te zien is, spelen waterstofbruggen geen rol bij de binding tussen methanol en CoBr_2 . In plaats daarvan, wordt de alcohol gebonden door een elektrostatische interactie tussen kobalt en zuurstof. Dit geldt ook voor de andere materialen die onderzocht zijn.



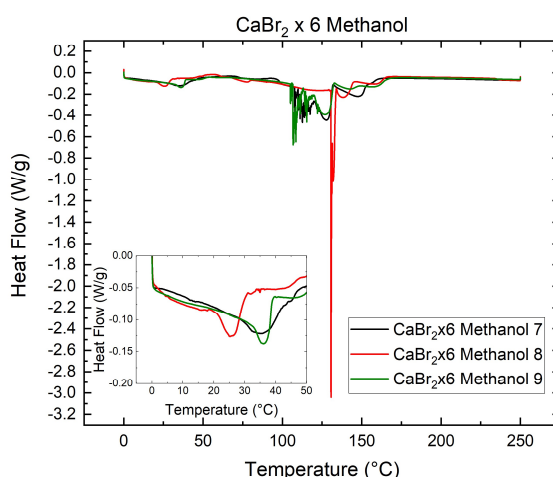
Figuur 42 Structuur van $\text{CoBr}_2 \bullet 6 \text{ methanol}$, gezien langs verschillende assen. Paars: Co, bruin: Br, rood: O, grijs: C, wit: H



4.6.4 Thermische analyse

Om te bepalen hoeveel energie een complex op kan slaan, zijn er Differential Scanning Calorimetry (DSC) metingen gedaan met een Mettler Toledo DSC 1 calorimeter met een ceramische HSS8 sensor. Om de sterk hygroscopische materialen te kunnen meten, werden vooraf gewogen aluminium pannetjes in een glove-bag (<20% relatieve luchtvochtigheid) of glove-box (<0.05 ppm H₂O) met ca. 5 mg materiaal gevuld en daarna luchtdicht afgesloten door er een deksel op te persen. Door net voor de meting een gat in het deksel te prikken, kwamen de monsters maximaal een halve minuut in aanraking met de buitenlucht voor ze in de met stikstof gespoelde oven van het meetinstrument waren. Zonder gat zou zich de druk in de pan opbouwen waardoor de meting onbetrouwbaar zou worden of de deksel zelfs open zou kunnen scheuren.

Als voorbeeld zijn in Figuur 43 de DSC-curves van drie CaBr₂•6 methanol monsters afgebeeld. De metingen zijn onder droge stikstof en met een temperatuurstijging van 1 °C/min uitgevoerd. De scherpe pieken op de curve komen waarschijnlijk doordat het oplosmiddel daar zo snel het kristal verlaat, dat het niet snel genoeg het pannetje kan verlaten en de meting beïnvloed. Uit deze curves is de energiedichtheid van de materialen bepaald door de pieken te integreren en voor de massa te corrigeren. Deze energiedichtheden zijn samengevat in tabel 6. Om een materiaal te desolvateren, moet tenminste de temperatuur bij het begin van de piek gehaald worden (on-set temperatuur).



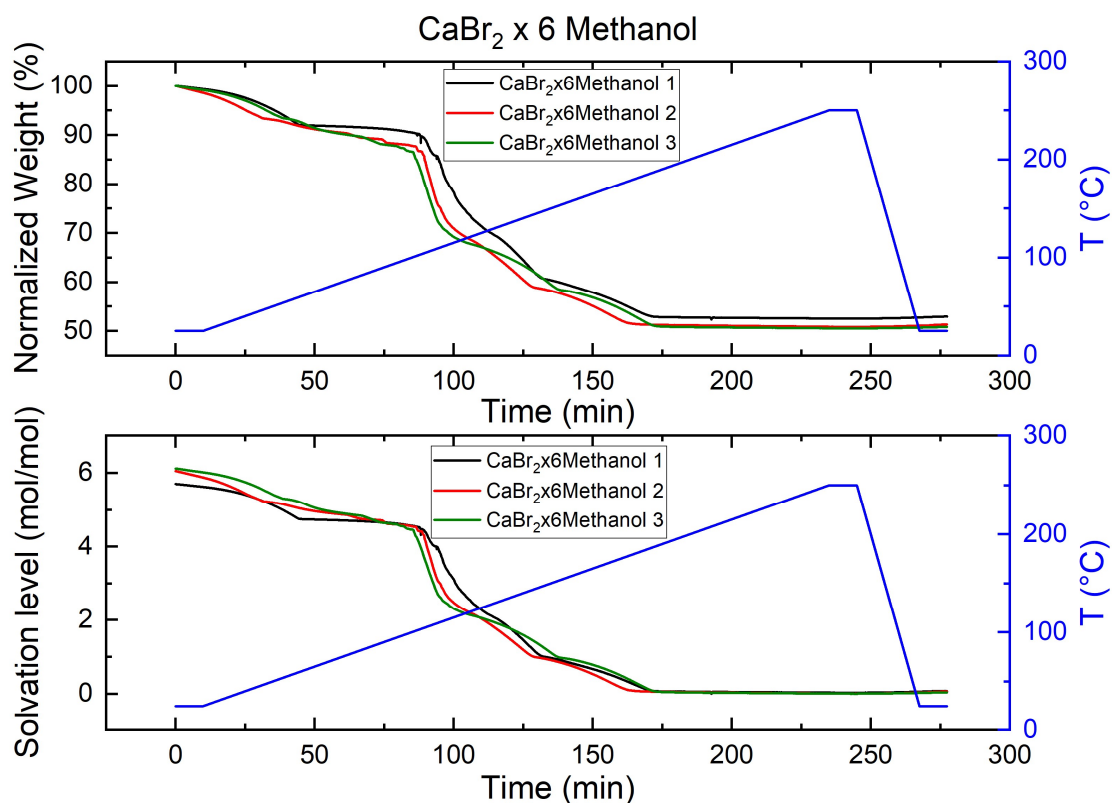
Figuur 43 DSC curves van drie CaBr₂ x 6 methanol monsters, gemeten onder stikstof en met 1 °C/min temperatuur stijging.

Materiaal	Dichtheid (g/cm ³)	Energiedichtheid (J/g)	Energiedichtheid (GJ/m ³)	T _{desolvatie} (°C)	Opmerking
CaBr ₂ • 4 ethanol	1.499	540	0.83	132	
CaBr ₂ • 6 methanol	1.557	584	0.91	132	
CoBr ₂ • 3 ethanol	1.789	337	0.60	90	
CoBr ₂ • 6 methanol	1.809	404	0.73	106	
Ca(NO ₃) ₂ • 4 methanol	1.45	297	0.43	90	
Ca(NO ₃) ₂ • 4 ethanol		304		89	Structuur onbekend
NaOCH ₃ • H ₂ O	1.37	630	0.86	58	
NaOCH ₂ CH ₃ • 2 ethanol	1.03	489	0.50	93	
SrBr ₂ • 2 methanol	2.393	302	0.72	155	

Tabel 6 Energiedichtheden van verschillende materialen.



Naast DSC is er ook gebruik gemaakt van Themogravimetrische Analyse (TGA). Hierbij wordt de massa van een monster tijdens een temperatuurprogramma gevolgd. Daarmee is het mogelijk te controleren of signalen in een DSC-meting echt bij desolvatie horen of misschien met een intern proces zoals een faseovergang te maken hebben. Als voorbeeld hiervoor zijn de resultaten van $\text{CaBr}_2 \cdot 6 \text{ methanol}$ in Figuur 44 afgebeeld.

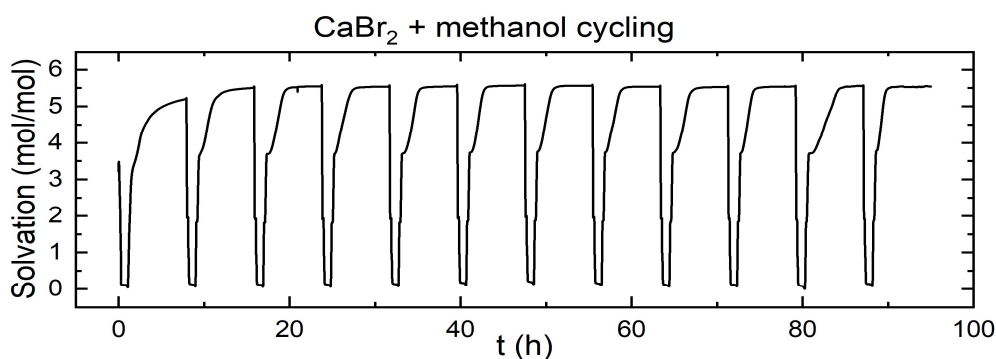


Figuur 44 Genormaliseerd gewicht en berekende solvatatie voor drie $\text{CaBr}_2 \cdot 6 \text{ methanol}$ monsters. De desolvatie gebeurt duidelijk in meerdere stappen, wat op het bestaan van andere solvaten met minder alcohol wijst.

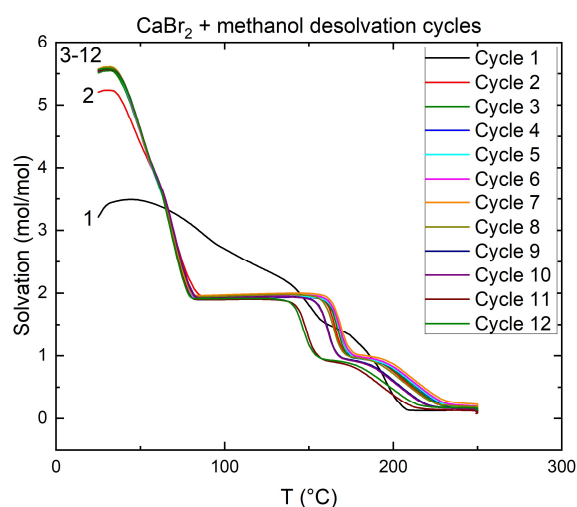
Ook is het mogelijk om met een aangepaste TGA-opstelling te volgen hoe het droge zout alcohol opneemt en, door het solvatatie/desolvatie proces te herhalen, een idee te krijgen of het materiaal chemisch stabiel genoeg is om relevant te zijn. Hiervoor is een wasfles met droge methanol of ethanol in een thermostaatbad gezet. Daarna werd er droge stikstof door de wasfles in de TGA-oven geblazen. Door de temperatuur van het bad in te stellen is er controle over de concentratie alcohol damp.

Als voorbeeld is een cycli-meting aan CaBr_2 met methanol weergegeven in Figuur 45 en 46. Voor deze metingen is CaBr_2 anhydraat in een open 100 μl aluminium pannetje afgewogen en in de TGA-opstelling met een stroom van droge stikstof met methanol geplaatst. Het monster wordt in iedere cyclus van 25 °C met 10 graden/minuut naar 250 °C verwarmd, daar 30 minuten gehouden om volledig te desolvateren. Daarna werd het monster met 10 graden/minuut afgekoeld naar 25 °C waar het 400 minuten gehouden werd om een volledige solvatatie te garanderen.

Andere materiaalcombinaties die voor minstens 11 of 12 cycli stabiel zijn waren CaBr_2 met ethanol, CoBr_2 met methanol en ethanol, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ met methanol en ethanol en NaOH met ethanol en methanol. SrCl_2 absorbeerde geen methanol of ethanol uit de gasfase terwijl SrBr_2 zoveel methanol en ethanol lijkt aan te trekken dat het erin oplost.



Figuur 45 Overzicht van alle cycli.



Figuur 46 Overzicht van alle desolvatie stappen van de cycli.

Conclusie onderzoek alternatieve TCM

Er is een redelijk groot aantal stoffen dat naast een hydraat ook een solvaat structuur met methanol of ethanol kan vormen, waarbij een exotherme reactie optreedt. Doordat deze alcoholen een hogere dampdruk hebben dan water, kunnen deze materiaalsystemen ook bij lage temperaturen vermogen leveren en hebben geen last van bevriezing. De studie naar alternatieve TCM's heeft wel perspectief laten zien voor nieuwe stoffen, maar deze zitten nog in een fundamentele onderzoeksfase. Voor het SWeKOS project wordt daarom teruggevallen op de bekende TCM's: K_2CO_3 , Na_2S en $CaCl_2$

4.7 Resultaten Onderzoek naar bekende thermo chemisch materialen

4.7.1 Inleiding

Dit SWeKOS project heeft een interactie en aansluiting op het energypads 2 project. De resultaten van het energypads 2.0 project zijn gerapporteerd in het eindrapport gepubliceerd in februari 2021 [2]. In het energypads 2.0 project is onder andere onderzoek uitgevoerd aan de op honeycombs gebaseerde energypads gevuld met TCM. In dit project heeft TNO een meetopstelling met meetmethode ontwikkeld om de warmtegeleiding, zowel in radiale als hoogte richting, van met TCM gevulde energypads te meten.

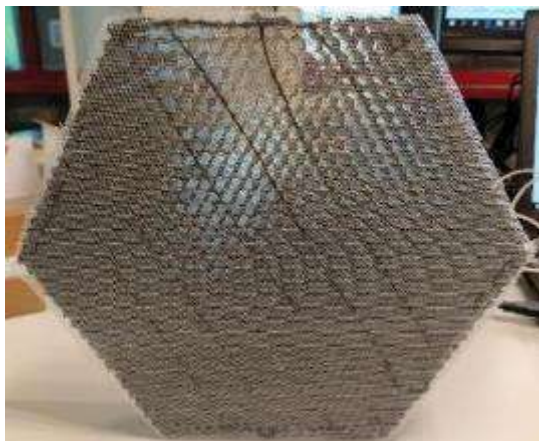
Voor het SWeKOS project is de toepassing van de bekende TCM's in energypads onderzocht. Dit is uitgevoerd om de toepassing van TCM in de (gecoate) energypad te onderzoeken. Aspecten als veroudering, zwellen en krimpen, geschiktheid van het zout voor SWeKOS zijn hierbij onderzocht. In deliverable 5.1B zijn de resultaten van dit onderzoek gerapporteerd. In dit hoofdstuk worden de voor het SWeKOS van belang zijn de resultaten weergegeven. In deliverable D5.1b zijn de uitgevoerde werkzaamheden, de analyses en de meetresultaten uitgebreid weergegeven

4.7.2 Cycleer experimenten

De op de honeycomb gebaseerde energypads zijn gevuld met een TCM. Als TCM zijn de volgende bekende TCM's gekozen: K_2CO_3 , $CaCl_2$ en Na_2S . De energypads zijn gecoat met de KLT lak. In figuur 47 en 48 zijn hier een voorbeelden van gegeven. Deze drie TCM's zijn onderzocht toegepast in de honeycomb energypad.

De honeycombs zijn gecoat met KTL en gevuld met de TCM. De TCM is samengesteld uit deeltjes van 1-2 mm. De aldus samengestelde energypads zijn in een testopstelling gecycleerd. Dat wil zeggen getest op duurzaamheid en levensduur in een vacuüm oven met de van toepassing zijnde water dampdrukken en temperatuur regimes.

Na afloop van het cycleren zijn de honeycombs energypads onderzocht op veroudering zoals radiale deformatie en beschadiging van de coating.



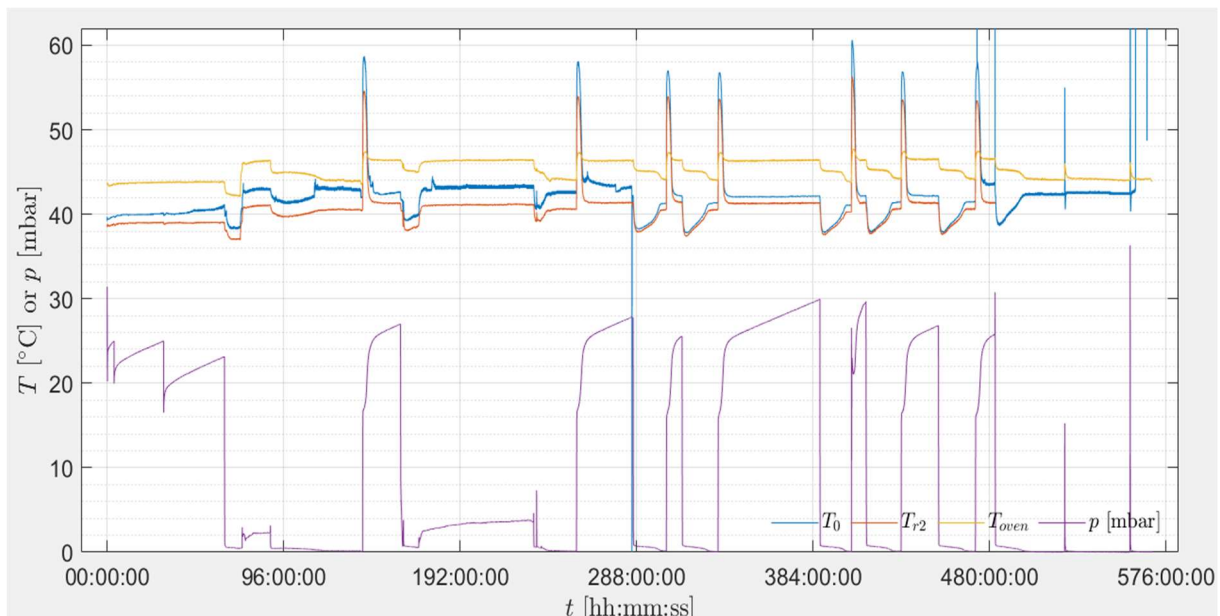
Figuur 47 Honeycomb energypad met aan de onderzijde gaas.



Figuur 48 Gecoate honeycomb gevuld met Na_2S



In figuur 49 is een voorbeeld meting van het cycleren in de vorm van een grafiek van het cycleren van K_2CO_3 gegeven.



Figuur 49 Cycleren van K_2CO_3 , temperatuur en damspanning in de tijd.

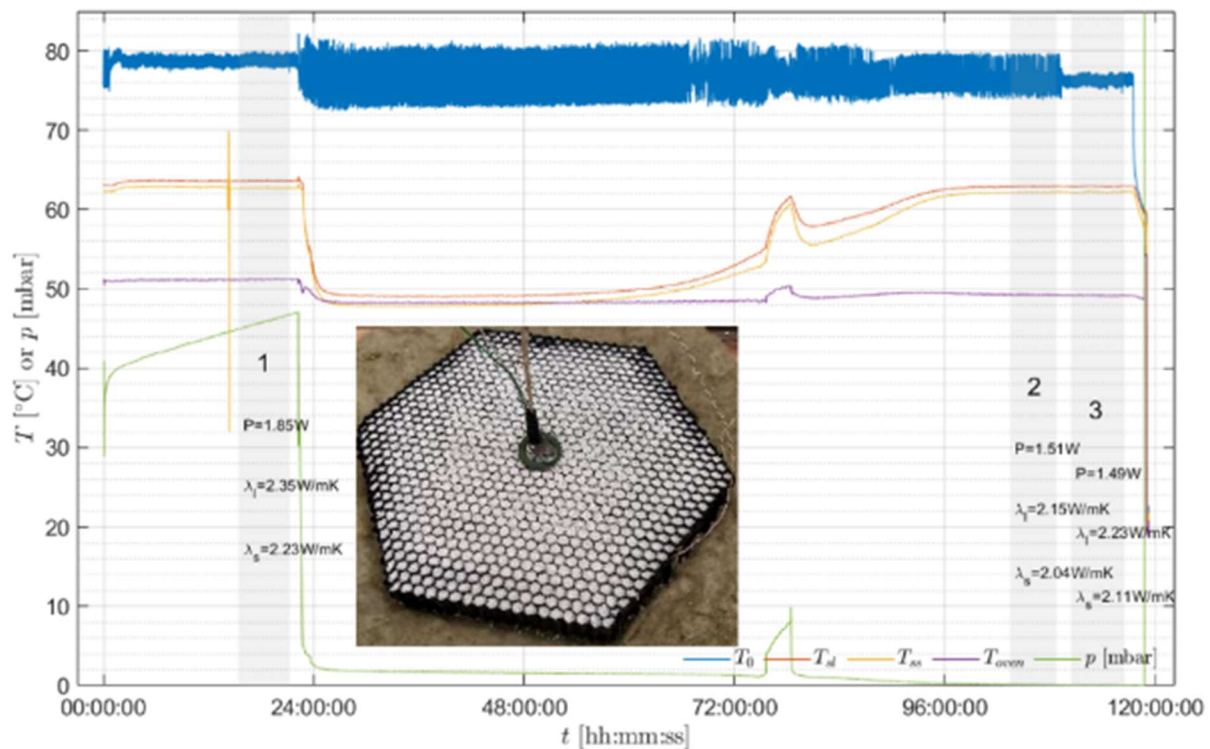
De TCM's opgesloten in de honeycomb energypad hebben een aantal cycli doorlopen. Analyse van de resultaten heeft tot de volgende conclusies geleid:

- K_2CO_3 , $CaCl_2$ en Na_2S hebben geen ongewenste degradatie van de energypad laten zien na respectievelijk 3, 9 en 5 keer cycleren.
- Radiale deformatie van de energypad, axiale deformatie of beschadiging van de coating zijn niet waar genomen.
- Axiale uitzetting naar beneden heeft geleid tot het gedeeltelijk los geraken van het gelijmde rooster onder de honeycomb. Beter bevestigen moet worden onderzocht.
- DE TCM's clusteren samen tot een soort pillen of cellen. Het is op dit moment niet duidelijk of deze clustering het massa en warmtetransport beïnvloed.

Het vergroten van het aantal cycli is in het vervolg project nodig om de lange termijn duurzaamheid te kunnen zeker stellen. De eerste resultaten zijn hoopvol.

4.7.3 Effectieve warmtegeleiding metingen

De honeycomb energypads zijn ten behoeve van de radiale warmtegeleidingsmetingen ook gevuld met deeltjes van dezelfde grootte van de verschillende TCM's. Een stationair radiaal temperatuurverschil werd opgelegd om de radiale effectieve thermische geleidbaarheid (ETC) te meten. In figuur 50 is een voorbeeld van de warmtegeleidingsmeting gegeven. In tabel 7 staan de meetcondities en meetresultaten vermeld. De warmtegeleidingsmetingen zijn uitgevoerd bij een gehydrateerd en gedehydrateerde TCM (dampdruk P in de tabel 7)



Figuur 50 Meetresultaten voor de honeycomb energypad gevuld met K₂CO₃

SS period	supposed hydration state	start time	end time	$\dot{Q}$	T_0	$T_{s,l}$	$T_{s,s}$	T_{oven}	$T_0 - T_{s,l}$	$T_0 - T_{s,s}$	p	λ_l	λ_s
				W	°C	°C	°C	°C	°C	°C	mbar	W/m·K	W/m·K
1	1.5	'15:27:21'	'21:13:39'	1.85	79.2	63.6	62.7	51.2	15.6	16.5	45.9	2.35	2.23
2	1.5	'103:29:06'	'108:46:06'	1.51	76.9	63.0	62.2	49.3	13.9	14.7	0.1	2.15	2.04
3	0	'110:25:09'	'116:30:41'	1.49	76.1	62.9	62.2	49.2	13.2	13.9	0.1	2.23	2.11

Tabel 7 Meetresultaten effectieve warmtegeleiding honeycomb met K₂CO₃

Voor alle drie de TCM's bleek deze ETC ongeveer 2 W/mK te zijn voor zowel gedehydrateerde als gehydrateerde toestand. Oorzaken voor kleine verschillen tussen de verschillende energypads konden vanwege de bestaande beperkte zekerheid niet worden aangewezen. Deze radiale ETC-waarden kunnen worden gebruikt om ontwerpparameters voor de warmteoverdracht van het kussen, zoals de afstand tussen de buizen, te berekenen om het gewenste vermogen te bereiken.

Alle drie de geteste TCM's met deeltjesgrootte van 1,0-2,0 mm (Na₂S & CaCl₂) en 1,4-2,0 mm (K₂CO₃) ingebouwd in een met KTL gecoate aluminium honeycomb energypad vertonen een radiale ETC in de orde van 2 W/mK. Dit is de totale effectieve warmteoverdrachtssnelheid in radiale richting vanwege alle warmteoverdrachtmechanismen. Het is nog onbekend - maar er zijn verwachtingen - welke mechanismen (bijvoorbeeld aluminiumgeleiding) dominant zijn ten opzichte van andere (bijvoorbeeld convectie). Variaties in de celgrootte en het materiaal van de pad, evenals de deeltjesgrootte, temperatuur en dampspanning moeten worden gedaan als inzicht nodig is in de parameterinvloeden op de ETC. Er is een aanwijzing - maar niet overtuigend - dat ETC voor de



gehydrateerde status een paar procent hoger is dan voor de gedehydrateerde status. Als dit het geval is, blijft het nog onzeker of dit komt door mogelijk beter contact of geleiding in de gehydrateerde toestand of door verhoogde convectie warmteoverdracht door de hogere dampdruk in die gevallen. Testen met gedehydrateerd materiaal, maar met een absolute druk van een inert gas (bijvoorbeeld stikstof) gelijk aan de absolute druk in de gehydrateerde testcases, zouden kunnen leiden tot een conclusie over de mechanismen die dit verschil veroorzaken.

Conclusie onderzoek bekende TCM

Het gebruiken van de KTL coating in energypads werkt goed om inwerking van de TCM op het metaal te voorkomen. Uit de eerste cycleer testen met de drie TCM's zijn geen sporen van veroudering of beschadiging vastgesteld.

Het is goed mogelijk om de effectieve thermo conductivity in gevulde energypads met de ontwikkelde meetopstelling bij TNO te meten. Dit geldt voor de gehydrateerde en de gedehydrateerde toestand van de energypad gevuld TCM.

De eigenschappen van de TCM K_2CO_3 zijn gunstig voor het uitvoeren van de experimenten met de SEM, omdat deze TCM gemakkelijk te verwerken en gebruiken is. Voor de TCM $CaCl_2$ geldt nagenoeg hetzelfde behalve dat de bereiding van de werkzame stof opgesloten in klei wat complexer is. Uiteindelijk is Na_2S vanwege de energie opslag capaciteit favoriet, maar is lastiger te verwerken en te gebruiken.

In het SWeKOS 2 project zal daarom met K_2CO_3 gestart worden en pas na goede resultaten overgestapt worden op Na_2S .



4.8 Redesign SWeKOS en concept productieplan

4.8.1 Inleiding

Een eerste concept SWeKOS, voorbereid voor modulaire energypads, voor de opslag van thermische energie is ontwikkeld in dit SWeKOS project (WP1 en WP2).

Gebaseerd op de resultaten van het Energypads 2 project is geconcludeerd dat energypads op basis van in de markt beschikbare aluminium honeycombs stacks geen SWeKOS systeem oplevert dat voldoet aan de vereiste prestaties met betrekking tot energie inhoud en vermogen.

Ook is in het Energypads 2 project vast komen te staan dat de KTL lak als coating aangebracht op de warmtewisselaar goed bestand is tegen Na₂S als TCM.

Daarom is in de verdere ontwikkeling van het SWeKOS project geconcludeerd dat er gebruik gemaakt zal worden van de warmtewisselaar zoals die in het Solabcool systeem worden gebruikt, de fin en tube opbouw. In dit hoofdstuk wordt het herontwerp van het SWeKOS concept en de verkenning naar de industrialisatie in combinatie met kostprijs beschreven

4.8.2 Programma van eisen

Hier worden de belangrijkste eisen die aan het herontwerp van SWeKOS worden gesteld gegeven. Deze zijn:

- Zoals uit de systeemstudie (4.6) is geconstateerd dient het SWeKOS systeem lokale waarde te leveren in de vorm van warmte voor verwarming, warmte voor douchen & koeling voor in de zomer. Daarnaast dient het een algehele waarde te leveren van energieopslag die voornamelijk als stabilisator van het elektriciteitsnet (hoog/midden/laagspanning) zal moeten gelden.
- Verder is geconcludeerd uit het concept prototype SWeKOS dat de regeling en sturing om gelijktijdig de levering en opslag van warmte en koude in de verschillende modules complex en kostbaar is vanwege het grote aantal kleppen en sensoren. Daarom wordt dit uitgangspunt bij het ontwerp losgelaten. Levering en opslag van energie zal sequentieel plaatsvinden hetgeen het ontwerp, aansluiting en regelstrategie van het systeem sterk vereenvoudigd.
- De eis ten aanzien van toepasbaarheid voor verschillende verwarmingssystemen blijft ongewijzigd. Het energieopslag systeem moet toepasbaar zijn voor lage temperatuur (<40°C) en midden temperatuur(40°C -60°C) warmteafgifte installaties. Daarnaast moet de warmte zich in de ruimte kunnen afstaan aan de lucht doormiddel van radiatoren, vloerverwarming of combinatie van beide.
- Er wordt naar gestreefd een energie opslag capaciteit van 60 kWh te realiseren met een vermogen van 5 kW. Op basis van de resultaten van het Energypads 2 project wordt in het nieuwe ontwerp nu uitgegaan van de fin and tube warmtewisselaar zoals die in de Solabcool wordt gebruikt en waar ruime ervaring mee is bij RTB de Beijer. De modulariteit wordt nu gedefinieerd per energiebatterij. In de volgende paragraaf wordt het herontwerp van SWeKOS beschreven. Door “stapeling” van de energiebatterijen is de capaciteit en het vermogen in te stellen. Het ontwerp uitgangspunt is een energiebatterij met een capaciteit van 5 kWh en een vermogen van 2,5 kW.
- Lage temperatuur warm water wordt geleverd door de interne vacuümklep te openen en een duurzame warmtebron, zoals buitenlucht temperatuur (dry cooler), op de verdamper te zetten. Door het verdampingsproces zal het waterdamp op de TCM gaan condenseren, en zal



er condensatiewarmte vrijkomen in de reactor. Dit levert een temperatuurverhoging op dat in de range van lage temperatuur warmte ($>30^{\circ}\text{C} \leq 50^{\circ}\text{C}$)

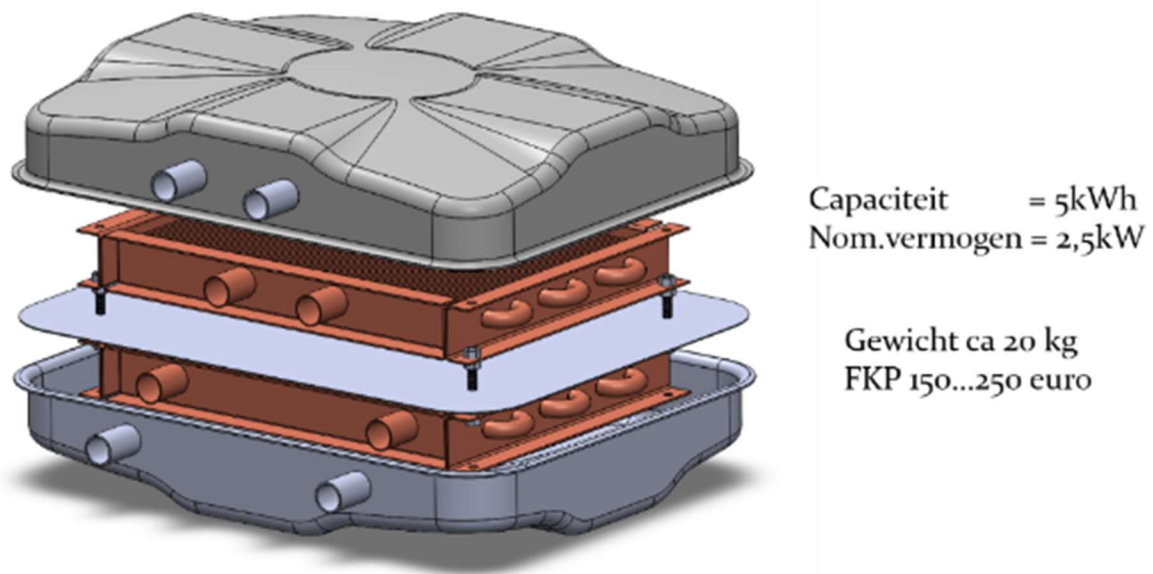
- De aansturing van het systeem zal met een zelf ontwikkelde elektronische regeling plaats vinden die aansluit op de kamerthermostaat. De aansturing zal de kleppen sturen in de modules teneinde de capaciteit en vermogen te leveren bij het ontladen. In de laad fase zal de sturing er zorg voor dragen dat de modules sequentieel geladen worden.
- Indien er een overschot aan energie beschikbaar is (zon, stadsverwarming, geothermie) in de winter dan kan het systeem worden geladen, maar is er geen behoefte aan ontladen. Want de energie kan direct worden ingezet om een huis te verwarmen.
- Indien er een overschot aan energie beschikbaar is in de zomer dan kan het systeem worden ingezet voor koeling. Afhankelijk van de warmtelast van het te koelen object zijn er verschillende opties om koeling te leveren. Zo kan het systeem intermitterende koeling leveren, dus ontladen, laden, ontladen, laden. Ook kan ervoor worden gekozen om twee modules te laden en twee te ontladen. Dan kan er gebruik worden gemaakt van aanzienlijk minder kleppen. De vermogens kunnen worden geregeld door een simpele debietregeling. Er is dus geen complexe drukregeling in het systeem nodig.
- Indien er een tekort is aan energie (dus geen zon, stadsverwarming, geothermie) zal er energie aan het apparaat worden onttrokken. Bij goed geïsoleerde woningen is een verwarmingsvraag van 5kW voldoende om 99% van de warmtevraag te kunnen voorzien. Hierbij kunnen meerdere modules tegelijkertijd worden ingeschakeld om deze piekvragen te dempen. In de perioden april tot oktober is er nauwelijks een verwarmingsvraag. In deze periodes kan het systeem worden gebruikt om hoge temperatuur verwarming te maken. Het opwarmen van warm water vaten gebeurt met een vermogen van twee tot drie kW. Als SWeKOS gemiddeld één kW kan leveren (zoals aangetoond met deze demonstratie) dan wordt de elektriciteitsvraag voor het laden van een warm water buffervat met 50% gereduceerd. Hiermee is de eis voor gelijktijdigheid op een andere wijze geformuleerd die nieuwe opties biedt voor het ontwerp en daarmee een kostenreductie.
- De modules dienen een gewicht te hebben zodat deze eenvoudig naar hun plaats in het gebouw kunnen worden gebracht. Het ontwerp gewicht is 20 kg. Door de modulaire opbouw van het systeem, plaatsing van modules in het rek, wordt grote flexibiliteit met betrekking tot plaatsing in het gebouw bereikt.
- De eis ten aanzien van de waarde levering in de gehele keten blijft ongewijzigd. Met de gehele keten wordt bedoeld de producent en distributeur van de energieopslag opslagsysteem, de producent en distributeur van elektriciteit, de eindgebruiker.
- Het systeem zal aantrekkelijk genoeg gemaakt moeten worden, zowel financieel als functioneel, om de gewenste adoptiemogelijkheid, adoptiesnelheid en marktpositie te waarborgen. .



4.8.3 Nieuw ontwerp SWeKOS: de energiebatterij

Op basis van de ervaringen en resultaten met het complete SWeKOS systeem en de conclusie uit het Energypads 2.0 project is besloten tot een herontwerp van het systeem. In paragraaf 4.7.2 is het programma van eisen gegeven. Daarnaast is ook in overleg met de industriële project partner Flamco de productie geanalyseerd..

De opgedane kennis en ervaring in dit project, tezamen met het programma van eisen en de kennis en ervaring en beschikbare concepten bij Flamco hebben geleid tot de het overgegaan naar een modulaire en rechthoekige uitvoering van het SWeKOS systeem, de energie batterij (fig 49.)

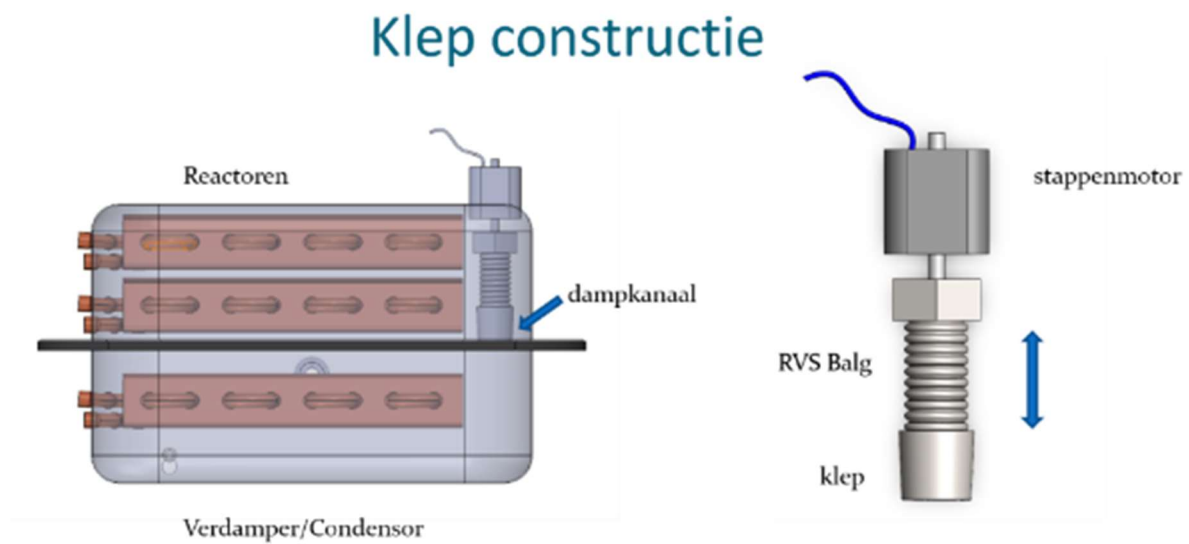


Figuur 51 Opbouw van de modulaire energie batterij

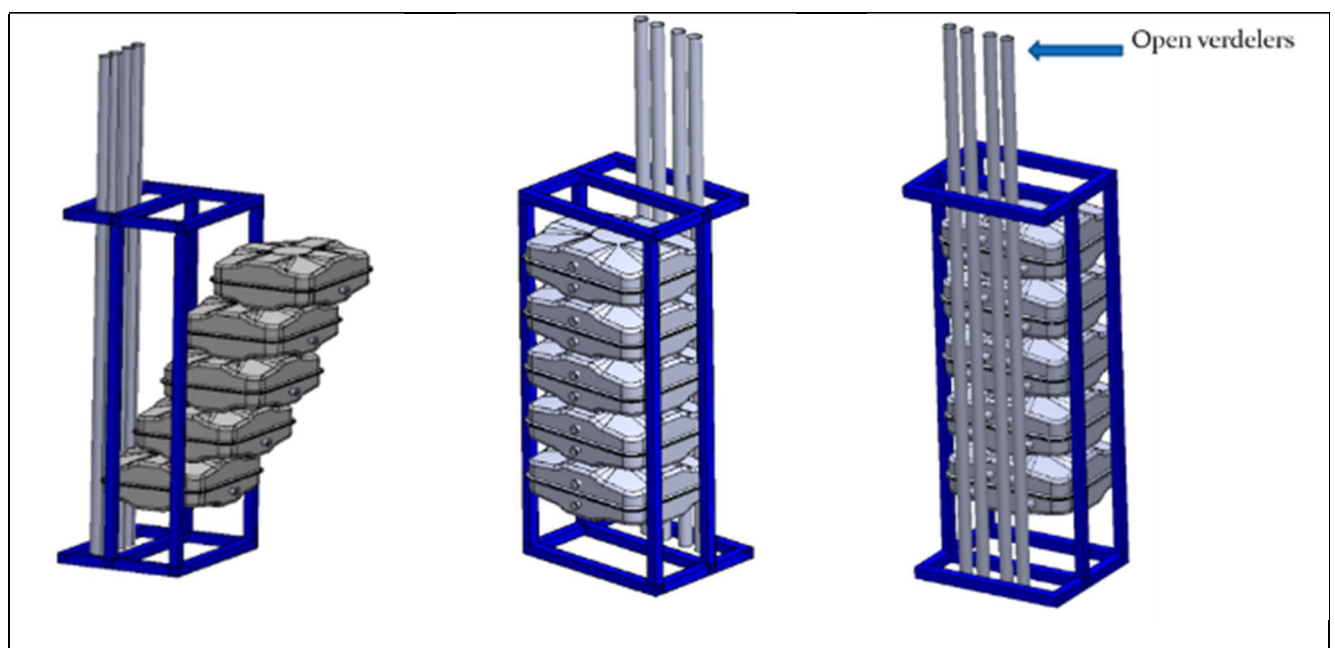
Deze warmtebatterij bestaat uit een behuizing, waarin de energy stacks geplaatst zijn inclusief warmtewisselaar, vacuüm klep, condensor en verdampers, die langdurig een vacuüm in stand kan houden. Het systeem zal als een compleet geïntegreerd systeem geleverd worden. De energystack wordt geplaatst in de modulaire energiebatterij en gevuld met een TCM. Project. In het SWeKOS project wordt uiteindelijk Na_2S gekozen, maar wordt gestart met silica gel. Deze energystack bestaat uit een gevinde buis. Deze gevinde buis wordt gevuld met de TCM en geplaatst in een schaal reactor vat. De energystack, het reactorvat en de absorber/condensor zullen in geval van een TCM als Na_2S voor vulling met de TCM gecoat worden.

Voor een impressie van de warmtebatterij, zie onderstaande figuur 52. Zoals eerder aangegeven wordt met de energiebatterij een modulaire opbouw tot een systeem met de gewenste capaciteit en vermogen mogelijk gemaakt. In figuur 53 is de modulaire opbouw gegeven. Dit ontwerp maakt het mogelijk om aan het programma van eisen te voldoen. Plaatsing in het gebouw kan op allerlei plaatsen. De modulaire opbouw zorgt voor een eenvoudige plaatsing en installatie. De modules zijn een voor een in een rek met open verdeler te plaatsen.

Een belangrijk punt bij de uitvoering van een SWeKOS systeem is dat er een buiten unit nodig is voor het onttrekken of afgeven van energie, zodat het absorptie proces de gewenste energie kan leveren.



Figuur 52 De module: energie batterij.



Figuur 53 Modulaire opbouw van een SWeKOS met energie batterijen geplaatst in een rek

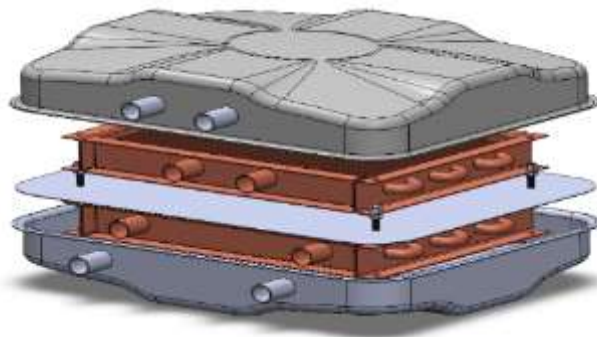


4.8.4 Uitwerking Productieproces

Hier worden de hoofdlijnen aangegeven de opzet van de industriële productie. Op basis van de beschikbare kennis binnen de projectgroep is een pakket van eisen vanuit het industriële perspectief opgesteld. De hoofdlijnen voor de industriële productie van de energie batterij worden beschreven.

Een SWeKOS systeem wordt opgebouwd uit modules. Deze modules worden de energy batterij genoemd. Deze energy batterij, bestaat uit de volgende componenten:

- Module als vacuümbehuizing, met daarin de gecoate vin en tube warmtewisselaar, een verdamper/condensor (V/C), een dampdichtheid laag tussen de warmtewisselaar en absorber/condensor, een regelbare vacuüm klep en doorvoeren voor de aansluitingen op de warmtewisselaar en absorber/condensor.
- Hydraulische kleppen en een regeling voor de aansturing van de warmte batterij



Figuur 54 Opbouw module

4.8.5 Kostprijs

De eerste kostprijs schatting van een SEM systemen bij een productie van 50 systemen per jaar is in de orde van circa € 1500 (ex btw) inclusief arbeid. Een kostenreductie kan worden gerealiseerd doormiddel een kostenreductie op materialen en arbeid, door inkoop op een grotere schaal en het standaardiseren en automatiseren van de arbeid.

In hoofdstuk 5.10 wordt het businessplan behandeld met de business case. Hier is de kostprijs verder uitgewerkt en gegeven.

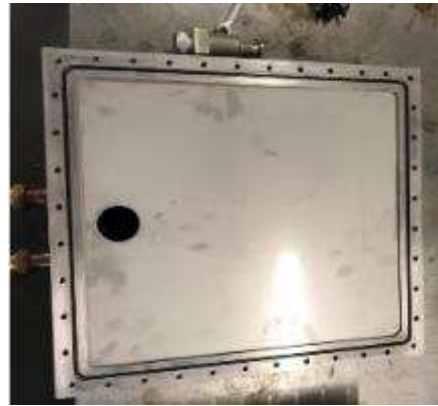
**Conclusie Redesign**

Op basis van de resultaten van de beproeving van het complete concept SWeKOS systeem en de uitkomsten van het Energypads 2.0 project is besloten dat er een redesign van het concept moet plaats vinden. Het redesign heeft geresulteerd in het ontwerp van de zogenaamde sorptie energie module ((SEM). In samenspraak met de industrie is een rechthoekige module gedimensioneerd met gevinde buis warmtewisselaars als absorber/condensor en een gevinde buis warmtewisselaar voor het inbrengen van de TCM. Deze SEM is handzaam vanwege de afmetingen van circa 0,6*0,7* 0,4m (diepte, breedte, hoogte) en een gewicht van circa 25 kg. Een concept productie proces is ontwikkeld en de geschatte productieprijis van een SEM is in de orde van grootte zoals bedacht. Door een modulaire opbouw van de SEM in een rek met open verdelers is het mogelijke om een toegesneden ontwerp per toepassing te maken.

4.9 Testen Sorptie Energie Module

4.9.1 Inleiding

Het nieuwe ontwerp van SWeKOS gebaseerd op SEM modules is gebouwd. Het ontwerp van de uiteindelijke SEM module is beschreven. In figuur 55 is de SEM weergegeven.



Figuur 55 De opbouw van de SEM module. De rechthoekige onder en bovenkanten de tussenplaat met doorvoer.

De Sem wordt in de opstellingen bij RTB beproefd. De eerste beproeving zal het op onderdruk brengen (nagenoeg vacuüm) van de complete module zijn. De tweede beproeving zal het laden, opslaan en ontladen van de SEM gevuld met TCM zijn. In de navolgende figuur 56 is de complete gerealiseerde SEM gepresenteerd, inclusief de aansluitingen voor de warmtewisselaar en absorber/condensor en opening voor het bedienen van de vacuüm klep.



Figuur 56 De complete SEM



4.9.2 Druk test vacuüm behuizing

Het ontwikkelen van de vacuümkamer is in stappen uitgevoerd. Ten eerste is een test uitgevoerd om te bepalen of het materiaal van de rechthoekige doos geschikt is om een vacuümkamer mee te bouwen. Het voordeel van deze rechthoekige doos is de directe beschikbaarheid vanuit de industrie en de lage kostprijs.

Deze test is succesvol afgerond. Er is aangetoond dat het mogelijk is om een goede sealing te krijgen tussen de twee vlakken en er ontstaan geen non condensable gassen. Bij deze test is ook geconstateerd dat er vervorming van het materiaal optreedt. Met name bij de hoeken ontstaat een hoge spanningsconcentratie. Door een interne constructie bleef de vorm van de vacuümkamer intact.

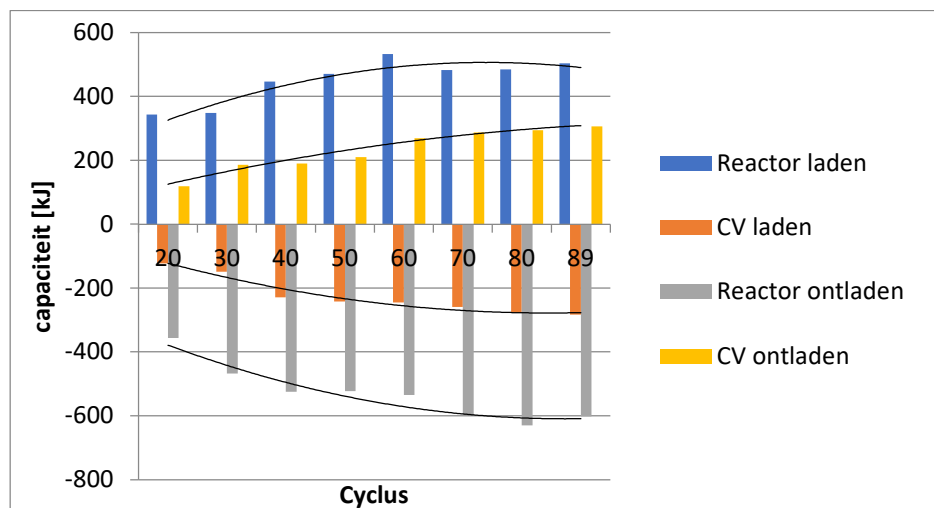
Vervolgens is dit concept verder ontwikkeld en is de reactor en condensor/verdamper in het systeem gemonteerd. Bij het afpompen bleek dat de vacuümkamer niet voldoende stevigheid biedt om de onderdruk te weerstaan.

Het ontwerp is verstevigd zodat de testen uitgevoerd kunnen worden.

4.9.3 De functionele test

De testopstelling bij RTB is gebruikt en aan de hand van het testplan zijn de beproevingen uitgevoerd. In de testopstelling beschreven en het testplan getoond. Op basis van deze testen zijn de navolgende resultaten behaald met de SEM gevuld met de TCM K_2CO_3 . De opslagcapaciteit wordt in figuur 57 gegeven.

Deze capaciteit komt overeen met de verwachtingen. Gedurende het cycleren worden afwijkende capaciteiten gemeten. Er zit een relatief grote afwijking tussen de cyclussen. Het is op dit moment niet duidelijk waar deze afwijking vandaan komt. Dit kan aan de meetopstelling liggen, maar ook aan de stabiliteit van het TCM.



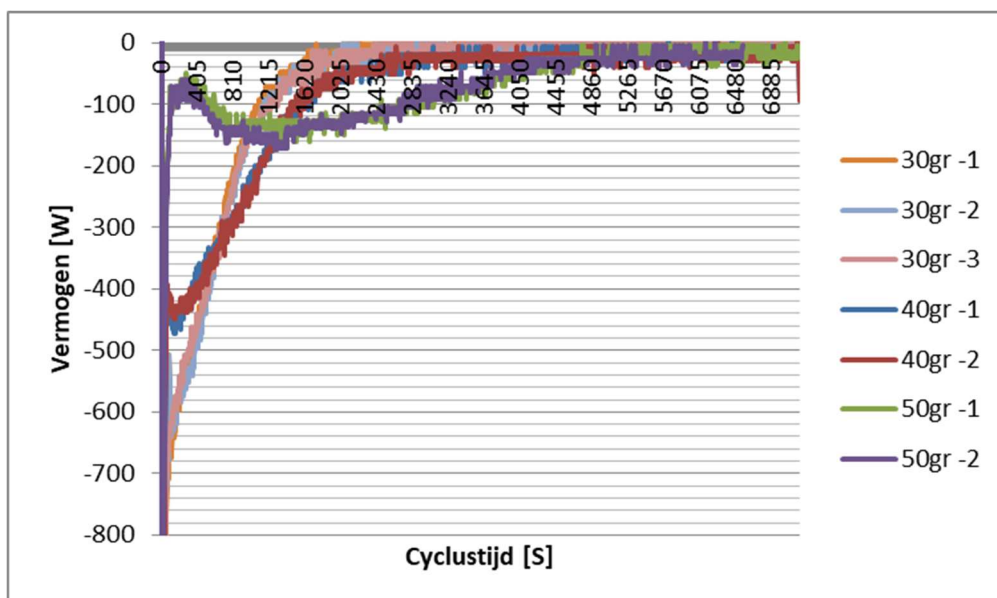
Figuur 57 Energie capaciteit van de SEM bij een aantal cycli

Naast de opslagcapaciteit speelt het geleverde vermogen een grote rol in de marktacceptatie. In figuur 58 en 59 is de relatie tussen de vermogens en de ingestelde reactortemperatuur reactor temperatuur tijdens hydratatie te zien. Het vermogen in een module wordt bepaald door het drukverschil tussen de verdamper en de reactor. Het heersende drukniveau wordt geregeld door de ingestelde temperaturen. Hoe groter het temperatuurverschil, hoe groter het drukverschil. In 58 is het vermogen van de reactor bij 30, 40 en 50 °C geplot. Van elk temperatuurniveau zijn meerdere cyclussen getoond. Zo is te zien dat bij 50°C het reactor vermogen tot ≈150 Watt piekt, bij 40°C het

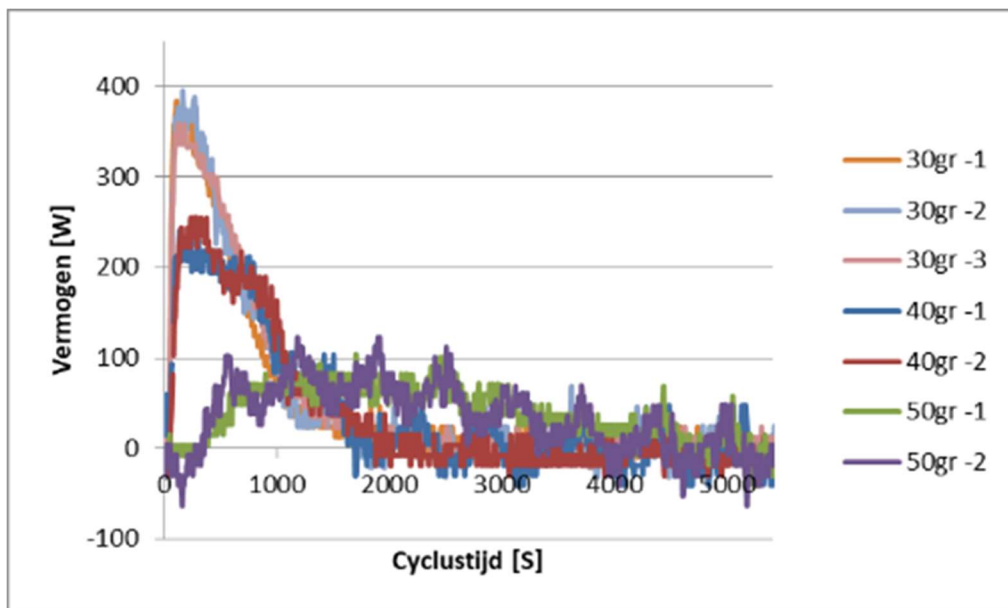


reactorvermogen tot ≈ 450 Watt piekt, en bij 30° het reactorvermogen tot ≈ 750 Watt piekt. In figuur 59 is het verdampervermogen bij verschillende reactortemperaturen getoond als functie van de tijd. Bij een reactortemperatuur van 50°C is een piekvermogen van ≈ 100 Watt gemeten. Bij een reactortemperatuur van 40°C is de piek van het verdampervermogen ≈ 250 Watt. Bij een reactortemperatuur van 30°C is de piek van het verdampervermogen ≈ 380 Watt.

Een tweede gevolg van de ingestelde reactortemperaturen is de mate van de levering van het vermogen. Omdat het K_2CO_3 een maximale hoeveelheid waterdamp kan adsorberen, is de capaciteit bij elke temperatuur ongeveer gelijk (alhoewel bij een lagere reactortemperatuur een grotere adsorptie van waterdamp mogelijk is). Dit heeft tot gevolg dat het de bij hogere reactortemperaturen een korte periode vermogen wordt geleverd, terwijl bij een lager reactortemperatuur een langere periode vermogens worden geleverd. Dit komt duidelijk naar voren in figuur 58 en figuur 59.



Figuur 58: Vermogen reactor bij verschillende temperaturen.

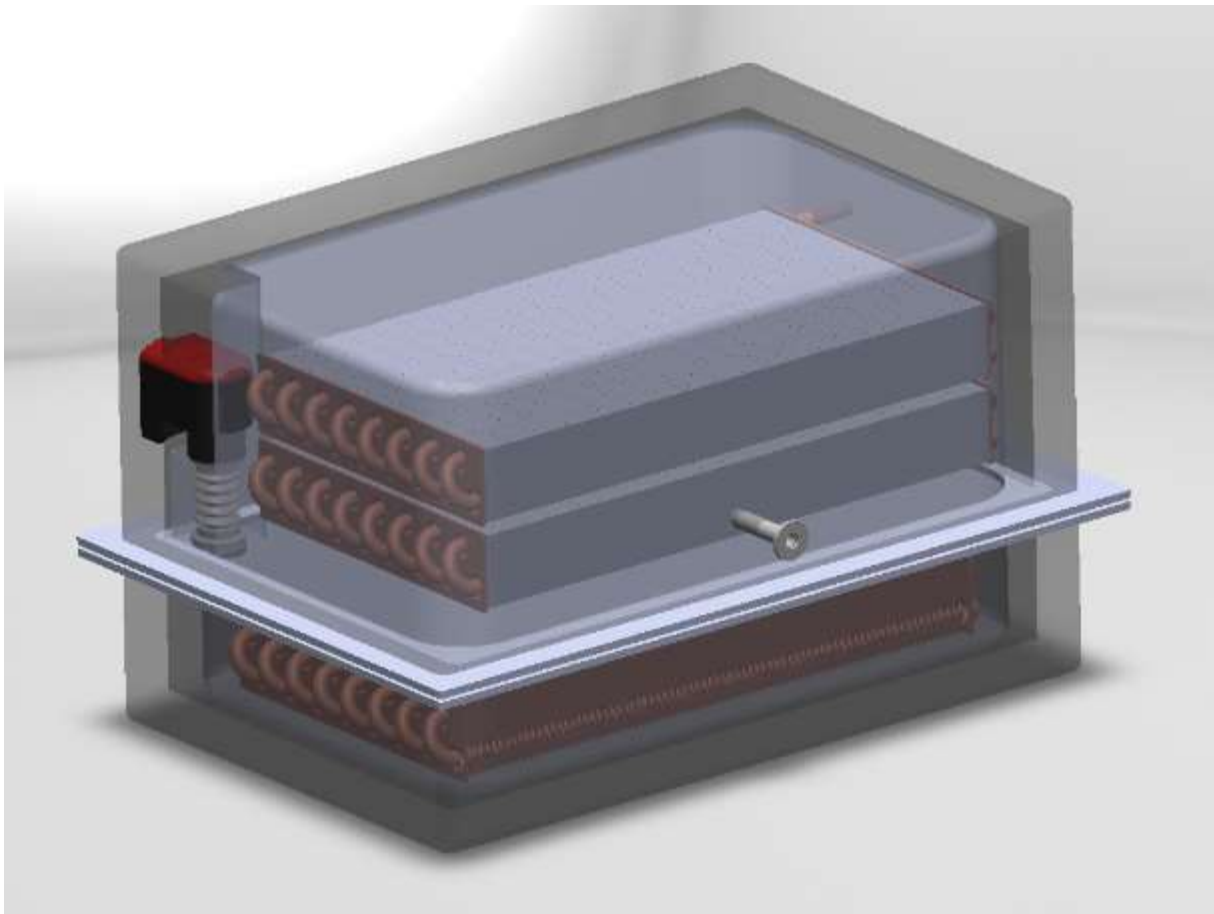


Figuur 59: Verdampervermogen bij een hydratatietemperatuur van respectievelijk 30, 40 en 50°C

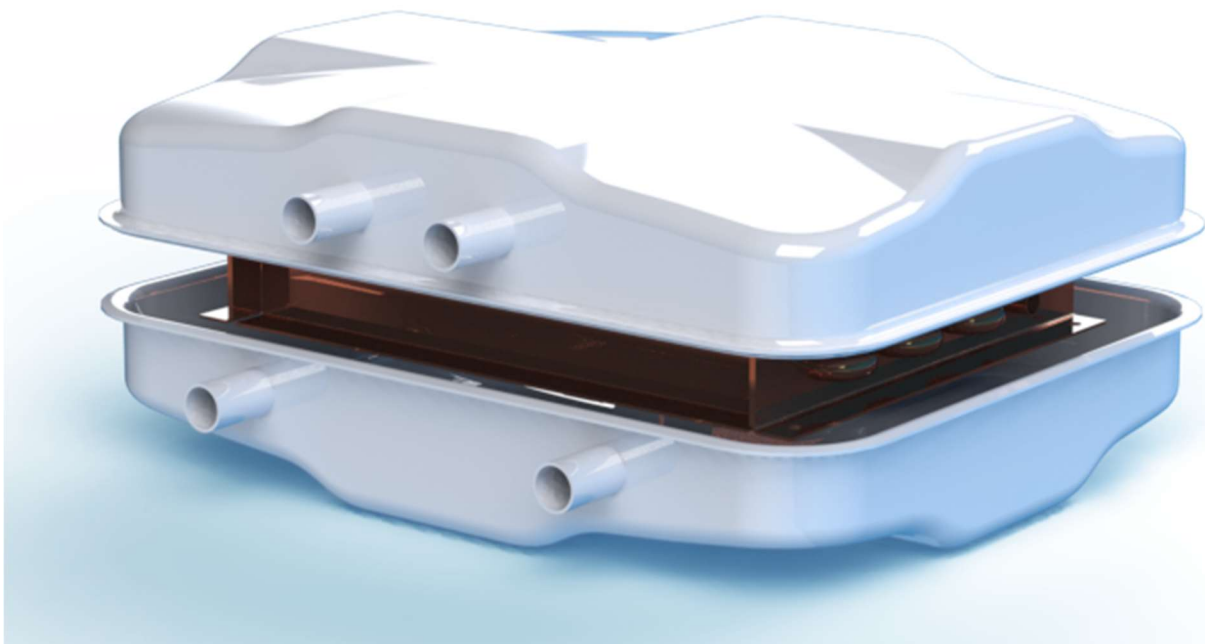
De uitkomsten liggen in de lijn der verwachting en komen overeen met eerder gemeten vermogens. Hierbij wordt echter wel een slag om de arm gehouden, want de gebruikte meetopstelling is ontwikkeld voor grotere systemen. De meetnauwkeurigheid bij lage volumestromen en kleine temperatuurverschillen is relatief groot.

5.9.4 Blauwdruk sorptie energie module

In dit hoofdstuk is de SEM beschreven. De energetische doelstellingen kunnen met dit ontwerp gerealiseerd worden. De gebruikte rechthoekige “dozen” voldoen niet aan de eisen van vacuüm met betrekking tot de sterkte. Daarom is een nieuwe blauwdruk voor het ontwerp van de SEM gemaakt. Deze nieuwe blauwdruk is in belangrijke mate gebaseerd op het vorige ontwerp. Belangrijk is dat onder en boven schalen zodanig worden ontworpen en geproduceerd dat deze tegen vacuüm kunnen. Daarnaast wordt in het bijgestelde ontwerp ook de resultaten naar het onderzoek naar een effectieve absorber/condensor opgenomen. In del 5.6b is dit onderzoek en de voorlopige resultaten gepresenteerd. De uiteindelijke conclusies zullen leiden tot een aanpassing in de uitvoering van de absorber/condensor erop gericht om zoveel mogelijk vermogen te kunnen overdragen of opnemen. Dit wordt in het ontwerp voor het SWeKOS2 project meegenomen. De aanpassingen in het ontwerp nauwelijks invloed op de productiekosten. De ingekochte boven en onder schalen worden iets duurder. Op basis van een concept productieproces is een kostprijs af fabriek begroot. De kostprijs van de gemodificeerde SEM module wordt begroot op €1000,00 bij in huis productie van kleine aantallen. Deze kostprijs heeft de potentie bij grote aantallen en industrieel en automatisch productie proces te dalen naar €500,00. De levensduur wordt op basis van de testresultaten ne ervaring met dergelijke systemen geschat op meer dan 20 jaar. Hier wordt het ontwerp in de volgende figuren gepresenteerd.



Figuur 60 Bijgesteld ontwerp SEM module



Figuur 61 Uitvoering nieuwe SEM module

**Conclusie Testen SEM**

De beschikbare rechthoekige doos (reeds industrieel geproduceerd) is niet geschikt als vacuümkamer. De dunwandige “doos” niet sterk genoeg om de 1 bar onderdruk te weerstaan.

De ontworpen SEM, verstevigd, voldoet aan de energetische uitgangspunten. Het horizontaal en liggend plaatsten van de condensor/verdampers en reactor horizontaal met een tussenplaat met afsluiter is een succesvol ontwerp. De eerste testen van de SEM gevuld met de TCM K_2CO_3 zijn succesvol. De gemeten capaciteit en vermogens komen overeen met de verwachtingen.

Een aangepast concept met vacuüm bestendige rechthoekige dozen wordt ontworpen en lijkt aan de uitgangspunten van de kostprijs en levensduur te voldoen.



4.10 Businessplan en analyse

4.10.1 Inleiding

De ontwikkelingen in het SWeKOS project hebben geleid tot een redesign van het SWeKOS systeem. Dit concept wordt nu modulair opgebouwd uit de zogenaamde de SEM modules en in een rek met openverdeler opgebouwd tot het systeem met gewenste capaciteit en vermogen. Deze SEM module is gemaakt en getest. Dit heeft tot verder bijstellingen van het product geleid. Een blauwdruk voor een sorptie energie module is gemaakt gebaseerd op en het herontwerp en de test uitkomsten. In het vertrouwelijke concept businessplan is de kostprijs analyse, productieproces en levensduur geanalyseerd voor SWeKOS uitgaande van de blauwdruk

Het marktsegment van Nederlandse utiliteitsgebouwen en woningen aangesloten op een warmtenet wordt in eerste instantie geselecteerd om de uitrol van SWeKOS vorm te geven. Na de introductie in Nederland wordt de uitrol in Europa voorzien. De markt introductie van het SWeKOS systeem wordt met name door de installatiesector vorm gegeven in combinatie met vernieuwing of aanpassing van de installaties voor verwarming en koeling, en zeer specifiek voor het marktsegment dat aangesloten is op een warmte net.

4.10.2 Marktonwikkeling

In het concept businessplan is de marktonwikkeling verder uitgewerkt voor de positionering en uitrol in de markt. In eerste instantie zal de uitrol van het product plaats vinden in de Nederlandse markt. Vervolgens wordt het product in de EU markt geïntroduceerd.

Een SWeKOS systeem is voor de business analyse hierbij als volgt gedefinieerd:

- Opslag capaciteit 60 kWh,
- vermogen 5 kW
- opgebouwd uit 8 SEM modules
- geplaatst in een rek met openverdeler en regeling
- uitgerust met een buitenkoeler
- aangesloten op de installatie.

Door de flexibiliteit van her rek met openverdeler kan een SWeKOS systeem met meer of minder SEM modules geleverd worden. In dit hoofdstuk is uitgegaan van het gemiddelde systeem. De geprognosticeerde ontwikkeling is in de volgende tabellen weergegeven.

Aantal Modules	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Nederland	40	200	800	2000	4000	8000
Internationaal	0	80	400	1200	2000	3200
Totaal	40	280	1200	3200	6000	11200

Tabel 8 Prognose productie SEM

Aantal SWeKOS systemen	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Nederland	5	25	100	250	500	1000
Internationaal	0	10	50	150	250	400
Totaal	5	35	150	400	750	1400

Tabel 9 Aantallen SWeKOS in de markt



4.10.3 Productieproces: investeringen en kosten

Voor de productie van de SEM is uitgezocht welke materialen er worden toegepast en wat de kosten daarvan zijn (Bill of Materials). Bij toename van het aantal verkochte modules en systemen worden ingekochte producten zoals de rechthoekige reactor behuizing zelf geproduceerd.

De kostprijs analyse heeft geleid tot een schatting van de BIM..

Ook is een eerste Bill of Labour opgesteld, oftewel de loonkosten voor het produceren van een module.

Zodoende wordt de productie prijs van een SEM begroot op een markt conforme prijs.

Naast de directe kosten voor materiaal en arbeid, zijn er ook investeringskosten, marketing, R&D en andere overhead kosten voorzien. In combinatie met de verwachte marktontwikkeling, de opschaling en automatisering is een eerste schatting gemaakt van de business.. De verwachting wordt gehanteerd dat na afloop van het SWeKOS 2 project gestart gaat worden met de preproductie voor demonstratie in de markt en optimalisatie van de business.

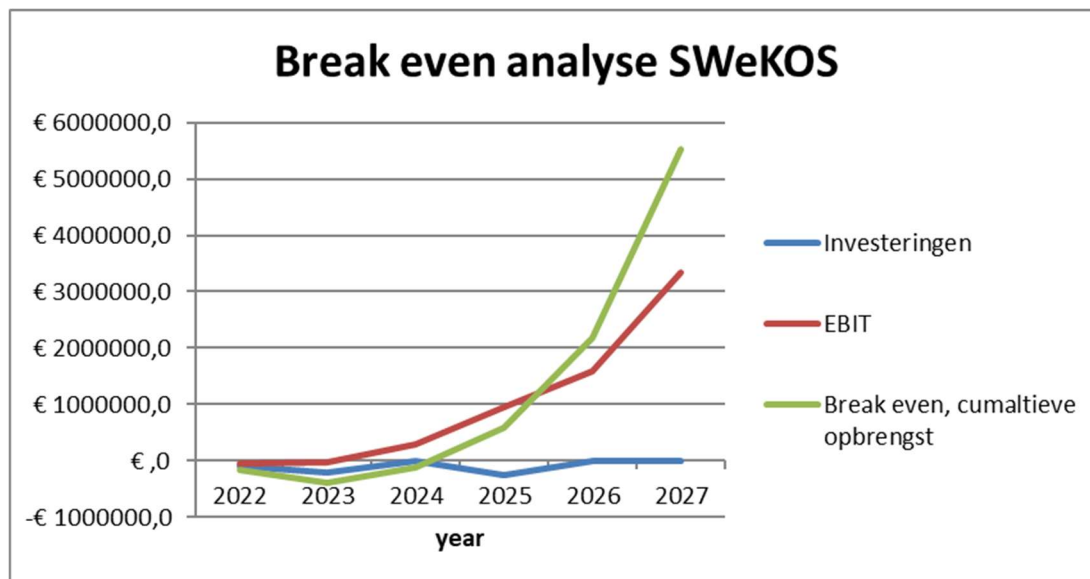
Op basis van de marktontwikkeling en investeringen kunnen de inkomsten worden vastgesteld. De kosten voor de productie zijn door de BIL en BOM bekend (operating expenses). Kosten voor marketing en sales, research en development, overhead en afschrijving leiden tot de winst en verlies rekening gegeven in tabel 14.

Projected P & L	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Sales revenues	€ 63.000	€ 417.693	€ 1.693.785	€ 4.275.798	€ 7.589.325	€ 13.410.630
Operating expenses	€ 40.000	€ 271.250	€ 1.125.000	€ 2.900.000	€ 5.250.000	€ 9.450.000
Marketing & Sales	€ 25.000	€ 100.000	€ 150.000	€ 200.000	€ 300.000	€ 201.159
Research & Development	€ 30.000	€ 30.000	€ 60.000	€ 120.000	€ 200.000	€ 250.000
Overhead costs	€ 25.000	€ 50.000	€ 75.000	€ 100.000	€ 250.000	€ 141.750
Depreciation costs	€ 12	€ 252	€ 1.078	€ 5.271	€ 9.883	€ 18.448
EBIT	€ -57.012	€ -33.808	€ 282.707	€ 950.527	€ 1.579.442	€ 3.349.273
	-90%	-8%	17%	22%	21%	25%

Tabel 10 Winst en verlies rekening SWeKOS

4.10.4 Omzet, winst en verlies rekening

In tabel 14 zijn de kosten en opbrengsten gegeven. Deze analyse leidt to break even na 2,5 jaar. In figuur 69 is dit weergegeven. Na circa 2,5 jaar wordt break even bereikt. In het business model is ook een revenu stroom gedefinieerd naar De Beijer RTB gebaseerd op het intellectuele eigendom en de voor investeringen die door RTB gedaan zijn. Er wordt een bedrag van €250 euro per verkochte SWeKOS als licentie bedrag in rekening gebracht. Dit bedrag wordt echter pas uitgekeerd nadat de liquiditeitspositie dit toelaat.



Figuur 62 Break even analyse SWeKOS

Totaal Business plan productie en verkoop	Een compact, verliesvrij opslag systeem bestaat uit 8 SEM modules met intotaal een capaciteit van 60 kWh en vermogen van 5 kW. Compleet systeem inclusief regeling en aansluitingen en geplaatst in een rek met openverdelers.				
	2023	2024	2025	2026	2027
Aantal systemen verkocht	35	150	400	1500	4000
Opbrengst verkoop	€ 383.052	€ 1.540.143	€ 3.550.326	€ 12.645.450	€ 32.717.250
Kosten: productie, marketing & sales, afschrijving, research en development, overhead	€ 329.008	€ 1.271.880	€ 3.233.901	€ 11.683.980	€ 29.012.220
EBIT	€ 54.044	€ 268.263	€ 316.425	€ 961.470	€ 3.705.030
Investeringen	€ 100.000,00		€ 200.000,00		
Break even	€ -162.469	€ 105.794	€ 222.219	€ 1.183.689	€ 4.888.719
extra FTE werkgelegenheid	2,5	9	22	58	115
De Beijer RTB licentie inkomsten: 250 euro per SWeKOS		€ 37.500	€ 100.000	€ 375.000	€ 1.000.000
Marge op productie	€ 74.000	€ 350.000	€ 700.000	€ 2.090.000	€ 3.750.000

Figuur 63 Overzicht SWeKOS bv 2023-2027

**Conclusie Business case**

Op basis van de voorlopige inschattingen van de materialen, loonkosten en productie wordt een marktconforme kostprijs voor een SWeKOS systeem berekend. Een voorzichtige marktintroductie via Nederlandse demo projecten is voorzien in 2022 en 2023. Hierna vindt uitrol in de markt en opschaling van de productie plaats. Het businessmodel laat zien dat op basis van deze behoudende inschattingen break-even wordt bereikt na 2,5 tot 3 jaar. Gebaseerd op dit concept businessplan zijn de vooruitzichten voor uitrol in de markt, bij een succesvolle door ontwikkeling van het product, zonder meer goed.



5 Conclusies en Aanbevelingen

5.1 Conclusies

- Met de uitvoering van het SWeKOS project is de modulaire warmtebatterij als product weer een stap dichterbij productie en marktintroductie gekomen.
- Het beproeven van het complete marktconforme systeem, opgebouwd uit 4 reactoren inclusief sturing en regeling, onder realistische omstandigheden is in dit project belangrijk gebleken. Op basis van de eerste resultaten is het programma van eisen bijgesteld. Zo is het aantal kleppen in het systeem fors gereduceerd door het uitgangspunt van tegelijkertijd kunnen laden van de ene reactor en het ontladen van een andere reactor losgelaten.
- Het resultaat van het Energypads 2.0 project is ingebracht in het SWeKOS project. Dit heeft tot aanpassing van het energypads concept geleid voor de SWeKOS reactor. Tevens gaf het resultaat van dit project aan dat de zogenaamde KTL coating op systeemonderdelen goed bestand is tegen de inwerking van met name de TCM Na₂S en dat de ervaringen met deze TCM goed zijn.
- Het numeriek rekenmodel in COMSOL van de TU/e heeft bijgedragen in het inzicht hoe damp- en warmtetransport verlopen in de reactor. Op basis van deze berekeningen en ervaringen bij De Beijer RTB met de Solabcool zijn de nieuwe reactoren en absorber/condensor ontwikkeld. Door ontwikkeling van dit numeriek rekenmodel tot ontwerp tool is voorzien in het vervolg project.
- In samenspraak met de industrie is het ontwerp van SWeKOS vereenvoudigd tot de modulaire opbouw door middel van Sorptie Energie Modules. Deze SEM is ontworpen en getest. De modulaire opbouw wordt gerealiseerd door de SEM in een rek met openverdelers te plaatsen. Het testen van de SEM heeft wederom laten zien dat realistische testen van full-scale systemen noodzakelijk is. Het ontwerp van de SEM is bijgesteld met verstevigingsribben om het vacuüm te kunnen weerstaan. Het numerieke rekenmodel is een belangrijk tool voor het begrijpen van de fysische fenomenen tijdens het proces van absorptie en desorptie.
- De zoektocht naar andere beter geschikte thermochemische materialen was niet succesvol. TCM's op basis van alcoholaten en ammoniak zijn wel gedetecteerd maar hiervoor is nog veel (fundamenteel) onderzoek en ontwikkeling nodig om tot bruikbare TCM's in de praktijk te komen. Daarom zal in het vervolg project SWeKOS 2 gewerkt worden met de bekende TCM's (K₂CO₃, CaCl₂, en Na₂S).
- De emulator bij TNO is uitgebreid en geschikt gemaakt voor het dynamische en real time testen van warmte batterij opgenomen in een installatie van een gebouw. Dit is een waardevolle test omgeving om concepten te beproeven.
- Het redesign van de SWeKOS gebaseerd op de modulaire opbouw van SEM's in openverdelers biedt goede mogelijkheden voor flexibiliteit. Daarnaast is de opbouw met SEM's in een rek met openverdeler handzaam voor het installeren.
- De concept business case inclusief eerste blauwdruk voor productie voor een SWeKOS systeem is uitgewerkt. Het lijkt goed mogelijk om een SWeKOS systeem tegen marktconforme prijs te produceren en in de markt te zetten, waarbij op termijn voldoende rendement wordt gerealiseerd om de investeringen in productie en marktontwikkeling terug te verdienen.



5.2 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten van dit project wordt aanbevolen om de warmtebatterij opgebouwd uit SEM's verder te ontwikkelen als een modulair systeem. Uit eerder onderzoek is gebleken dat een KTL coating goed bestand is tegen TCM's mits goed aangebracht. Daarom wordt aanbevolen om onder andere met Na_2S maar ook CaCl_2 en K_2CO_3 verder te werken en modules te testen. Het modificeren van de eigenschappen van de TCM's kunnen zorgen voor de goede toepassing.

Het numerieke rekenmodel (in COMSOL) is verder ontwikkeld en met metingen aan het systeem geverifieerd. Het rekenmodel is erg waardevol voor de dimensionering van een SWeKOS systeem. Verdere verificatie van het model aan de hand van metingen aan SEM worden aanbevolen teneinde het model ook geschikt te krijgen voor andere configuraties. Zodoende kan een ontwerp tool voor SWeKOS worden gemaakt. Met een dergelijk ontwerp hulpmiddel is de dimensionering van deze energie opslagsystemen in relatie tot de thermo chemisch materiaal, afmetingen, gebruik en performance goed uit te voeren.

Wanneer het vervolg project SWeKOS 2 succesvol wordt afgerond wordt aanbevolen om demonstratie van het systeem in diverse toepassingen uit te voeren en te monitoren. Op deze wijze komt een geoptimaliseerd en kosteneffectief product beschikbaar in de markt.

6 Vervolg

Een compleet systeem is een belangrijke stap om zicht te krijgen op praktische zaken zoals afmetingen van het totale systeem, aansluiting en inpassing in de energie infrastructuur in een woning of kantoor, zicht te krijgen op de regel componenten en de regeling. In het SWeKOS project is een compleet systeem met de werkzame stof silicagel gebouwd en getest. In het vervolg project SWeKOS 2 wordt een compleet systeem met een TCM gebouwd en getest.

Daarnaast gaan de werkzaamheden en ontwikkeling bij de Beijer RTB door, waarbij de focus van de eigen ontwikkeling ligt op het ontwikkelen van op sorptie gebaseerd warmte en of koude systeem. Deze ontwikkeling vindt plaats in aantal EU, TKI en marktprojecten. Ook wordt hierbij gebruik gemaakt van de kennis en ervaring van de door ontwikkeling van de Solabcool, marktontwikkeling en productie.

De uiteindelijke doelstelling van het SWeKOS 2 project, als sluitstuk van de voorafgaande succesvolle projecten, is te komen tot een werkzaam, kosteneffectief en industrieel te produceren SWeKOS systeem. Na afloop van het SWeKOS 2 project moet dit duidelijk zijn. Daarna kan bij positief resultaat demonstratie in de markt plaats vinden. Demonstratie inde markt is belangrijk om en de markt te activeren voor interesse in dit product en de toegevoegde waarde te demonstreren en vervolgens de industrie de opschaling te kunnen laten verzorgen.



Literatuur

- [1] Openbaar eindrapport Energypads (TEID21504877), Henk de Beijer (RTB de Beijer), Camilo Rindt (TU/e en Aart de Geus Artenergy, afgerond TKI Urban Energy project, 21 maart 2018
- [2] Analysis and optimization of the closed adsorption heat storage bed performance, published in Journal of Energy Storage 32 (2020), Karunesh Kant a*, A. Shuklab C.C.M. Rindt a, David M. J. Smeulders , a Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, 5600 MB-Eindhoven, Netherlands, b Non-Conventional Energy Laboratory, Rajiv Gandhi Institute of Petroleum Technology, Amethi, UP 229304, India
- [3] Performance analysis of a K₂CO₃ based thermochemical energy storage using a honeycomb structured heat exchanger. Karunesh Kant a*, A. Shuklab C.C.M. Rindt a, David M. J. Smeulders, a Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, 5600 MB-Eindhoven, Netherlands, b Non-Conventional Energy Laboratory, Rajiv Gandhi Institute of Petroleum Technology, Amethi, UP 229304, India, To be published 2021
- [4] Numeriek rekenmodel in COMSOL model energypads bij de TU/e in ontwikkeling
- [5] Openbaar eindrapport Energypad 2.0 (TEUE 218001), Henk de Beijer (RTB de Beijer), Camilo Rindt (TU/e), Arie Kalkman (TNO) en Aart de Geus Artenergy, afgerond TKI Urban Energy project, januari 2021)
- [6] De Solabcool, zie www.solabcool.nl
- [7] SWEAT vaste stof warmtepomp: www.ares-rtb.nl/nl/referenties/sweat of www.SWEATBV.nl
- [8] MERITS, FP7 project agreement number: 295983, More Effective use of Renewables Including compact seasonal Thermal energy Storage, Coordinator: TNO , 2016. (confidential) www.merits.eu
- [9] Donkers, P.A.J., et al., A review of salt hydrates for seasonal heat storage in domestic applications. Applied Energy, 2017. 199: p. 45-68.
- [10] Korhammer, K., et al., Reversible formation of alcohol solvates and their potential use for heat storage. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019.
- [11] Korhammer, K., et al., Thermodynamic and kinetic study of CaCl₂-CH₃OH adducts for solid sorption refrigeration by TGA/DSC. Applied Energy, 2018. 230: p. 1255-1278.



Bijlage 1. Openbaar projectplan SWeKOS

projectplan Urban Energy tender 2017

Projectplan TKI SWeKOS



Project titel	Sorptie Warmte- en koude-opslagsysteem
Afkorting	SWeKOS
Mini samenvatting	Om tot een compacte en verliesvrij warmte- en koude-opslagsysteem te komen als product is het noodzakelijk dat het systeem industrieel en kosten effectief te produceren is en dat de werkzame thermochemische stof goed verwerkbaar is, de juiste energetische dichtheid haalt en stabiel is. In dit project wordt de maakbaarheid van een systeem getoetst door toepassing van een sorptie materiaal, silicagel. Dit materiaal is goed te verwerken, veilig en de eigenschappen zijn goed bekend, o.a. door toepassing in de SolabCool. Een compleet sorptie warmte- en koude-opslagsysteem wordt ontworpen, gebouwd en beproefd. Teven wordt de produceerbaarheid, industrialisatie en opschaling onderzocht en getoetst. Naast een businessplan worden ook een drietal zicht/demo systemen opgeleverd. In een parallel traject wordt een thermochemische materiaal ontworpen en getest. Hiermee wordt een geschikte TCM in beperkte hoeveelheid geproduceerd. Deze TCM wordt in een geschaalde reactor module beproefd om zich te krijgen op de prestaties en de fysisch chemische eigenschappen. Stabiliteit, verwerkbaarheid, niet corrosief in combinatie met een hoge energiedichtheid en goed vermogen worden onderzocht. Een gedetailleerd rekenmodel (COMSOL) wordt door ontwikkeld voor toepassing met een TCM en voor een complete reactor module. Verificatie van dit model vindt plaats en een ontwerp hulpmiddel wordt hiervan afgeleid en opgeleverd. Het project resultaat omvat de aangetoonde maakbaarheid van adsorptie warmte- en koude-opslagsysteem en een geschikte thermochemisch materiaal. Op basis van de kennis en ervaring uit dit project kan in een vervolgfase een marktrijp TCM opslagsysteem gebouwd worden.
Penvoerder	ArtEnergy bv
Contactpersoon	Aart de Geus Tel: +31 6 22933237 Email: aart.degeus@artenergy.nl
Project partners	De Beijer RTB Flamco bv TNO Radboud Universiteit Nijmegen Technische Universiteit Eindhoven
Programmalijn(en)	Lijn2 Warmte en koude installaties
Locatie waar het project wordt uitgevoerd	Nederland, Duiven, Delft, Eindhoven, Nijmegen, Doel
Totale project kosten Gevraagde subsidie	€1.249.079 € 960.548



Openbare samenvatting

Aanleiding

Al langere tijd wordt thermochemische opslag als een oplossingsroute met veel potentie gezien, vooral voor de inzet van duurzame energiebronnen. De voordelen zijn grote opslagdichtheid en vrijwel verliesvrij en met een groot energie besparend effect. Echter 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, toegesneden industrieel en schaalbaar productieproces, lange levensduur en te hoge systeemkosten.

Doel van het project

Het doel van het project is om aan te tonen dat een sorptie warmte- en koude-opslagsysteem op ware schaal grootte (globale afmetingen 1 m hoog, 1,2m * 1m) gemaakt kan worden en dat de goede werking, de produceerbaarheid en een marktconforme kostprijs hiervan aangetoond kan worden. Hierbij richt het project zich op het realiseren van het systeem gebaseerd op silicagel (adsorptie principe). Dit systeem zou met een geschikte TCM een energie-inhoud hebben van circa 60 kWh en een vermogen van 5 kW en warmte voor LT-verwarming (45°C) en of koeling (ca 15°C) leveren gedurende een periode van enige dagen of weken. Door modules van het systeem in cascade te schakelen is het mogelijk om warm tapwater mee te produceren (>60°C)

De richting voor een hogere energiedichtheid door middel van toepassing van een geschikt thermochemisch materiaal wordt i.s.m. de universiteiten uitgewerkt. Een reactor module op schaal wordt hiermee getest.

De doelstellingen komen samen tot de uiteindelijk hoofddoelstelling namelijk alle randvoorwaarden creëren zodanig dat in principe aangetoond wordt dat een compact warmte- en koude-opslagsysteem met een goed TCM gemaakt, geproduceerd en in de markt gezet kan worden. Dit wordt aan de hand van full scale demo modellen aan de markt getoond.

Korte omschrijving van de activiteiten

Om te komen tot een warmte- en koude- opslagsysteem wordt allereerst een reactor module op 100% schaal met als werkzame stof silicagel ontworpen, gebouwd en getest.

Op basis van deze reactor module wordt het complete systeem samengesteld, inclusief regel en sturing, aansluiting op de installatie en dergelijke. Dit complete systeem wordt getest in de emulator van TNO. De regeling en sturing van de emulator wordt geschikt gemaakt om dit systeem in verschillende condities te testen.

Een gedetailleerd rekenmodel (COMSOL) van de reactor module wordt geverifieerd en uitgebreid naar een thermochemisch materiaal. Vervolgens wordt in het project een handzaam ontwerptool voor een SWeKOS gemaakt.

De productiewijze, industrialisatie en opschaling wordt onderzocht, leidend tot een businessplan en een beperkt aantal zicht en demo systemen. Het maken van deze demo producten valideert de productie aanpak en industrialisatie en leidt tot inzicht in de kostprijs.

Vanuit de kennis van Solid State Chemistry wordt gewerkt aan toegesneden TCM's met eigenschappen zoals vastgesteld in het programma van eisen. Beperkte hoeveelheden van deze ontworpen TCM's worden beproefd en uiteindelijk in een geschaalde reactor module getest.

Resultaat



Een compleet sorptie warmte- en koude-opslagsysteem, inclusief regeling, sturing en besturing, wordt ontworpen, gebouwd en in het lab getest. Dit op de schaal van een markt conform eindproduct.

De test resultaten worden gebruikt om een gedetailleerd rekenmodel te verifiëren Een rekenmodel dat ingezet kan worden als ontwerptool wordt opgeleverd

De productiewijze, industrialisatie en opschaling wordt vastgesteld.

Een businessplan wordt opgesteld. Een aantal zicht en demo modellen worden opgeleverd met als doel de communicatie met de markt tastbaar en toetsbaar te maken

Vanuit de fundamentele kennis van Solid state Chemistry worden TCM's ontwerpen, gemaakt en beproefd. Een op schaal gemaakte reactor module toont de toepasbaarheid van deze TCM.

Als deze ontwikkeling succesvol is in dit project, dan kan na afloop een vervolgtraject worden ingezet waarbij de werkzame stof een thermochemische stof is (gebaseerd op absorptie) dat leidt tot een systeem dat een marktconforme kostprijs heeft, goed te produceren is en de gewenste energie-opslag parameters heeft (compact, 5 * meer opslag dan water en verliesvrij op lange termijn).



1. Deelnemers en derden

Overzicht van deelnemers

Naam deelnemer	Type organisatie	Rol in project
ArtEnergy	Klein bedrijf	Project Management, inbreng kennis fysica energie-opslag, analyse en modellering, bijdrage productieproces en business plan
De Beijer RTB	Klein bedrijf	Ontwikkelaar ,ontwerp van sorptie reactors en systemen en gebouw integratie .Produceren opslagsystemen en prototypes, inbrengen thermo chemische kennis
Technische Universiteit Eindhoven	Onderzoeksorganisatie (niet-economische activiteiten)	Ondersteuning karakterisering reactor, detail Modellering reactor en verificatie, ontwerp modellering
Radboud Universiteit Nijmegen	Onderzoeksorganisatie (niet-economische activiteiten)	Industrieel onderzoek aan thermochemische materialen, optimalisatie kristalstructuren voor thermochemische toepassing
TNO	Onderzoeksorganisatie (niet-economische activiteiten)	Opzetten emulator voor testen warmte opslagsystemen in gebouwen, testen systeem met emulator, analyse performance en toepassing gebied. Inbrengen achtergrondkennis opslagsystemen
Flamco	Groot bedrijf	Inbrengen kennis van productieontwikkeling, productie middelen in relatie tot warmtepompen en energie-opslag, kennis inbreng van markt (kosten, logistiek, garantie e.d)

De hele keten is betrokken:



Los van de project partners zijn er een aantal betrokken en meewerkende partijen uit de keten, die geen deel uitmaken van dit project. Deze bedrijven hebben een ondersteuningsverklaring opgesteld



tot medewerking aan het project Sorptie Warmte- en Koude-Opslag Systeem onder andere door de deelname aan de klankbordgroep, deze zijn: Liander, Eneco, Klein Poelhuis (installatiebedrijf o.a. woning en utiliteitsbouw).

Klankbordgroep

Tijdens het gehele TKI SWeKOS project is er een klankbordgroep actief. Geselecteerde partijen die goed zicht hebben op de wensen en eisen van de eindgebruikers zijn en worden hiervoor uitgenodigd. Dit betreft de partijen die een ondersteuningsverklaring hebben gegeven en een aantal toepassers van het eindproduct.

1.2 Beschrijving deelnemers en essentiële uitbestedingsrelaties

De Beijer RTB B.V.



De Beijer Raadgevend Technisch Bureau B.V., gevestigd in Duiven en opgericht in 1982 door Henk A. de Beijer. De Beijer RTB is gespecialiseerd in innovatieonderzoek en het ontwikkelen van nieuwe product/markt combinaties. De Beijer RTB bestaat uit een groep technisch specialisten van verschillende vakdisciplines met hoogwaardige kennis op het gebied van o.a. thermodynamica, energietechniek, productietechniek en industriële. Vooral op het gebied van duurzame energie heeft De Beijer RTB talrijke studies, onderzoekprojecten en productontwikkelingen en productie uitgevoerd. Enkele voorbeelden van succesvolle productontwikkelingen zijn de warmtepomp van Atag en Vaillant, en SunRidge (nokcollector) Monier Group, de Solabcool en de ClimateBooster die in eigen beheer geproduceerd en vermarkt worden, inclusief de opbouw van productie faciliteiten. RTB beschikt over eigen laboratoria en testfaciliteiten gespecialiseerd op thermodynamische en thermochemische producten. (www.SWEATBV.nl, www.ClimateBooster.com, www.SolabCool.nl, www.ares-rtb.nl)

De Beijer RTB heeft ruime ervaring met thermochemische warmteopslag en omzettingmaterialen door onder andere de volgende projecten SWEAT (ECN/NUON), TESSEL (TKI Energo), MERITS (FP7 EU), en de ontwikkeling en productie van SolabCool en is partner in MJP-CCO (TKI Energo) en TKI EnergyPad en TKI Compas project.

Dit project versterkt de kennispositie van De Beijer RTB op het gebied van adsorptie en absorptie processen en producten. Het maken van een aantal producten op marktconforme schaal verrijkt de beschikbare kennis inzake het functioneren en geeft inzicht in de kritische punten bij het produceren van dergelijke producten.

De bijdrage van De Beijer RTB bestaat uit het ontwikkelen en bouwen van de reactor en systeem gebaseerd op silicagel inclusief het productieproces. Specifiek worden hiervoor de componenten voor de reactor namelijk de absorber en condensor, de regelklep, het regelsysteem en de warmtewisselaar ontwikkeld.

De betrokken personen vanuit De Beijer RTB omvatten: een projectleider, product specialisten thermochemie (absorptie en adsorptie kennis) en een productie engineer. Daarnaast zullen de in-home lab faciliteiten worden ingezet.



Artenergy BV

Artenergy B.V., gevestigd in Delft en opgericht door Aart de Geus in 2013.

Artenergy is werkzaam op het gebied van energie in de gebouwde omgeving en richt zich op het opzetten en uitvoeren van onderzoek, ontwikkeling en innovatie. Dit samen met vernieuwende kleine en grote Europese bedrijven. Specifiek op het gebied van energie-opslag wordt hier kennis en kunde ingezet. Het leiden van dergelijke innovatieprojecten wordt gecombineerd met gedegen kennis van het werkveld, de markt en de technologie.

Artenergy initieert en begeleidt nieuwe bedrijven op het gebied van energiebesparing en duurzame energie. Artenergy voert het projectmanagement uit, en voegt bovendien technisch-wetenschappelijke knowhow toe. Van energiesystemen, zonne-energie tot nieuwe businessmodellen.

Binnen het project richt Artenergy zich op het samenbrengen en evalueren van de componenten tot een compleet systeem inclusief regeling. Hierbij staat de praktische werkwijze voorop. Het systeem wordt de opmaat naar een TCM warmte opslagsysteem (in een mogelijk vervolg) dat marktconforme specificaties (prijs, prestatie, levensduur, installatiegemak) heeft goed te produceren is past bij de eindgebruiker.

Technische Universiteit Eindhoven



Technische Universiteit Eindhoven: EnergyTechnology (ET)

De groep ET van de TU/e heeft diverse projecten lopen op het gebied van energieopslag (o.a. via de TKI (CCO) en Energy Pads). Tevens wordt binnen de groep actief aan Europese projecten op het gebied van energieopslag deelgenomen. De groepen ET en TPM hebben recent gezamenlijk een geavanceerd lab geopend (het Darcy Lab) voor karakterisering en visualisatie van o.a. TCM materialen en reactoren. Tevens beschikt de groep over uitgebreide kennis en ervaring op het gebied van multi-scale modelering van opslag materialen. De universiteit heeft als doel om kennis te ontwikkelen die nodig is voor technologische doorbraken op lange termijn.

Metingen aan de reactor worden gebruikt om detail modellen te toetsen en door te ontwikkelen. Het betreft de doorontwikkeling van detail modellen voor het warmte- en stoftransport die gebruikt kunnen worden voor het vergroten van het fysisch inzicht op de kleine schaal en voor het ontwerp van een efficiënte reactor op grotere schaal.

Vanuit de TU/e zullen prof David Smeulders en associate prof. Camilo Rindt deelnemen. Zij zullen masterstudenten en postdocs inzetten ter ondersteuning van de toolontwikkeling, verificatie van het COMSOL-model van een reactor en het ontwikkelen van een ontwerp en systeem model.



Radboud Universiteit Nijmegen (www.ru.nl/ssc)

Radboud Universiteit Nijmegen: Faculty of Science, research group Solid State Chemistry

De groep SSC heeft als missie om fundamentele kennis op te bouwen van de processen die plaats vinden tijdens de nucleatie en groei van kristallen. Er wordt binnen de vakgroep gewerkt aan een aantal onderwerpen, zoals kristalmorfologie, vaste stof-vloeistof interfaces, polymorfie, faseovergangen en chirale scheiding. Het onderzoek wordt verricht aan een breed scala van materialen, waaronder proteïnen, organisch kristallen en zouten. De groep gebruikt de verkregen kennis om de fysische en chemische eigenschappen van de kristallen te optimaliseren voor toepassingen. Te denken valt aan sturing van de kristalmorfologie, de polymorfe vorm en het



fasegedrag, Zo is het van belang om tijdens cyclische faseovergangen, zoals die plaatsvinden bij thermochemische toepassingen, de kristalmorfologie en structuur intact te houden. De nodige lab faciliteiten en instrumenten voor dit onderzoek zijn aanwezig in de vakgroep. Binnen het project zal prof. Elias Vlieg werken aan het fundamentele begrip van thermochemische materialen en dan specifiek de kristalnucleatie en -groei van de relevante zouten en hun gedrag tijdens faseovergangen en (de)hydratieprocessen. Op deze wijze wordt fundamentele kennis op het gebied van de vaste stof chemie gekoppeld aan de structuur, productie en samenstelling van thermochemische materialen. Fundamenteel begrip zal leiden tot TCM waarvan de eigenschappen beter voorspeld en begrepen worden zodat TCM te maken zijn die optimale eigenschappen hebben. Voor dit project wordt voorzien dat prof Elias Vlieg zijn staf, masterstudenten en een postdoc zal inzetten.

TNO



Nederlandse organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek TNO (TNO, www.tno.nl)

In lijn met de doelstelling van de Europese en Nationale overheid werkt TNO aan de thema's 'Urbanisatie' en 'Energie'. Binnen dit kader werkt TNO al ruim 15 jaar aan warmteopslag materialen, systemen en warmte-optimalisatietechnieken. TNO heeft samen met andere partijen verschillende testmodules voor thermochemische opslag ontwikkeld en het gebruik hiervan gemodelleerd en gedemonstreerd, onder andere in de volgende projecten: E-hub (EU), EINSTEIN (EU), TESSEL (TKI EnerGO), Icoon (nationaal), MERITS (EU), LOCOSTO (TKI JIP EBI), MJP CCO (TKI EnerGO) en CREATE (EU). Deze aanpak zal binnen dit project worden toegepast. TNO heeft ruime ervaring met thermochemische warmteopslag materialen en systemen in diverse projecten. Dit project past binnen de in samenwerking met TKI Urban Energy gepresenteerde roadmap en draagt bij aan een versterkte kennispositie van TNO op het gebied van warmteopslag, systeemintegratie, demonstratie, en een versnelling van het op de markt introduceren van compacte warmte-opslag systemen en heeft daardoor directe raakvlakken met het TKI Meerjarenprogramma Compacte Conversie en Opslag.

De bijdrage aan het project is dat TNO de software van de emulator geschikt zal maken voor het beproeven van de thermochemische warmtepomp met geïntegreerde opslag. Op basis van deze testen zal TNO de meetresultaten analyseren en systeem studie uitvoeren.

De betrokken medewerkers zijn wetenschappelijk medewerkers op het gebied van energiesystemen en experts voor het uitvoeren van de testen met de emulator.

Flamco bv



De Flamco Groep is onderdeel van Aalberts Industries N.V. en richt zich op de ontwikkeling, productie en verkoop van kwaliteitscomponenten voor HVAC-toepassingen. In meer dan 70 landen bieden wij succesvolle en innovatieve oplossingen voor o.a. woningbouw, utiliteitsbouw en duurzame energie.

Het aanbod van de Flamco Groep bestaat uit:

- Expansievaten, expansieautomaten en navulautomaten voor verwarmings- en koelinstallaties.
- Veiligheidsventielen, manometers, aansluitgroepen en andere appendages.
- Buffervaten, boilers en expansievaten voor warmwatersystemen.
- Apparatuur voor ontluchting en vuilafscheiding.
- T-plus koppelingen voor snelle uitbreiding van bestaande systemen.
- Appendages en montagemateriaal voor zonne-energie systemen.
- Rail, beugels, consoles en ander montagemateriaal voor het bevestigen en ophangen van buizen.

Naast het hoofdkantoor in Nederland heeft Flamco wereldwijd nog twaalf verkoopkantoren. De productie vindt plaats in Europa en China.



Innoveren met het oog op duurzaamheid. Flamco denkt al meer dan vijftig jaar continu na over mogelijkheden om producten efficiënter, gebruiksvriendelijker, energiezuiniger en duurzamer te maken. De compacte warmtebatterij is een logische aanvulling en doorontwikkeling van het bestaande productportfolio. Dit geldt met name voor de buffervaten en boilers voor warmwater systemen.

Ontwikkeling van nieuwe kennis en inzichten met betrekking tot warmte opslagsystemen staan voor Flamco voorop en daarom wordt deelgenomen aan dit project. Flamco zal product engineers en productie engineers inzetten om tot goede werkzame en toepasbare producten te komen die op kosten effectieve wijze zijn te produceren. Daarnaast zal Flamco de wensen en eisen van hun klanten en de markt inbrengen



Liander (geen projectpartner, maar nauw betrokken als eindgebruiker)

Voor de toekomstige energievoorziening is flexibiliteit noodzakelijk, terwijl dat bij aanleg van onze netten geen ontwerpvereiste was. Daarom investeert Liander veel in onderzoek naar en experimenten met smartgrids en energie-opslag, waaronder thermische energie-opslag. Verschillende schaalniveaus worden hierin meegenomen, van home Energy- tot regionale gebieden. Uitgangspunt hierbij is het eindverbruik van zakelijke en particuliere gebruikers: warmte, koeling, verlichting, etc.

Liander heeft aangegeven compacte en betaalbare warmtopslag systemen te zien als een belangrijke schakel om een betrouwbare energievoorziening te kunnen blijven garanderen, bij een verdere toename van duurzame energie in de energiemix.

Om te borgen dat de wensen van eindgebruikers zoals Liander continue worden meegenomen in de productontwikkeling, zal Liander participeren in werkoverleggen en klankbordgroep bijeenkomsten (zie ook bijgevoegde LOI, bijlage 3).



Eneco (geen projectpartner, maar nauw betrokken als eindgebruiker)

Mensen en bedrijven bepalen zelf hoe ze schone energie opwekken, gebruiken, opslaan en delen. Wij helpen ze daarbij met innovaties die slim wonen en werken mogelijk maken. We denken buiten de kaders, ontdekken nieuwe mogelijkheden en zoeken de verbinding met klanten en partners om innovatieve producten en diensten relevant te maken. Eneco Smart Energy is het onderdeel binnen Eneco Groep dat innovaties ontwikkelt en schaalbaar maakt. Eneco zal deelnemen aan de klankbordgroep bijeenkomsten om de wensen van Eneco en hun klanten en eindgebruikers in te brengen (Mondelinge toezegging dd 12-9-2017)



KLEIN POELHUIS
installatietechniek

Klein Poelhuis (geen projectpartner, maar nauw betrokken als eindgebruiker)

Klein Poelhuis (www.kleinpoelhuis.nl) is een onderdeel van de VADO beheer

Klein Poelhuis Installatietechniek is een moderne aanbieder van totaaloplossingen in de installatietechniek. En beschikt over vijf gespecialiseerde werkmaatschappijen waaronder de woningbouw als de utiliteitsbouw. De kennis in het creëren en realiseren van innovatieve, energiebewuste concepten met optimaal comfort. Wij beperken ons niet tot het leveren van vakwerk en betrouwbare 24 uursservice. Over de volle breedte van het traject dragen we vanuit onze expertise bij aan het uiteindelijke resultaat.

Dat moet ook, want de techniek in de bouw wordt steeds geavanceerder. Alleen daarom al denken wij het liefst vanaf de schetsfase mee over de toepassing ervan. Daarbij zoeken we waar mogelijk de samenwerking met professionele partners die het eindproduct naar een nog hoger plan kunnen tillen; keten denken is ons op het lijf geschreven. (Zie ook bijgevoegde LOI, bijlage 4)



2. Achtergrond met doelstelling en resultaat

2.1 Aanleiding

In de warmtevisie (2020) van het kabinet wordt aangegeven dat de beschikbare duurzame bronnen beter benut moeten worden. Voor de realisatie van energie-neutrale gebouwen is de inzet van duurzame energiebronnen in combinatie met energie-opslag noodzakelijk. Energie-opslag maakt het mogelijk om met een grillig duurzaam energie aanbod de variabele energievraag te kunnen voldoen. Om energie neutraal te kunnen bouwen en renoveren, is het noodzakelijk om compact, verliesvrij en veilig warmte en koude te kunnen opslaan. Een compact warmte/koude opslagsysteem dat een goede prestaties in de vorm van opslagcapaciteit, vermogen en efficiency koppelt aan kosten effectiviteit en schaalbaarheid. Een oplossingsrichting waaraan door veel partijen wordt gewerkt is het inzetten van thermochemische opslag materialen. Een thermische energie-opslagsysteem wordt dan veel compacter dan opslag in de bodem of in een boiler en warmte kan gedurende langere tijd vrijwel verliesvrij opgeslagen worden. Binnen Europa is Nederland een van de forerunners op dit gebied. De consortiumpartners zijn bij de een groot deel van de lopende onderzoeksprojecten op dit gebied aangesloten. In de roadmap van Compacte Conversie en Opslag van de TKI wordt deze ontwikkelingsrichting aangegeven en aan gewerkt. (www.projectcco.org.2016). Zoals beschreven in deze roadmap is het noodzakelijk om tot een warmtebatterij te komen. Nieuwe inzichten leiden ertoe dat de thermochemische opslag uitgebreid moet worden met de optie koelen en dat de optie seizoensopslag wordt vervangen door een opslag periode van enkele dagen tot weken.

2.2 probleemstelling

Voor het realiseren van een compacte warmte en koude opslag systeem zijn er momenteel een aantal thermochemische materialen (TCM) bekend en in ontwikkeling. Daarnaast moet ook echter de technologie, maakbaarheid en industriële productie van een compleet opslagsysteem verder ontwikkeld worden. Aspecten zoals een effectieve absorber en condensor, warmtewisselaar, regeling, kleppen in vacuüm, afmetingen en produceerbaarheid zijn van groot belang voor de technologie van het systeem.

In dit voorstel worden twee essentiële technische hoofdvragen geadresseerd en opgelost:

- Op welke wijze kan een sorptie warmte- en koude-opslagsysteem kosteneffectief geproduceerd worden?
- Welk thermochemisch materiaal kan worden geproduceerd om in een marktconform systeem te kunnen worden toegepast?

Beiden ontwikkelingen zijn nodig om tot een kosten effectief compact, verliesvrij warmte- en koude-opslagsysteem te komen.

2.3 Doelstelling

Doelstelling van SWeKOS project is:

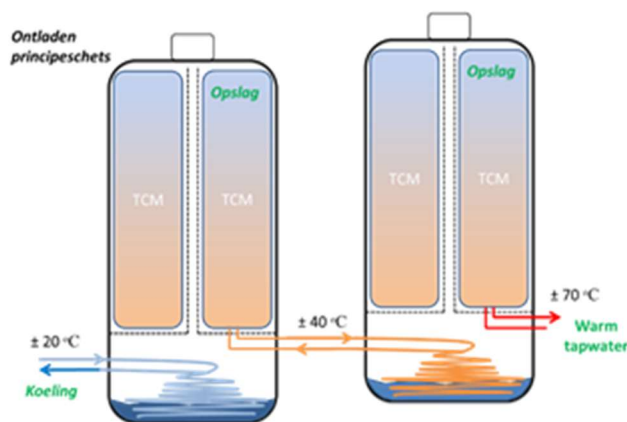
- *Een volwaardig sorptie warmte en koude en opslagsysteem met silicagel als werkzame stof als volwaardig product te maken en te testen. Volwaardig is hier gedefinieerd als kosteneffectief, flexibel inzetbaar, industrieel te produceren, met een hoge betrouwbaarheid en een lange levensduur*
- *De onderliggende doelstelling is om zicht te krijgen op een geschikt thermochemische materiaal, beproefd in een test reactor module.*

Het uiteindelijke doel is concreet uitzicht te hebben op de realisatie van een markt conform en industrieel te produceren compact warmte- en koude-opslagsysteem

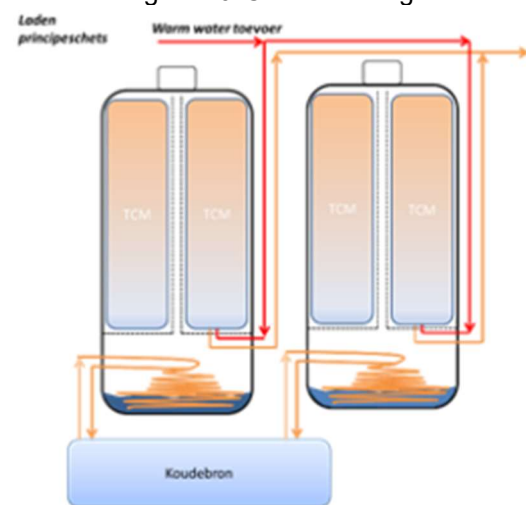


2.4 Aanpak

Om aan de doelstelling van het project te voldoen wordt op commerciële grootte een compleet sorptie gebaseerd warmte- en koude-opslagsysteem gerealiseerd. Het complete sorptie systeem bestaat uit een aantal reactor modules met regeling, kleppen, sturing, elektronica en installatietechnische aansluitingen. Het werkzame sorptie materiaal is hierbij silicagel. Silicagel heeft vergelijkbare werking als thermochemische materialen. De eigenschappen zijn goed bekend en met silicagel valt goed en veilig te werken. Maar, Silicagel heeft energie opslag capaciteit die een factor 3-5 lager is dan een TCM. Belangrijke randvoorwaarden zijn de afmetingen van het concrete systeem. Dit moet plaatsbaar zijn in of bij een woning of gebouw. Daarom moeten de afmetingen globaal 1 m hoog, 1,2m. * 1m., met een volume van circa 1m³. De energie technische eisen die binnen deze afmetingen voldaan moeten betreft het volgende: een energie inhoud van 60 kWh voldoende om een periode van een aantal dagen tot weken energie te leveren en een vermogen van ongeveer 5kW. Het temperatuur niveau waarop de energie vrijgegeven wordt is 45°C voor LT verwarming en 10°C voor koeling.



Figuur 1. Principe van ontladen van het systeem. De drie levering van warmte/koude zijn hier gegeven. Koeling, lage temperatuur verwarming of in cascade schakeling warm tapwater



Figuur 2. Principe van laden van de modules. De koudebron is hier koeling met buitenlucht.

De warmte nodig voor warmtapwater kan geleverd worden door modules in cascade te schakelen zodat een tapwater temperatuur hoger dan 60°C kan worden geleverd (legionella preventie). De aanvoertemperatuur voor het opladen ligt tussen de 60°C en 90°C. In onderstaande figuren 1 en 2 is het laden en ontladen van het systeem weergegeven.

Het realiseren van een werkend systeem op ware grootte is dan ook bedoeld om aan te tonen dat dit technologische en productietechnisch haalbaar is, een opmaat naar een systeem gebaseerd op TCM.

Het ideale thermochemische materiaal is nog niet voorhanden. Er wordt aan de ontwikkeling van TCM in diverse projecten gewerkt (MJP CCO, EU Create project, NWO MAT4HEAT). In dit project wordt door de Radboud universiteit met fundamentele kennis van de processen die plaats vinden tijdens de nucleatie en groei van kristallen onderzoek en ontwikkeling uitgevoerd naar een geschikt materiaal op basis van het geformuleerde programma van eisen. Met name is de opbouw van de werkzame stof op microniveau hier van belang. Stabiele kristallen waarbij absorptie en desorptie van een werkzame stof (in eerste instantie water, maar er wordt ook aan methanol en ammoniak gedacht) moet plaats vinden en waarbij de kristal eigenschappen ook op lange termijn bij veelvuldig laden en ontladen stabiel blijven. Verwacht wordt dat dit tot werkzame stoffen leidt die in kleine hoeveelheden kunnen worden gemaakt. Vervolgens wordt dan een kleine reactor (bijvoorbeeld schaal 1 op 4) ontworpen, gebouwd en getest om de eigenschappen en de werking te kunnen vaststellen.

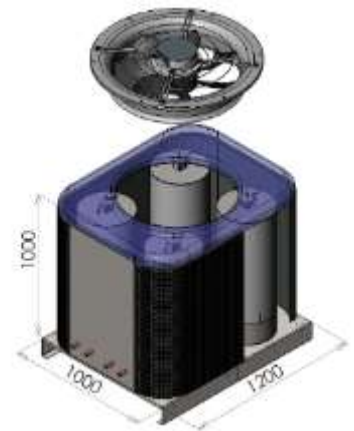


Na afloop van dit project kan de volgende stap gezet worden namelijk de ontwikkeling van een sorptie warmte- en koude-opslagsysteem op ware grootte met een geschikte TCM als werkstof

2.5 Resultaat

In het gedetailleerde projectplan staan per werk pakket de project resultaten vermeld. De belangrijkste resultaten worden hier vermeld.

- Reactor module met silicagel als werkzame stof getest.
- Gedetailleerd en geverifieerd computermodel voor reactor module.
- Ontwikkeling deelcomponenten voor het systeem: absorber/condensor, warmtewisselaar, regeling sturing en elektronica.
- Emulator testen van SWeKOS, met de gemeten prestatie van het systeem onder verschillende test condities
- Vereenvoudigd ontwerptool complete systeem
- Design van een thermochemische materiaal
- Test TCM op schaal in een test reactor module
- Businessplan met onderbouwing kostprijs, eindgebruikers wensen, markt, investering en productie



Figuur 3. Impressie van het mogelijke eindproduct als buitenopstelling. Vier reactor modules in een systeem opzet inclusie koeler.

2.6 Vervolgproject

In een mogelijk vervolgproject kan een warmte- en koude-opslagsysteem gebaseerd op een TCM op ware markt grootte met een toegesneden TCM ontworpen worden, gebouwd en getest.

Als het project succesvol verloopt zijn de basis ingrediënten hiervoor aanwezig. De resultaten uit dit project vereffenen de weg hiertoe door instrumenten aan te leveren (rekenmodellen), componenten uit te ontwikkelen, inzicht in productie te verschaffen, de mogelijkheden van industrialisatie en opschaling te bieden. Natuurlijk worden aspecten als kwaliteit, duurzaamheid, veiligheid, betrouwbaarheid en kosten hierbij meegenomen.

Op deze wijze kan een compacte, verliesvrije warmte batterij naar de markt gebracht worden.