



OPENBARE RAPPORTAGE

IEBB- INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

Eindrapport deelproject 9.3

Betaalbare 1^e generatie Warmteopslag

Referentie: TEUE919003

Subsidieregeling: Meerjarig Missiegedreven Innovatie Programma

Datum: December 2021

Aantal pagina's: 12

Auteurs: L.D. van Vliet (TNO)
A.B. Sinnema (De Beijer RTB)



Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van het consortium Integrale Energietransitie Bestaande Bouw.

Samenvatting

Introductie

Een van de Nederlandse doelen voor de energie transitie is het aardgas vrij maken van de gebouwde omgeving. Om dit te kunnen realiseren moet elke energiebron, gebaseerd op aardgas, vervangen worden. In principe zijn er maar enkele alternatieve energiebronnen, die de transitie op de relevante schaal mogelijk maken. Een aantal voorbeelden deze bronnen zijn: wind, zon-PV en zon-thermische. Veel van deze energiebronnen resulteren in een variabele toevoer van energie. Bijkomend is dat veel van deze bronnen gedecentraliseerd zullen zijn. De warmtevraag daarentegen is maximaal in de winter. Daarom is er behoefte aan compacte en verliesvrije opslagtechnieken om verschuiving in de tijd (weken tot maanden) mogelijk te maken, zodat vraag en aanbod op elkaar afgestemd kunnen blijven worden.

In project 9.3 is ontwikkeld aan een betaalbare eerste generatie compacte en verliesvrije warmteopslag. Deze compacte warmteopslag is een vacuüm gebaseerde zo genoemde Thermo-Chemische opslag, gebaseerd op het hygroscopische Natrium Sulfide (Na_2S) zout. Natrium Sulfide is geprefereerd vanwege zijn hoge opslagdichtheid, gunstig temperatuurbereik en lage kosten.

Doelstelling

Het doel van deze ontwikkeling is om o.a. een haalbare opslagdichtheid van 0.75 GJ/m^3 aan te tonen en om in een volgende fase in een warmtebatterij te demonstreren, die over een aantal jaar op de markt geïntroduceerd kan worden. Aanvullende doelstellingen zijn om tot een verbeterde prestatie te komen van de verdamper/condensor en om goedkopere constructiematerialen te kunnen gaan toepassen met voldoende levensduur.

Resultaten

Op basis van bestaande materiaalcomposities zijn granules met een extreem hoge pakkingssdichtheid ontworpen. Deze nieuwe granules zijn geproduceerd in een groot aantal batches om tot ruim 1 kg aan materiaal te hebben voor de 1-kg reactor. Uiteindelijk zijn de prestaties van het nieuwe materiaal gekarakteriseerd in de 1-kg opstelling.

Coating experimenten zijn uitgevoerd op diverse bestaande of toekomstige constructiematerialen voor in een Thermo-chemische reactor.

De theoretisch haalbare energiedichtheid van een Na_2S systeem is onderzocht m.b.v. van een Excel rekentool. Verder is een efficiënte buis/vin condensor verdamper is ontworpen en getest.

Er is een nieuw ontwerp gemaakt voor een Na_2S sorptie systeem met een energiedichtheid van $0,63 \text{ GJ/m}^3$.

Bijdrage MMIP doelstellingen

MMIP4 heeft als doel om een competitief en aantrekkelijk aardgasvrij aanbod op te schalen voor eindgebruikers in de woningbouw, utiliteitsbouw en glastuinbouw te ontwikkelen. Een van de 7 deelprogramma's is kleinschalige warmteopslagsystemen. Daarom sluit deze ontwikkeling naadloos aan aan de MMIP doelstellingen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Programma IEBB	4
1.1 Inbedding in programma IEBB	4
1.2 Belang deelproject	4
1.2.1 Bijdrage aan de MMIP 3 en MMIP 4 doelen	4
1.2.2 Opbrengsten deelproject	5
1.3 Leeswijzer	5
2 Project gegevens	6
3 Inhoudelijk eindrapport	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Doelstelling	7
3.3 Werkwijze	7
3.4 Resultaten	8
3.4.1 Resultaat 1: Na ₂ S materiaalonderzoek	8
3.4.2 Resultaat 2: Opslagmodule componenten	10
3.4.3 Resultaat 3: Ruw ontwerp van een Na ₂ S sorptie systeem	10
4 Conclusies leerpunten en aanbevelingen	11
4.1 Conclusies	11
4.2 Leerpunten	11
4.3 Aanbevelingen	11
5 Literatuur	12

1 Programma IEBB

1.1 Inbedding in programma IEBB

Het consortium Integrale Energietransitie Bestaande Bouw heeft als ambitie het haalbaar, betaalbaar en opschaalbaar maken van de energietransitie in de bestaande (woning)bouw. Hierbij richten we ons specifiek op de opschaling naar 200.000 renovaties per jaar vóór het jaar 2030. Om dit te bereiken werken we verdeeld over 9 thema's, aan innovaties op het gebied van industrialisatie van renovatieconcepten (thema 1-4; MMIP 3.1 en 3.2), het transitieproces (thema 5-7; MMIP 3.3) en warmtetechnologie (thema 8 en 9; MMIP 4.1 en 4.3).

Dit deelproject maakt onderdeel uit van thema 9 "Warmteopslag". Eén van de Nederlandse doelen voor de energietransitie is het aardgas-vrij maken van de gebouwde omgeving. Om dit te kunnen realiseren moet elke energiebron, gebaseerd op aardgas, vervangen worden door duurzame, veelal decentrale alternatieven. In thema 9, "warmteopslag", wordt het verliesvrij verschuiven van hernieuwbare energie over langere periodes onderzocht om uiteindelijk een volledig duurzame energievoorziening mogelijk te kunnen maken in de gebouwde omgeving.

In deelproject 9.3 wordt een betaalbare eerste generatie compacte en verliesvrije warmteopslag ontwikkeld. Deze compacte warmteopslag is een vacuüm gebaseerde zo genoemde Thermo-Chemische opslag, gebaseerd op het hygroscopische Natrium Sulfide (Na_2S) zout. Natrium Sulfide is geprefereerd vanwege zijn hoge opslagdichtheid, gunstig temperatuurbereik en lage kosten. Deze compacte Thermo-Chemische opslag heeft de mogelijkheid om opslag gedurende enkele weken tot enkele maanden mogelijk te maken zonder opslagverliezen.

Dit deelproject van innovatieplan Integrale Energietransitie Bestaande Bouw is uitgevoerd met subsidies van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties en het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

1.2 Belang deelproject

1.2.1 Bijdrage aan de MMIP 3 en MMIP 4 doelen

De resultaten van deze technologieontwikkeling sluiten één op één aan bij de doelstellingen van het MMIP4 voor de middellange termijn. Thermo-chemische warmteopslag (TCS) is een technologie die een compacte, verliesvrije warmteopslag mogelijk maakt, waarbij compactheid een Key Performance Indicator (KPI) is vanwege het feit dat het goedkoper is, en minder ruimte in beslag neemt in een woning. Het systeem, gebaseerd op Na_2S , zet met de huidige resultaten een stap om het doel, een opslagdichtheid van 0.75 GJ/m³ te behalen.

Door nader onderzoek naar meer effectieve warmteopslagstechnologie wordt de transitie naar een duurzame gebouwde omgeving versneld. Lange-termijn warmteopslag, voor peak-shaving en betere aansluiting van vraag en aanbod wordt daarmee mogelijk gemaakt. Toepassing van de hier ontwikkelde centrale of decentrale warmtebatterij zal het mogelijk maken dat meer hernieuwbare energie wordt gebruikt in de gebouwde omgeving. Denk daarbij in termen als kantoren, woningen gestapeld bouw jaren '60, Wijk met woningen jaren 80 met een hoge woningdichtheid, woningen in het VVE-segment, woningen in bezit van corporaties, enz.

1.2.2 Opbrengsten deelproject

Een significant hogere pakdichtheid van het thermochemische materiaal in de warmtewisselaar is aangetoond. Dit heeft als opbrengst voor het deelproject dat de opslag ongeveer 30% compacter kan worden en dat daarnaast ook de kosten voor de opslag met zo'n 30% gereduceerd zijn. Verder is een testmethode ontwikkeld om coatings in combinatie met de constructiematerialen in de opslagmodules versneld te testen op geschiktheid. Ook is er een verbeterde Condensor/Evaporator ontwikkeld. Een uiteindelijk volledig operationele Na₂S sorptie opslag kan een 6x zo hoge energiedichtheid behalen als een waterbuffer, waarbij er tijdens de opslag geen warmteverliezen zijn.

1.3 Leeswijzer

In dit deelproject zijn de volgende activiteiten uitgevoerd door de volgende partners:

Onderzoek	Partner	Resultaat	Beschrijving in dit rapport
Verbeteringen aan het opslagmateriaal	TNO	Hogere opslagdichtheid	Par. 3.4.1
Ontwerpen, bouwen en testen van condensor/verdamer en van een reactor gevuld met Na ₂ S	De Beijer RTB & TNO	Meetresultaten	Par. 3.4.2.
Ruw ontwerp Na ₂ S sorptie systeem	De Beijer RTB	Ontwerp	Par. 3.4.3.

2 Project gegevens

- Projectnummer: TEUE919003
- Titel deelproject: Betaalbare 1e generatie Warmteopslag
- Penvoerder en medeaanvragers: TNO, RTB de Beijer, Carya, Spie
- Uitvoeringsperiode: 1 januari 2020 – 31 december 2021

3 Inhoudelijk eindrapport

3.1 Inleiding

Thermo-chemische warmteopslag (TCS) is een technologie die een compacte, verliesvrije warmteopslag mogelijk maakt. Compactheid is een cruciale Key Performance Indicator (KPI) om 2 redenen:

1. Compacte opslag neemt minder ruimte in beslag (op huis- of wijkniveau).
2. Compacte opslag is goedkoper.

In deelproject 9.3 wordt een betaalbare eerste generatie compacte en verliesvrije warmteopslag ontwikkeld. Deze compacte warmteopslag is een vacuüm gebaseerde zo genoemde Thermo-Chemische opslag, gebaseerd op het hygroscopische Natrium Sulfide (Na_2S) zout. Natrium Sulfide is geprefereerd vanwege zijn hoge opslagdichtheid, gunstig temperatuurbereik en lage kosten. Deze compacte Thermo-Chemische opslag heeft de mogelijkheid om opslag gedurende enkele weken tot enkele maanden mogelijk te maken zonder opslagverliezen.

3.2 Doelstelling

Het doel van deze ontwikkeling is om o.a. een haalbare opslagdichtheid van 0.75 GJ/m³ aan te tonen en om in een volgende fase in een warmtebatterij te demonstreren, die over een aantal jaar op de markt geïntroduceerd kan worden. Aanvullende doelstellingen zijn om tot een verbeterde prestatie te komen van de verdamper/condensor en om goedkopere constructiematerialen te kunnen gaan toepassen met voldoende levensduur.

3.3 Werkwijze

Het onderzoek naar de eerste generatie compacte warmteopslag is uitgevoerd volgens onderstaande tabel.

Onderzoek	Trekker	Werkwijze
Na_2S materiaalonderzoek	TNO	<p>Resultaat 1: Onderzoek op materiaalniveau - optimale samenstelling, structuur en productiemethode (juiste beladingsdichtheid) van Na_2S om de energiedichtheid op systeemniveau te maximaliseren en zo tot een compact opslagsysteem te komen. Activiteiten:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Productie van de optimale vorm van het opslagmateriaal in de juiste materiaal compositie en dichtheid 2) Testen in de 1 kg testopstelling om de theoretische opslagdichtheid te bepalen
Opslagmodule componenten	De Beijer RTB	<p>Resultaat 2: Ontwerp van de opslagmodule - het bereiken van een optimaal ontwerp van het batterijvat en zijn</p>

INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

		<p>componenten, zoals warmtewisselaars, om een betaalbaar opslagsysteem te bereiken met betrekking tot CAPEX en een verbeterde levensduur en prestaties.</p> <p>De respectievelijke activiteiten omvatten:</p> <p>1) Onderzoeken, testen en maken van materiaalkeuzes die toe te passen zijn met Natrium Sulfide als thermochemisch materiaal. Hierbij wordt er rekening gehouden met stabiliteit & produceerbaarheid</p> <p>2) Ontwerpen & testen van een corrosiebestendige verdamper & condensor welke geoptimaliseerd is voor hoge verdamping en condensatie onder vacuüm condities</p>
Ruw ontwerp Na ₂ S sorptie systeem	De Beijer RTB	Resultaat 3: Ruw ontwerp van een efficiënte TCM reactor voor demonstratie in een volgende fase

3.4 Resultaten

De in dit project behaalde resultaten zijn beschreven in onderstaande paragrafen.

3.4.1 Resultaat 1: Na₂S materiaalonderzoek

Gebaseerd op literatuuronderzoek zijn er een aantal speciale vormen voor het granulaat geselecteerd om een hogere pakingsdichtheid van het hygroscopische zout te verkrijgen. Dit hygroscopische zout is de basis voor de Thermochemische warmteopslag. Hoe hoger de pakingsdichtheid hoe hoger de opslagdichtheid kan zijn van een warmteopslagmodule. Uit een aantal initiële experimenten is vervolgens bepaald met welke vorm de opschaling naar een hoeveelheid van ongeveer 1 kg zouden gaan doen om de prestaties van het nieuwe materiaal in de 1-kg opstelling te kunnen testen. Een aantal productiemallen zijn geproduceerd via een 3D-printing technologie. Met die set mallen kan per batch ongeveer 50 gram granulaat gemaakt worden. Uiteindelijk is met deze mallen, na een aantal optimalisatieslagen in de productie, een hoeveelheid van ruim 1-kg geproduceerd.

Met het maken van de deeltjes is een dichtheidsverhoging van ruim boven de 50% gehaald ten opzichte van de dichtheid van standaard granulaat, welke commercieel te verkrijgen is. Helaas gaat bij het vullen van een daadwerkelijke warmtewisselaar met dit materiaal een deel van die dichtheidsverhoging teniet, mede omdat een warmtewisselaar minder goed te schudden en te tappen is als een meetcilinder. Voor een daadwerkelijke warmtewisselaar is voor de huidige experimenten toch een dichtheidsverhoging van bijna 40% gehaald.

Dat we een warmtewisselaar goed hebben kunnen vullen met materiaal zegt nog niet dat de prestatie die we voorzien hebben ook goed is. Om dit aan te kunnen tonen is de gevulde warmtewisselaar getest in de 1-kg test setup at TNO. De 1-kg test setup is in kleine complete warmteopslagmodule. De opstelling heeft in verhouding een te grote verdamper/condenser, zodat

we er zeker van zijn dat we de beperkingen prestaties van het materiaal. Met de 1-kg testen of eigenlijk is het een 1 liter warmtewisselaar waar afhankelijk van de dichtheid van het granulaat normaalgesproken ongeveer 1 kg granulaat in past. De specifieke prestaties die met de 1-kg opstelling onder andere bepaald worden zijn:

- De totale energie die opgeslagen is in het materiaal en hoeveel er daarna weer uit komt
- De vermogensdichtheid, dus hoe snel is het materiaal te laden en te ontladen
- De cycleerbaarheid.

In een eerste meting in de 1-kg opstelling konden we niet begrijpen waarom het materiaal zo anders reageerde dan we hadden verwacht na enige tijd kwamen we erachter dat er helaas iets mis is gegaan met de opstelling. De warmtewisselaar is gaan lekken en hierdoor is er siliconeolie in het granulaat terecht gekomen en heeft de hele batch materiaal onbruikbaar gemaakt. Dit betekende dat we opnieuw materiaal moesten gaan maken en ook dat de hele opstelling compleet schoon gemaakt moest worden van de siliconeolie. Een heel kleine aanwezigheid van de olie zal namelijk de prestaties van de verdamper/condenser sterk kunnen beïnvloeden, waarmee we niet de juiste prestaties van het materiaal zouden meten. Na het schoonmaken bleek ook nog dat de olie ook een aantal verbindingen van de opstelling had aangetast en dat er nieuwe onderdelen gemaakt moesten worden.

Uiteindelijk zijn er met de nieuwe batch granulaat toch nog 2 complete cycles met het nieuwe materiaal uitgevoerd en hebben we een deel van de prestaties van het materiaal goed in kaart kunnen brengen.

Qua opslagdichtheid in de HX hebben we 1.13 MJ/L of wel 1.13 GJ/m³ (= 314 kWh/m³) aangetoond. Dit is niet zo hoog als gehoopt en een deel daarvan is te verklaren dat de maten van het granulaat mogelijk qua afmetingen niet optimaal is in verhouding met de vlnafstand van de warmtewisselaar. Verder blijkt uit een aanpalend project dat het uitgangsmateriaal mogelijk voor een deel is omgezet naar een ander zout, door vervuiling.

Het specifieke oplaadvermogen is 16 W/L en het specifieke ontladvermogen 6W/L. Dit is ruim voldoende voor grote module. Onze doelstelling was 5W/L voor zowel het laden als het ontladen. We hebben het ontladen gedaan bij een temperatuur tussen 55 en 57°C, wat aan de hoge kant is. Als we zouden ontladen bij 50 of 45°C, dan zou het specifiek vermogen een stuk hoger zijn. We kunnen hieruit concluderen dat de vorm en afmetingen van het granulaat niet beperkend zijn voor het specifieke vermogen van het systeem en hebben hiermee een significante stap voorwaarts gemaakt in de haalbare opslagdichtheid van de thermochemische warmteopslag.

Voor een module-ontwerp die theoretisch 0.5 GJ/m³ aan opslagdichtheid heeft geven de verbeteringen vanuit dit deel van het project een verbetering van bijna 40% en zou dit een opslagdichtheid van bijna 0.7 GJ/m³ betekenen. Dit is helaas net niet de beoogde 0.75 GJ/m³, echter wel aan factor 8 hoger dan wateropslag, waarbij de thermochemische warmte-opslag geen verliezen heeft gedurende de opslagperiode en voelbare opslag met water wel.

3.4.2 Resultaat 2: Opslagmodule componenten

Een Excel tool is ontwikkeld door De Beijer RTB voor het afschatten van de maximaal haalbare energie-opslagdichtheid. De resultaten van deze tool geven een bovengrens aan van de maximale haalbare energiedichtheid. De energiedichtheid van een werkelijke Na₂S sorptie systeem kan hiermee vergeleken worden.

Een condensor/verdamper is ontworpen, gebouwd en getest [1]. Een efficiënte en compacte condensor/verdamper is een essentieel onderdeel van een Na₂S sorptie systeem en is belangrijk voor het behalen van een zo hoog mogelijke energiedichtheid. De condensor/verdamper zal verder worden doorontwikkeld binnen De Beijer RTB zodat deze een nog groter vermogen per volume kan leveren.

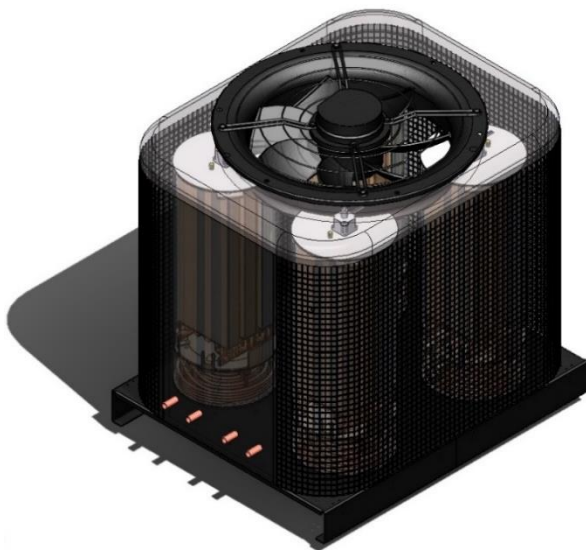
Een reactor gevuld met Na₂S korrels is ontwerpen, gebouwd en getest. De resultaten zullen worden gebruikt voor een verdere optimalisatie van de met Na₂S reactor.

Een studie is gedaan naar de mogelijkheden van coaten van mogelijke goedkopere constructiematerialen die gebruikt worden in een Thermo-chemische warmteopslagmodule [2]. Een versnelde verouderingstestmethode is ontwikkeld om op kortere termijn iets te kunnen zeggen over de geschiktheid van een materiaal in combinatie met zijn coating voor toepassing in een TCS-module.

3.4.3 Resultaat 3: Ruw ontwerp van een Na₂S sorptie systeem

Een ruw ontwerp van een Na₂S sorptie systeem is gemaakt. Door toepassing van reactoren met verschillende breedtes wordt een hogere energiedichtheid behaald.

Een afbeelding van dit ontwerp is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Ruw ontwerp van een Na₂S sorptie systeem

4 Conclusies leerpunten en aanbevelingen

4.1 Conclusies

- Het is mogelijk gebleken om met specifieke vormgeving van het granulaat de opslagdichtheid van een thermochemisch warmteopslagmodule significant te verhogen. Experimenten hebben aangetoond dat met behoud van specifieke vermogensprestaties de energiedichtheid met bijna 40% verhoogd kan worden ten opzichte van standaard verkrijgbaar granulaat.
- Met behulp van een Excel tool worden de volgende maximaal haalbare energiedichtheden uitgerekend. Hieruit bleek dat de maximaal haalbare energiedichtheid uitkomen op de volgende waarden:
 - $0,65\text{GJ}/\text{m}^3$ dit is de systeem energiecapaciteit gedeeld door interne volume vacuümbehuizing plus volume ingenomen door isolatie.
 - $0,78\text{GJ}/\text{m}^3$ dit is de systeem energiecapaciteit gedeeld door interne volume vacuümbehuizing.
 - $1,16\text{GJ}/\text{m}^3$, dit is de systeem energiecapaciteit gedeeld door interne volume reactor vacuümbehuizing.
- Een buis/vin condensor/verdamer is ontworpen, gebouwd en getest. De resultaten zijn veelbelovend en zal als basis dienen voor volgende generaties.
- Een reactor gevuld met standaard Na_2S korrels is ontworpen, gebouwd en getest. Een vuldichtheid van $750\text{kg}/\text{m}^3$ is gehaald.
- Een ruw ontwerp van een Na_2S sorptie systeem is gemaakt. Het behalen van een energiedichtheid van $0,75\text{GJ}/\text{m}^3$ op module niveau is lastig te realiseren. Een systeem met een energiedichtheid van $0,63\text{GJ}/\text{m}^3$ kan worden gerealiseerd met reactorelementen met afwijkende breedtes.

4.2 Leerpunten

Het behalen van een energiedichtheid van $0,75\text{GJ}/\text{m}^3$ met een Na_2S sorptiemachine waarbij de energieopslag wordt gedeeld door interne volume van de vacuüm behuizing is theoretisch mogelijk. Wanneer het volume binnen de buiten behuizing van de sorptie machine wordt genomen zal deze energiedichtheid niet kunnen worden gehaald. Toch zal de energieopslagdichtheid ruim boven de energieopslagdichtheid factoren boven die van water liggen, waarbij er geen warmteverliezen zijn in de periode van opslag.

4.3 Aanbevelingen

We hebben een mooie stap mogen maken in de technologieontwikkeling. Echter voor de Thermochemisch warmteopslag is er zeker nog technologieontwikkeling nodig en is er vooralsnog geen aansluiting in bijvoorbeeld de MOOI calls. Voor die calls moet de TRL heel hoog zijn. De aanbeveling naar het RVO is om rekening te houden met die continuïteit, ook voor technologieën waarvan het gebruik nog wat verder in de toekomst ligt.

5 Literatuur

- [1] 2022-01-14 MMIP vertrouwelijk gedetailleerde eindrapport final from RTB
- [2] BTIC9.3-TNO-RP-2021 Heat Exchanger, Casing Construction Materials & Coating for TCS Module