

# OPENBARE RAPPORTAGE

IEBB- INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

## Eindrapport deelproject 9.5

# Redox warmteopslag

Referentie: TEUE919003  
Subsidieregeling: Meerjarig Missiegedreven Innovatie Programma

Datum: December 2021  
Aantal pagina's: 14 (inclusief bijlagen)

Auteurs: Laurens van Vliet (TNO)  
Giulia Finotello (TUE)



## 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 9.5 is ontwikkeld aan de Redox warmteopslag-technologie. Redox warmteopslag is gebaseerd op het feit dat je metaal (deeltjes) kunt verbranden (oxidieren), waarbij een enorme hoeveelheid energie in de vorm van warmte vrijkomt, die je kunt gebruiken om huizen of utiliteitsgebouwen te verwarmen. Ook het toevoeren van deze warmte aan warmte-netten behoort tot de mogelijkheden. Na de oxidatie, moet het materiaal weer gereduceerd worden en ideaal gezien kan dat in dezelfde reactor als waarin het materiaal eerder is geoxideerd. De reductie van het materiaal gaat met behulp van waterstof, die of op momenten van lage vraag uit een netwerk gehaald kan worden of ter plaatse wordt gemaakt door een electrolyser. De voordelen van deze vorm van energieopslag zijn dat het een veilige en compacte manier van opslag is en dat er geen waterstof op grote druk hoeft te worden opgeslagen en dat de cycle-efficiëntie zeer dicht bij die van de waterstof cyclus ligt. De technologie is vrij nieuw en is nog op een laag TRL-niveau.

### Doelstelling

Het project “Redox warmteopslag” heeft tot doelstelling significante verbeteringen te behalen ten opzichte van de huidige stand van deze technologie.

Het project heeft drie ontwikkellijnen:

- 1) Fixed-bed reactorconcept, met name voor use-cases in eengezinswoningen
- 2) Fluidized-bed reactorconcept, met name voor use-cases in utiliteitsgebouwen en toepassing in warmtenetten.
- 3) Onderzoek naar alternatieve reactorconcepten

### Resultaten

Voor fixed-bed Redox warmteopslag zijn de beoogde verbeteringen helaas niet gelukt. Hierdoor blijft het een complex aan te sturen systeem, waarbij o.a. veel sensoren nodig zijn om de oxidatie en reductie goed onder controle te houden.

Voor fluidized-bed Redox warmteopslag zijn er veel belovende resultaten verkregen en het systeem lijkt goed schaalbaar voor grote vermogens. De techno-economische analyse, uitgevoerd voor fluidized-bed gebaseerde REDOX warmteopslag voor utiliteitschaal gebouwen en warmtenetten concludeert dat de Redox warmteopslagtechnologie het potentieel heeft voor betaalbare opslag en gereduceerde kosten voor verwarming specifiek ten opzichte van conventionele technologie zoals gasboilers. Warmtepomptechnologie blijft de meest efficiënte, ook in 2050, maar de kosten gerelateerd aan netcongestie, met name in koude periodes is nog niet meegenomen in de analyse.

Een aantal interessante nieuwe reactorconcepten zijn geïdentificeerd, maar de TRL van deze concepten, voor toepassing als Redox warmteopslag, is nog laag.

### **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 bij de MMIP doelstellingen.

## Inhoudsopgave

|   |    |
|---|----|
| Samenvatting .....                                  | 2  |
| Inhoudsopgave.....                                  | 4  |
| 1 Programma IEBB .....                              | 5  |
| 1.1 Inbedding in programma IEBB .....               | 5  |
| 1.2 Belang deelproject .....                        | 5  |
| 1.2.1 Bijdrage aan de MMIP 3 en MMIP 4 doelen ..... | 5  |
| 1.2.2 Opbrengsten deelproject .....                 | 6  |
| 1.3 Leeswijzer.....                                 | 6  |
| 2 Project gegevens.....                             | 7  |
| 3 Inhoudelijk eindrapport .....                     | 8  |
| 3.1 Inleiding.....                                  | 8  |
| 3.2 Doelstelling .....                              | 8  |
| 3.3 Werkwijze .....                                 | 9  |
| 3.4 Resultaten .....                                | 9  |
| 3.4.1 Resultaat 1 .....                             | 10 |
| 3.4.2 Resultaat 2 .....                             | 11 |
| 3.4.3 Resultaat 3 .....                             | 12 |
| 4 Conclusies leerpunten en aanbevelingen .....      | 13 |
| 4.1 Conclusies .....                                | 13 |
| 4.2 Leerpunten.....                                 | 13 |
| 4.3 Aanbevelingen .....                             | 13 |
| 5 Literatuur .....                                  | 14 |

# 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 project 9.5 is ontwikkeld aan de Redox warmteopslag-technologie. Redox warmteopslag is gebaseerd op het feit dat je metaal (deeltjes) kunt verbranden (oxidieren), waarbij een enorme hoeveelheid energie in de vorm van warmte vrijkomt, die je kunt gebruiken om huizen of utiliteitsgebouwen te verwarmen.

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. Redox warmteopslag is een technologie die een ultra-hoge energiedichtheid (>1GJ/m<sup>3</sup>) mogelijk maakt.

Door nader onderzoek naar meer effectieve warmteopslagtechnologie 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

In lijn 1 hebben we in een fix-bed configuratie met koper als metaal een tweetal batches van een nieuw materiaal type getest in de hoop verbeterde karakteristieken te krijgen. Helaas was de verbetering niet zo goed als gehoopt.

Voor Lijn 2 zijn het afgelopen jaar veel experimenten uitgevoerd in de fluidized-bed reactor. Er is o.a. gevarieerd met deeltjesgrootte, materiaal type, temperaturen, test tijden, stromingssnelheden. We hebben de ijzerdeeltjes zowel kunnen oxideren als reduceren in een en dezelfde reactor, wat een unicum is voor deze technologie. Hiermee is een significante stap in de TRL van deze technologie gemaakt en zijn we een stap dichterbij de toekomstige toepassing van deze technologie in de gebouwde omgeving.

## 1.3 Leeswijzer

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

| Onderzoek  | Partner | Resultaat  | Beschrijving in dit rapport |
|--|---------|--|-----------------------------|
| Experimentele en theoretische bepaling van optimale opslagmaterialen gebaseerd op koper in een fixed-bed configuratie.           | TNO     | Er zijn o.a. twee nieuwe materiaaltypen geproduceerd door Dinxperlo Wire Weaving. Helaas leverde dit niet de gehoopte structurele verbeteringen aan de opslagdichtheid en controleerbaarheid.  | Sectie 3.4.1                |
| Experimentele en theoretische bepaling van optimale opslagmaterialen gebaseerd op ijzerpoeder in een fluidized-bed configuratie. | TNO     | Er zijn veel testen gedaan met steeds verbeterde en hoopvolle resultaten. Een techno-economische analyse laat zien dat er een goed vooruitzicht is voor de economische haalbaarheid in scenario's voor 2030 en vooral richting 2050. | Sectie 3.4.2                |
| Onderzoek naar alternatieve reactorconcepten<br>(Resultaat 3)  | TUE     | Conceptstudies naar reactorontwerpen onder andere enkele zonder electrolyser.  | Sectie 3.4.3                |

## 2 Project gegevens

- Projectnummer: TEUE919003
- Titel deelproject: Redox warmteopslag
- Penvoerder en medeaanvragers: TNO, Technische universiteit Eindhoven, Wire Weaving  
Dinxperlo, Carya Automatisering
- Uitvoeringsperiode: 1 januari 2020 – 31 december 2021

## 3 Inhoudelijk eindrapport

### 3.1 Inleiding

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 9.5 is ontwikkeld aan de Redox warmteopslag-technologie. Redox warmteopslag is gebaseerd op het feit dat je metaal (deeltjes) kunt verbranden (oxideren), waarbij een enorme hoeveelheid energie in de vorm van warmte vrijkomt, die je kunt gebruiken om huizen of utiliteitsgebouwen te verwarmen. Ook het toevoeren van deze warmte aan warmte-netten behoort tot de mogelijkheden. Na de oxidatie, moet het materiaal weer gereduceerd worden en ideaal gezien kan dat in dezelfde reactor als waarin het materiaal eerder is geoxideerd. De reductie van het materiaal gaat met behulp van waterstof, die of op momenten van lage elektriciteitsvraag uit een netwerk gehaald kan worden of ter plaatse wordt gemaakt door een electrolyser. De voordelen van deze vorm van energieopslag zijn dat het een veilige en compacte manier van opslag is en dat er geen waterstof op grote druk hoeft te worden opgeslagen en dat de cycle-efficiëntie zeer dicht bij die van de waterstof cyclus ligt.

### 3.2 Doelstelling

Het project heeft tot doelstelling significante verbeteringen te behalen ten opzichte van de huidige stand van deze nieuwe technologie. Daarnaast zijn er diverse analyses gedaan om de economische haalbaarheid in kaart te brengen en te zoeken naar alternatieve reactorconcepten.



### 3.3 Werkwijze

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

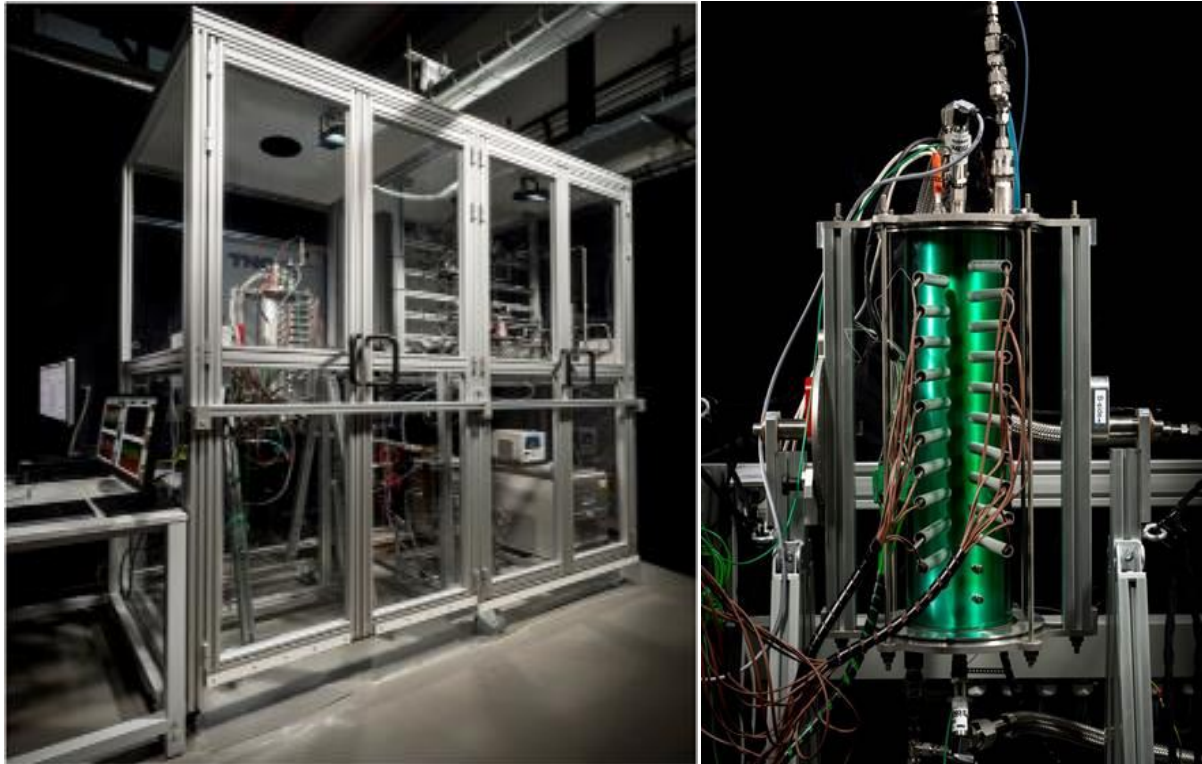
| Activiteit  | Trekker | Werkwijze   |
|---|---------|---|
| Prestatieverbetering - lijn 1<br>Fixed-bed<br>(Resultaat 1)     | TNO     | Experimentele en theoretische bepaling van optimale opslagmaterialen gebaseerd op koper in een fixed-bed configuratie. Gefocust op materiaalsamenstelling (Dinxperlo Wire Weaving) voor het verbeteren van de controleerbaarheid, opslagdichtheid, vermogensdichtheid, cycleerbaarheid en levensduur van het systeem. Ook is er gekeken of er met toevoeging van katalysatoren een verlaging van de reactietemperaturen verkregen kon worden. Deze lijn is vooral gericht op toepassing in eengezinswoningen  |
| Prestatieverbetering - lijn 2<br>Fluidized-bed<br>(Resultaat 2) | TNO     | Experimentele en theoretische bepaling van optimale opslagmaterialen gebaseerd op ijzerpoeder in een fluidized-bed configuratie. Gefocust op conversie (opslagdichtheid), cycleerbaarheid en levensduur van het systeem. Met het doel significante verbeteringen te behalen ten opzichte van de huidige stand van de technologie. Verbeteren van de testopstelling bij TNO voor optimalisatie van operationele condities. Een Techno-Economische Analyse om inzicht te krijgen in de jaarlijkse energiekosten. Deze lijn is vooral gericht op toepassing in utiliteitsgebouwen en warmtenetten. |
| Onderzoek naar alternatieve reactorconcepten<br>(Resultaat 3)   | TUE     | Conceptstudies naar reactorontwerpen onder andere enkele zonder electrolyser.   |

### 3.4 Resultaten

In dit project zijn met name in lijn 2 zeer interessante resultaten behaald. Er is een techno-economische analyse uitgevoerd voor fluidized-bed gebaseerde REDOX warmteopslag voor utiliteitschaal gebouwen en warmtenetten. Die analyse laat zien dat er een goed vooruitzicht is voor de economische haalbaarheid in scenario's voor 2030 en vooral richting 2050. In dit project zijn duidelijke stappen gemaakt op voor deze technologie met nog lage TRL.

### 3.4.1 Resultaat 1

TNO is al een aantal jaar bezig om de Redox warmteopslag te ontwikkelen. Binnen deze ontwikkeling is voorafgaande aan dit IEBB project voor fixed-bed oxidatie en reductie van koper een opstelling gebouwd om de experimenten in uit te voeren. Deze opstelling heet de Hestia opstelling en staat afgebeeld in de Figuur 1 hier beneden. De opstelling maakt het mogelijk om op een veilige en gecontroleerde manier experimenten te doen waarbij de reactor veel vrijheid heeft om de interne configuraties aan te passen.



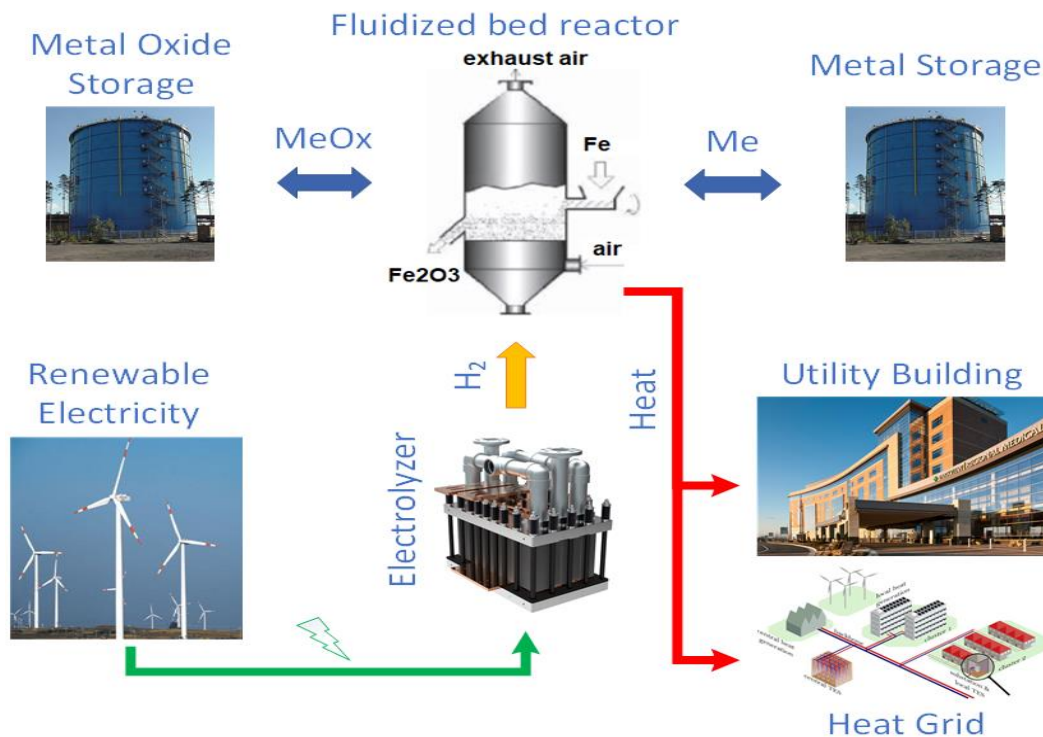
*Figuur 1: Hestia opstelling (links); Hestia reactor (rechts)*

In deze lijn hebben zijn een aantal aanvullende experimenten gedaan waarbij Dinxperlo Wire Weaving twee verschillende batches van een nieuwe materiaalcompositie en configuratie heeft aangeleverd. Het doel van de nieuwe materialen was een grotere robuustheid van het bed te creëren met daarbij ook een betere controleerbaarheid.

Bij experimenten met de eerste batch bleek de robuustheid te zijn verbeterd, maar waren de controleerbaarheid en de energieopslagdichtheid een flink stuk achteruitgegaan. Op basis van deze resultaten is toen een nieuwe batch materiaal gemaakt. Uit experimenten met deze tweede batch bleek dat de energiedichtheid en de controleerbaarheid waren verbeterd ten opzichte van de eerste batch, maar tevens bleek dat de robuustheid helaas flink achteruit is gegaan. We hebben op dit moment geen uitzicht om nog een flinke verbetering te behalen met dit type materialen. Verder zijn er een aantal verschillende katalysatoren aangebracht op het koper om te kijken of de reacties bij lagere temperatuur ook al zouden kunnen plaatsvinden. De katalysatoren zijn uitgebreid getest en gerecycled in de TG-DTA, maar het effect van de katalysatoren was te gering om daadwerkelijk in een fixed-bed configuratie tot voordelen te leiden.

## 3.4.2 Resultaat 2

In lijn 2 is gefocuseerd op de Redox warmtetechnologie voor grootschaliger toepassingen zoals utiliteitsgebouwen en warmtenetten. Voor deze toepassingen zijn grote vermogens nodig, er is uitgegaan van een benodigd vermogen van 5MW. Deze vermogens zijn niet haalbaar voor het fixed-bed principe in de configuratie die ook getest kan worden in de Hestia reactor. Daarom is besloten om voor deze toepassingen naar het fluidized-bed principe te kijken, waarbij opslag in eenvoudige tanks kan plaatsvinden en de reactor relatief klein kan blijven. Bij een fixed-bed reactor is de reactor ook tegelijk de opslag en zijn extreem grote en dure reactoren nodig. Verder is het voor een fluidized-bed reactor ook makkelijker om met ijzer te werken, welke een grotere opslagdichtheid heeft dan koper. Een schema van het concept met een fluidized-bed reactor en de opslag en de electrolyser is weergegeven in Figuur 2. Bij een fluidized-bed reactor worden de gasstroom (lucht of waterstof) door het bed met metaalpoeder geblazen, waarbij de deeltjes als het ware gaan zweven in de gasstroom en zich zo vergelijkbaar met een vloeistof gaan gedragen.



Figuur 2: Schema hoe een fluidized-bed reactor met opslag van ijzerpoeder warmte aan een utiliteitsgebouw of warmtenet geeft. De electrolyser produceert de waterstof voor de reductie op de momenten dat de stroom op het elektriciteitsnet goedkoop is.

In Lijn 2 is voor de Hestia reactor dus een interne configuratiewijziging doorgevoerd, waardoor er fluidized-bed experimenten in uitgevoerd konden worden. Voorafgaand is een uitgebreid literatuuronderzoek [2] gedaan om een reactorontwerp te kunnen maken. Er zijn in het tweede jaar van het project veel experimenten uitgevoerd in de fluidized-bed reactor. Er is o.a. gevarieerd met deeltjesgrootte, materiaal type, temperaturen, testtijden, stromingssnelheden. Carya heeft in de tussentijd een aantal verbeteringen aangebracht in het controlesysteem van de Hestia testopstelling.

Een belangrijk punt waar we met de experimenten tegenaan liepen is dat bij temperaturen van rond de 600°C sintering van het ijzer poeder optrad. Hierdoor konden we niet hoger in temperatuur, daar de sintering bij hogere temperatuur alleen maar erger werd. Door middel van bepaalde additieven hebben we het sinteren uiteindelijk kunnen uitstellen tot ruim boven de 800°C en hebben kunnen laten zien dat we nu bij temperaturen rond 800°C ongeveer 20% conversie kunnen halen. We hebben de ijzerdeeltjes zowel kunnen oxideren als reduceren in een en dezelfde reactor, wat een unicum is voor deze technologie. Het doel is om uiteindelijk 50% conversie te halen, maar dat zullen we in een volgende stap moeten aantonen.

Er is een techno-economische analyse uitgevoerd [3] voor fluidized-bed gebaseerde REDOX warmteopslag voor utiliteitschaal gebouwen en warmtenetten. Deze techno-economische analyse concludeert dat de Redox warmteopslagtechnologie het potentieel heeft voor betaalbare opslag en gereduceerde kosten voor verwarming specifiek ten opzichte van conventionele technologie zoals gasboilers. Warmtepomptechnologie blijft de meest efficiënte, ook in 2050, maar de kosten gerelateerd aan netcongestie, met name in koude periodes is nog niet meegenomen in de analyse.

De TRL van de Redox fluidized-bed technologie is nog altijd laag en er zal nog veel ontwikkeld moeten worden om er een volwaardige technologie van te maken. Zaken die verder onderzocht moeten worden zijn onder andere: verhogen van de conversie, verbeteren cycleerbaarheid, nog beter voorkomen van sintering en slijtage, opschaling naar een grotere reactor. Momenteel wordt er gezocht naar budget om daarmee aan de slag te gaan.

### 3.4.3 Resultaat 3

In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de resultaten van dit deel van het project. Een belangrijk doel van deze activiteit was om te onderzoeken of er alternatieve reactoren zijn die bijvoorbeeld geen electrolyser nodig zouden hebben. Origineel was voorzien om een PD-Eng student te vinden die zowel ontwerp, onderzoek als testen zou moeten kunnen doen. Echter door de mismatch in timing tussen wanneer dit IEBB project van start is gegaan en wanneer de PD-Engs hun assignment moeten aanvaarden is het niet gelukt om een PD-Eng in te zetten. In plaats hiervan heeft de TUE nu drie bachelor eindproject studenten verschillende assignments gegeven.

De drie eindverslagen die hieruit naar voren zijn gekomen zijn:

- 1) "Feasibility study of low temperature electrochemical reduction of combusted iron"
- 2) "Techno-economic comparison between the reduction of iron-oxide using hydrogen or electrowinning, powered by sustainable energy from the grid"
- 3) "Design of spinning disc electrolyser for iron oxide regeneration"

De conclusie is dat er een aantal interessante concepten bij zitten. De TRL van deze nieuw concepten, voor toepassing als Redox warmteopslag, is nog laag. Sommige concepten zullen in de komende tijd bij de TUE verder zullen worden verkend en waarvoor inmiddels testopstellingen gebouwd zijn of gaan worden.

## 4 Conclusies leerpunten en aanbevelingen

### 4.1 Conclusies

De belangrijkste conclusies binnen dit project zijn:

- Voor fixed-bed Redox warmteopslag zijn de beoogde verbeteringen helaas niet gelukt. Hierdoor blijft het een complex aan te sturen systeem, waarbij o.a. veel sensoren nodig zijn om de oxidatie en reductie goed onder controle te houden. Opschaalbaarheid van dit systeem is beperkt en het blijft daardoor een complex en duur systeem voor kleine schaal. Het lijkt niet waarschijnlijk dat we voor de voorziene toepassing in de bebouwde omgeving met deze technologie een doorbraak gaan bereiken.
- Voor fluidized-bed Redox warmteopslag zijn we op heel laag TRL niveau ingestapt. Er zijn veel belovende resultaten verkregen en het systeem lijkt goed schaalbaar voor grote vermogens.
- De techno-economische analyse, uitgevoerd voor fluidized-bed gebaseerde REDOX warmteopslag voor utiliteitsschaal gebouwen en warmtenetten concludeert dat de Redox warmteopslagtechnologie het potentieel heeft voor betaalbare opslag en gereduceerde kosten voor verwarming specifiek ten opzichte van conventionele technologie zoals gasboilers. Warmtepomptechnologie blijft de meest efficiënte, ook in 2050, maar de kosten gerelateerd aan netcongestie, met name in koude periodes is nog niet meegenomen in de analyse.
- De TRL van de Redox fluidized-bed technologie is nog altijd laag en er zal nog veel ontwikkeld moeten worden om er een volwaardige technologie van te maken. Zaken die verder onderzocht moeten worden zijn onder andere: verhogen van de conversie, verbeteren cycleerbaarheid, nog beter voorkomen van sintering en slijtage, opschaling naar een grotere reactor.
- Een aantal interessante reactorconcepten zijn geïdentificeerd. De TRL van deze nieuw concepten, voor toepassing als Redox warmteopslag, is nog laag. Sommige concepten zullen in de komende tijd bij de TUE verder zullen worden verkend en waarvoor inmiddels testopstellingen gebouwd zijn of gaan worden.

### 4.2 Leerpunten

Uit de studie naar elektrochemische reactoren (resultaat 3) is naar voren gekomen dat de ontwikkeling niet gelimiteerd tot het optimaliseren van het elektrochemische groeiproces van ijzer alleen, maar is gerelateerd aan de complete cyclus: preparatie ruwe materialen, stabiliteit van het continue proces, oogsten van het geproduceerde ijzer en nabewerking zoals drogen en zeven. Voor succesvolle toepassing, zal het concept geïntegreerd moeten kunnen worden in de kleine en grote utiliteitssystemen in de bebouwde omgeving.

### 4.3 Aanbevelingen

We hebben een mooie stap mogen maken in de technologieontwikkeling. Echter voor deze lage TRL technologieën is voornamelijk nog geen aansluiting in bijvoorbeeld de MOOI calls. Voor die calls moet de TRL gelijk al heel hoog zijn. De aanbeveling naar het RVO is om hier rekening mee te houden en oog te houden voor continuïteit en ook voor technologieën waarvan het gebruik verder in de toekomst ligt.

## 5 Literatuur

- [1] Catalytic improvements on copper based fixed-bed REDOX-heat reactor performance, JK van der Waal, BTIC9.5-TNO-RP-2021-05(1), februari 2021
- [2] Literature search for reaction kinetics, composition and sizes of metals particles for utilization in non-fixed bed Redox Heat Storage Systems, P. Gupta, BTIC9.5-TNO-RP-2020-01, februari 2021
- [3] Techno-economics on heating of utility buildings by Metal Fuels - REDOX Heat storage under BTIC project 9.5, P. Gupta, BTIC9.5-TNO-RP-2021-06(1), December 2021