

TNO PUBLIEK

Energietransitie

Westerduinweg 3

1755 LE Petten

Postbus 15

1755 ZG Petten

www.tno.nl

T +31 88 866 50 65

TNO-rapport**TNO 2022 R11763 | Eindrapport****Flexsteam: ontwikkeling van industriële
warmteopslag**

Datum	22 september 2022
Auteur(s)	Michel van der Pal, Robert de Boer, Simon Smeding, Herbert Zondag
Aantal pagina's	18 (incl. bijlagen)
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	Flexsteam
Projectnummer	060.34456

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 TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

TNO PUBLIEK

Samenvatting

Voor industriële processen is stoom een belangrijke warmtedrager om producten en processen te verwarmen. In het Flexsteam project is gekeken naar de mogelijkheden voor energiebesparing door terugwinning, opslag en hergebruik van warmte in de vorm van stoom. Daarbij is het onderzoek specifiek gericht op het gebruik van faseovergangsmaterialen (Phase-Change Materials, PCM's) als materiaal om warmte in op te slaan. Het samenwerkingsverband van TNO, Bronswerk Heat Transfer, BlueTerra Energy Experts, COSUN, DOW Chemical, Tata Steel en ISPT heeft enkele technische en economische vraagstukken rondom de toepassing van PCM beantwoord.

Als eerste is gekeken naar de toepassingsmogelijkheden voor dit type warmteopslag bij de industrie (Tata Steel, DOW) door middel van modelberekeningen alsmede technische ontwikkeling van de PCM technologie op multi-kW schaal. De modelberekeningen tonen aan dat door toepassing van PCM voor warmteopslag zowel energie- als kostenbesparingen zijn te realiseren.

De technische ontwikkeling toont aan dat het faseovergangsmateriaal op basis van adipinezuur en geëxpandeerd grafiet stabiel is over vele cycli en in de testopstelling binnen 30 minuten volledig geladen/ontladen kan worden met een drijvende kracht van 10°C. De vrijwel constante temperatuur van de faseovergang vast-vloeibaar zorgt dat het thermisch vermogen bij stoomopname/afgifte slechts beperkt afneemt gedurende de laad/ontladperiode.

Een rekenmodel waarmee de thermische prestaties van het gekozen PCM warmteopslagconcept kan worden voorspeld, is gevalideerd aan de hand van meetresultaten aan een laboratorium testinstallatie. Dit model is een nuttige tool gebleken om voor beoogde toepassingen een passend thermisch ontwerp te maken. Het modulaire concept van buizen gevuld met PCM composiet en de gekozen vulmethode, maakt de opschaling naar demo- en fullscale relatief eenvoudig en voorspelbaar waardoor technische onzekerheden en risico's beperkt zijn.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
	Projectgegevens	4
1	Uitgangspunten en doelstellingen	5
1.1	Uitgangspunten.....	5
1.2	Doelstelling	6
1.3	Uitgevoerde activiteiten	7
2	Resultaten	8
2.1	Toepassing PCM warmteopslag in de industrie en techno-economische analyse ...	8
2.2	Ontwikkeling en test PCM opslagtechnologie	9
2.3	Perspectief voor toepassing	12
3	Bijdrage aan doelstelling van de regeling	14
4	Spin off binnen en buiten de sector	16
5	Publicaties over het project.....	17
	Ondertekening	18

Projectgegevens

Projectnummer	060.34456
RVO nummer	TEEI118004
Projecttitel	Development of heat storage for industrial steam, FLEXSTEAM
Penvoerder en medeaanvragers	TNO, COSUN, DOW bv., Tata Steel, BlueTerra Energy Experts, ISPT, Bronswerk Heat Transfer
Projectperiode	1/1/2019 - 31/12/2021

Deze rapportage is tot stand gekomen met bijdragen van Michel van der Pal, Robert de Boer, Simon Smeding, Herbert Zondag (TNO) en Rene Waggeveld (BlueTerra Energy Experts).

Contactpersoon: Robert de Boer, e-mail: robert.deboer@tno.nl

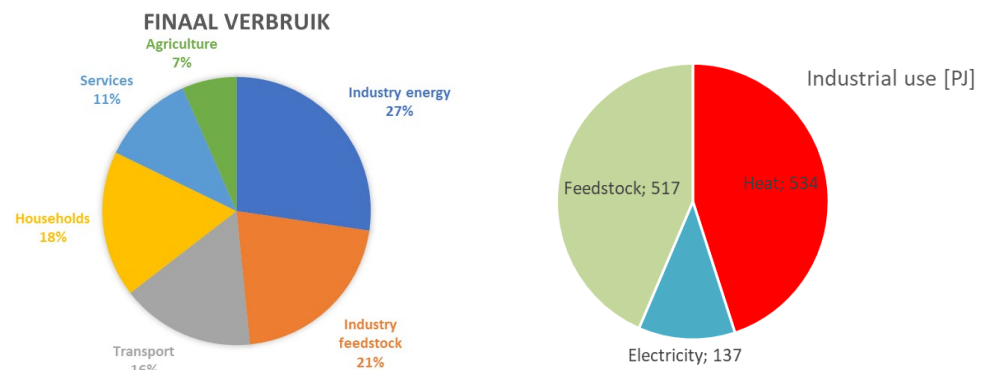


Dit project is uitgevoerd met Topsector Energie subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. De specifieke subsidie voor dit project betreft TSE subsidie ronde 2018.

1 Uitgangspunten en doelstellingen

1.1 Uitgangspunten

Figuur 1 laat de verdeling van het finaal verbruik van energiedragers in NL in 2021 zien. Hiervan gaat 48% (1188 PetaJoule) naar de industrie, deels voor energetische inzet, en deels als grondstof voor diverse producten. De jaarlijkse energiekosten voor de NL-industrie voor het aandeel warmte bedragen € 4.8 miljard. Dit bedrag is nog gebaseerd op het langjarig gemiddelde (referentie 2018), en ligt in de huidige verstoorde energiemarkt (2022) veel hoger. De actuele gasprijzen bedragen momenteel ongeveer het 10-voudige van dit langjarig gemiddelde.



Figuur 1: Verdeling NL-finaal energiegebruik (links) en industrieel gebruik (cijfers over 2021).

Warmte in de industrie

Warmte wordt op diverse temperaturen toegepast in industriële processen. Een groot deel van het warmtegebruik wordt gebruikt in de vorm van processtoom in de temperatuurrange tussen 100°C en 250°C, om grondstoffen voor te verwarmen, om reacties aan te drijven en voor scheidingsprocessen en droogtoepassingen.

Warmteopslag

Warmteopslag wordt al toegepast in de gebouwde omgeving, in de glastuinbouw en in de industrie. Hierbij gaat het om temperaturen tot maximaal 120°C en water is hierbij vrijwel altijd het opslagmedium. Recente toepassingen voor grootschalige warmteopslag zijn er bij WKK installaties en stadsverwarming, waarbij de warmtebuffer 'speelruimte' biedt om de WKK installatie meer afhankelijk van de elektriciteitsprijzen in te zetten, zonder dat de warmtelevering daarin mee fluctueert. Deze vorm van flexibiliteit is ook belangrijk voor inzet van industriële warmtepompen, en daarnaast kan de warmteopslag piekvraag opvangen vanuit het proces, wat met name belangrijk is voor batchprocessen.

Energie efficiency

De toepassing van warmteopslag kan effectief bijdragen aan de verbetering van de energie-efficiency van industriële processen. Warmtebuffering in het temperatuurgebied tussen 100-250°C wordt nog slechts zelden aangetroffen. Toch is dit een temperatuurrange waarin warmteopslag steeds belangrijker zal worden, door de toenemende aandacht voor reductie van het fossiele brandstof gebruik. Dit leidt tot verdergaande (rest)warmterugwinning, direct of via opwaardering met industriële warmtepompen. Daarin vormt warmteopslag een essentiële systeemcomponent, om mismatch tussen aanbod en vraag in tijd, temperatuurniveau en vermogen te compenseren.

Flexibiliteit

Warmte vormt ook een belangrijke bouwsteen in de toenemende vraag naar flexibiliteit in het energiesysteem door het stijgende aandeel duurzame energie uit zon en wind. Een voorbeeld hiervan is de inzet van 'power-to-heat' waarbij warmte-opslag een sleuteltechnologie is om flexibiliteit tussen verwarming via gas of via tijdelijk goedkope duurzame elektriciteit te vergroten.

De ontwikkeling van innovatieve warmteopslagtechnologie biedt concrete kansen voor:

- Energiebesparing bij industriële (batch)processen en integratie van industriële warmtepompen;
- Flexibiliteit in het energiesysteem, door het bufferen van piekaanbod van duurzame energie, het opvangen van piekvraag vanuit het proces en het ontkoppelen van warmte en kracht vanuit (industriële) WKK installaties.

PCM warmteopslag

Voor het maken van processtoom en voor integratie van warmtepompen is warmteopslag op basis van PCM (Phase Change Materials, faseovergangsmaterialen) zeer geschikt. De faseovergang in de PCM (vast-vloeibaar) treedt op bij een vaste temperatuur en kan goed afgestemd worden op de vrij constante temperatuur van de faseovergang bij stoomproductie en condensatie. Ook warmtepompen leveren warmte bij een vrij constante temperatuur door condensatie van het werkmedium. Dit biedt ook een goede match tussen de eigenschappen van een PCM warmteopslag en de karakteristieken van een warmtepomp.

In eerdere projecten voor PCM warmteopslag (Varende Warmte, LOCOSTO en PCM-Scale-up), is geconcludeerd dat de stabiliteit van de PCM's nog sterk verbeterd moet worden en de snelheid van laden en ontladen van PCM warmteopslag omhoog moet. Verder is voor succesvolle toepassing belangrijk dat de kostprijs concurrerend wordt met conventionele fossiele warmteopwekking.

Probleemstelling

Warmteopslag in industriële processen vraagt om hoge thermische vermogens, bij typische procestemperaturen in de range van 100°C-250°C. Hiervoor zijn nu nog geen commercieel verkrijgbare oplossingen beschikbaar. Warmteopslag op basis van PCM (Phase Change Materials, faseovergangsmaterialen) is daarvoor in theorie zeer geschikt. De concrete toepassing van PCM's voor hoge temperatuur warmteopslag ondervindt nog de volgende barrières:

- Onzekerheden over de technische prestaties en lange duur stabiliteit;
- Het verkrijgen van voldoende vermogensdichtheid;
- Hoge systeemkosten;
- Onbekendheid bij eindgebruikers en systeemleveranciers.

1.2 Doelstelling

De doelstellingen van het Flexsteam project zijn:

- Het aantonen van de technische haalbaarheid en stabiliteit van een modulair en schaalbaar PCM warmteopslagconcept voor industriële vermogens, temperaturen en capaciteiten;

- Het ontwikkelen van een opschaalbare fabricagemethode voor hoge temperatuur PCM in poreus grafiet composiet;
- Beoordeling van het economische perspectief van de ontwikkelde PCM warmteopslagtechnologie voor industriële toepassingen.
- Bekendheid genereren bij potentiële eindgebruikers voor toepassingen en de besparingen in energie en kosten die met deze PCM warmteopslagtechnologie mogelijk zijn.

1.3 Uitgevoerde activiteiten

De activiteiten van het Flexsteam project zijn uitgevoerd in een aantal werkpakketten. Als eerste is gekeken naar de **technische specificaties, conceptueel ontwerp en techno-economische analyse** van een PCM warmteopslag. Hierin zijn berekeningen uitgevoerd met betrekking tot de integratie en te behalen energiebesparing met PCM opslag in bestaande processen bij DOW en Tata Steel.

Vervolgens is gewerkt aan de **ontwikkeling, test en selectie van PCM's, en PCM composiet** waarin cyclische stabiliteit bij herhaaldelijk smelten en stollen, de warmtegeleiding en de snelheid van laden en ontladen zijn bepaald. Tevens is een thermisch model voor de PCM opgesteld en met resultaten van kleinschalige experimenten gevalideerd.

De te hanteren **fabricagetechnieken voor PCM composiet** en de **opschaling** zijn ervan zijn uitgewerkt en toegepast voor de **Ontwikkeling en bouw PCM warmteopslagsysteem** waarmee in het lab op een schaal van 10kWh de prestaties zijn vastgesteld. De prestatie van het opslagsysteem zijn wederom gebruikt voor het valideren van het PCM systeemmodel.

2 Resultaten

2.1 Toepassing PCM warmteopslag in de industrie en techno-economische analyse

Toepassing van een PCM-warmteopslagsysteem binnen Tata-steel is onderzocht voor terugwinning van warmte uit rookgassen en deze warmte in te zetten voor de levering van stoom. In deze toepassing kan er bij direct hergebruik ongeveer 35 GWh worden teruggewonnen en een vergelijkbare hoeveelheid worden bespaard op het gasverbruik van de stoomboiler. Het toevoegen van een PCM-warmteopslagsysteem aan de warmteterugwinning creëert een gedeeltelijke ont koppeling tussen vraag naar stoom en aanbod van restwarmte, waarmee aanvullende besparingen gerealiseerd kunnen worden. Afhankelijk van de gekozen capaciteit van de warmteopslag zijn de aanvullende besparingen van 1 tot 7% berekend. In een nadere analyse is ook een verbinding gemaakt tussen het stoomsysteem en de warmtelevering aan een toekomstig warmtenet in de omgeving van Tata-steel. De inzet van het PCM warmteopslagsysteem wordt in deze situatie met het warmtenet ongeveer verdubbeld, en daarmee ook de energie- en kosten besparingen.

De technische potentie van het hoge temperatuur warmteopslagsysteem bij Tata-steel is hiermee aangetoond; kostentechnisch is het onder deze omstandigheden nog niet haalbaar. Terugverdiertijden voor de PCM opslag zijn berekend op ten minste 8 jaar, op basis van energieprijzen van 2020. Belangrijkste parameters in deze economische analyse zijn het aantal laad/ontlaad cycli en de kosten voor energie. Bij toepassingen waar de frequentie van laden- en ontladen oploopt naar vier keer of meer per dag wordt de rentabiliteit interessant; bij deze frequentie hoort een PCM die minimaal 10.000 cycli stabiel is. In de huidige verstoorde energiemarkt met zeer hoge gasprijzen, wordt geldt verder voor elke energiebesparingsmaatregel dat deze al sneller economisch rendabel zal zijn.

Binnen DOW Chemical Terneuzen is de business case voor een warmtebuffer beoordeeld in een situatie waarbij de warmtebuffer elektrisch wordt verwarmd op momenten dat er een groot aanbod van duurzame opwekking is uit zon en wind, en er tijdelijk lage E-prijzen gelden. Op deze manier kan het aandeel duurzaam opgewekte warmte voor de site worden vergroot en een reductie in CO₂ uitstoot worden behaald. De warmtebuffer wordt ingezet voor stoomlevering op momenten dat de E-prijs hoog is. In deze analyse is niet specifiek van een PCM buffer uitgegaan, maar is een generieke warmteopslag aangenomen

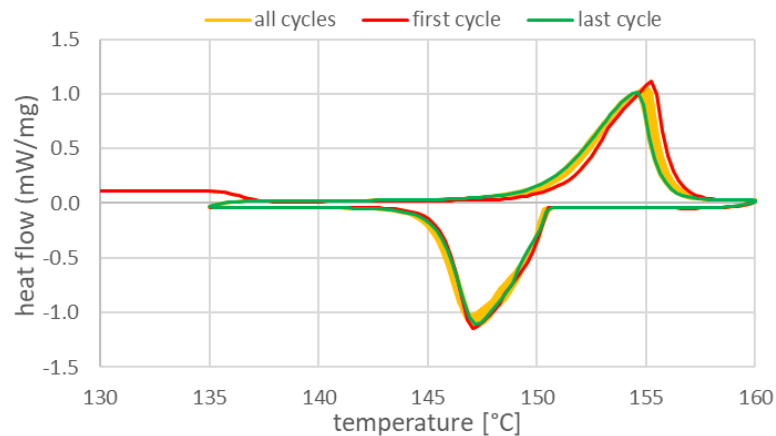
In het scenario met een relatief hoge gasprijs (inclusief CO₂-taks) ten opzichte van de gemiddelde E-prijs kan een warmtebuffer zich op een termijn van 5-10 jaar terugverdienen. Naar verwachting zal de business case voor kortere duur (2-8 uur) warmteopslag initieel gunstig kunnen uitpakken, op de langere termijn zal ook opslag voor langere opslagduur (24 uur en meer) kosteneffectief kunnen zijn. De belangrijkste parameter in deze analyse is de toekomstige ontwikkeling van de prijsfluctuaties op de elektriciteitsmarkt. De verwachting is dat deze fluctuaties verder zullen stijgen met het toenemende aanbod van zon en wind, wat de business case voor warmteopslag beter maakt.

2.2 Ontwikkeling en test PCM opslagtechnologie

2.2.1 PCM Materiaal en composiet ontwikkeling en tests

Initieel is een suikeralcohol (Mannitol, faseovergang bij 150°C) als PCM getest. Dit materiaal was onvoldoende cyclisch stabiel, wat leidt tot vermindering van de hoeveelheid opgeslagen warmte bij toenemend aantal laad/ontlaad cycli. Ook vertoonde mannitol een sterke onderkoeling, waardoor de opgeslagen warmte pas bij een veel lagere temperatuur weer vrijkomt. Hieruit is geconcludeerd dat mannitol ongeschikt is voor toepassing als PCM.

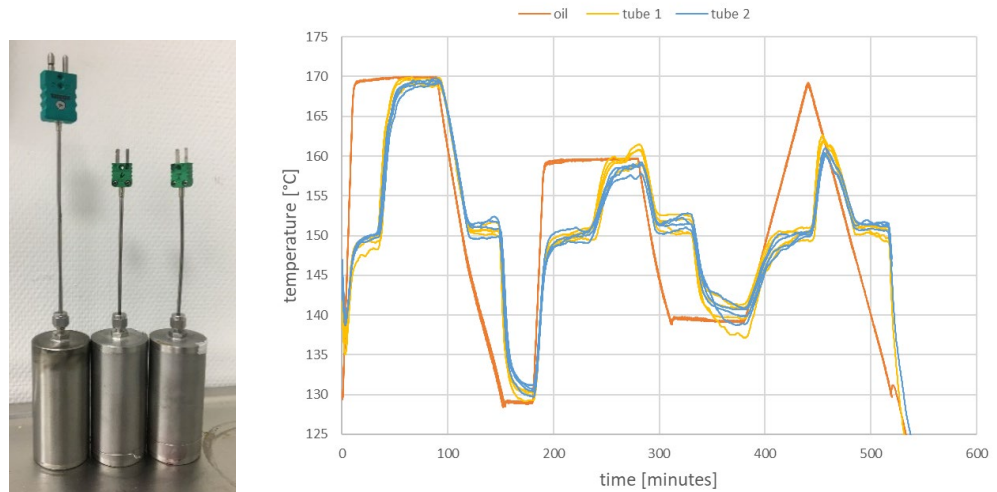
Als alternatief is adipinezuur geselecteerd. Dit materiaal heeft een vergelijkbare smeltemperatuur als mannitol. DSC metingen, zie Figuur 2, tonen aan dat adipinezuur over 46 cycli stabiel blijft en geen onderkoeling vertoont. Dit betekent tevens dat het in principe geschikt is als PCM voor warmteopslag toepassingen. De gemeten smeltenthalpie bedraagt zo'n 230 Joule per gram adipinezuur.



Figuur 2: Warmte-opname/afgifte van adipinezuur als functie van de tijd in DSC analyse.

Adipinezuur is gemengd met grafiet (ENG, expanded natural graphite) ter verhoging van de warmtegeleiding. De warmtegeleiding van het PCM-ENG composiet is gemeten aan de hand Laser Flash Analysis, LFA. De resulterende warmtegeleidingscoëfficiënt bedroeg $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Dit is voldoende om het materiaal in een buis van $\pm 5 \text{ cm}$ diameter, en met 10 graden temperatuurverschil aan de buitenzijde ervan, binnen één uur tijd resp. te laden of te ontladen.

Figuur 3 toont de 15 cm hoge, 5 cm diameter, testbuisjes gevuld met PCM composiet materiaal, en een temperatuursensor in het midden geplaatst. In een thermostaatbad zijn de externe temperaturen aan de buisjes opgelegd. De resultaten hiervan zijn in Figuur 3 (rechts) weergegeven. Gedurende het smelten/stollen van het PCM blijft de samptemperatuur gelijk en vormt daardoor een plateau wat pas verder stijgt/daalt wanneer het materiaal volledig is gesmolten/gestold. De metingen laten een smelttijd zien van ongeveer 40 minuten bij een drijvende kracht van zo'n 10 graden temperatuurverschil.



Figuur 3: Testbuisjes gevuld met PCM (links) voor lab-schaal tests van laad- en ontladsnelheid van adipinezuur-ENG composiet in oliebad. (rechts) Temperatuurverloop als functie van de tijd van thermische olie (oranje) en PCM temperatuur (geel en blauw) over herhaalde temperatuur cycli.

2.2.2 Ontwikkeling, bouw PCM warmteopslagsysteem

In het Flexsteam project is gekozen voor een concept van met PCM composiet gevulde buizen. Met dit concept kan eenvoudig de opslagcapaciteit op de eisen van de toepassing worden afgestemd door het aantal buizen, en eventueel de lengte te veranderen. De gevraagde snelheid van laden en ontladen kan worden bereikt door met de diameter van de buis te variëren. Ook zijn ronde buizen een veelgebruikte standaard component in de industrie en derhalve zijn de kosten relatief laag. Daarnaast is het proces van vullen van de buizen met PCM composiet gescheiden van de assemblage van de warmte-opslag unit. Hierdoor kunnen beide processen onafhankelijk van elkaar verder worden geoptimaliseerd.

Op basis van de resultaten van de materiaaltests is het ontwerp van het PCM warmteopslagsysteem gemaakt (Bronswerk), waarmee de tests met opslag en afgifte van warmte in de vorm van stoom worden uitgevoerd.

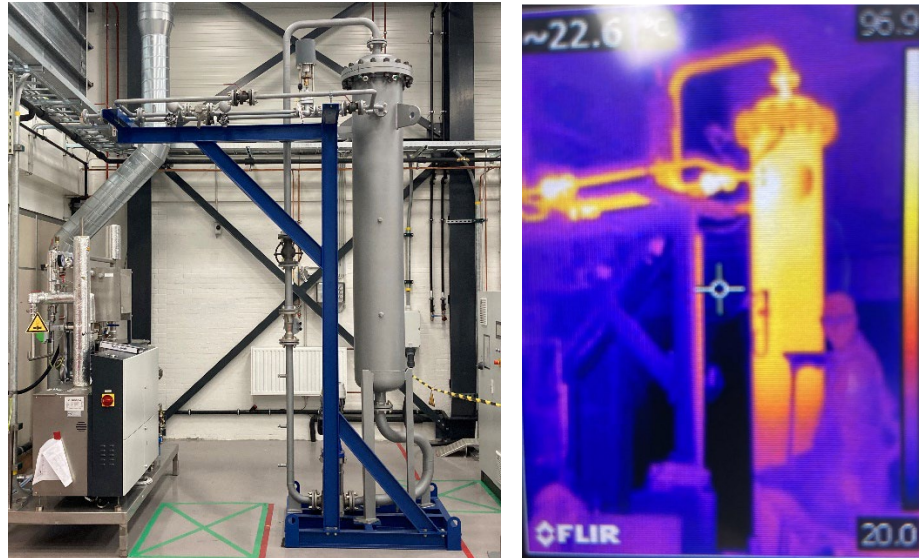
Figuur 4 toont de samenstelling van 19 PCM gevulde buizen, samen met het drukvat waarin deze vervolgens geplaatst zijn.



Figuur 4: Samenstelling van gevulde PCM buizen, voor plaatsing in het drukvat.

Het opslagsysteem is samengebouwd en aangesloten op een stoomgenerator en condensor (Figuur 5), waarmee het opslagsysteem kan worden geladen en

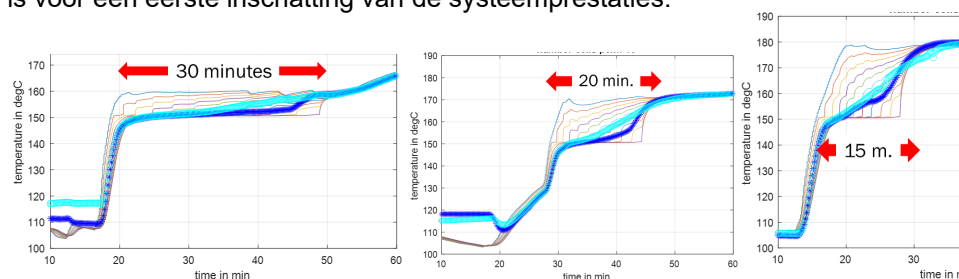
ontladen op basis van stoom. De stoom toe/afvoer van/naar het PCM warmteopslagsysteem wordt geregeld met behulp van kleppen, waarvan één elektronisch gestuurde regelklep waarmee een constante druk in het systeem kan worden opgelegd gedurende laden en ontladen. Voor het ontladen van het systeem, wordt water rondgepompt, dat in contact met de buizen overgaat in stoom en via de regelklep naar de condensor wordt afgevoerd.



Figuur 5: (Links) PCM testopstelling aangesloten op de stoomgenerator. (Rechts): infrarood beeld van de installatie (nog zonder isolatie) waarin stoom wordt aangevoerd vanuit de stoomgenerator.

2.2.3 PCM Warmteopslagsysteem tests en optimalisatie

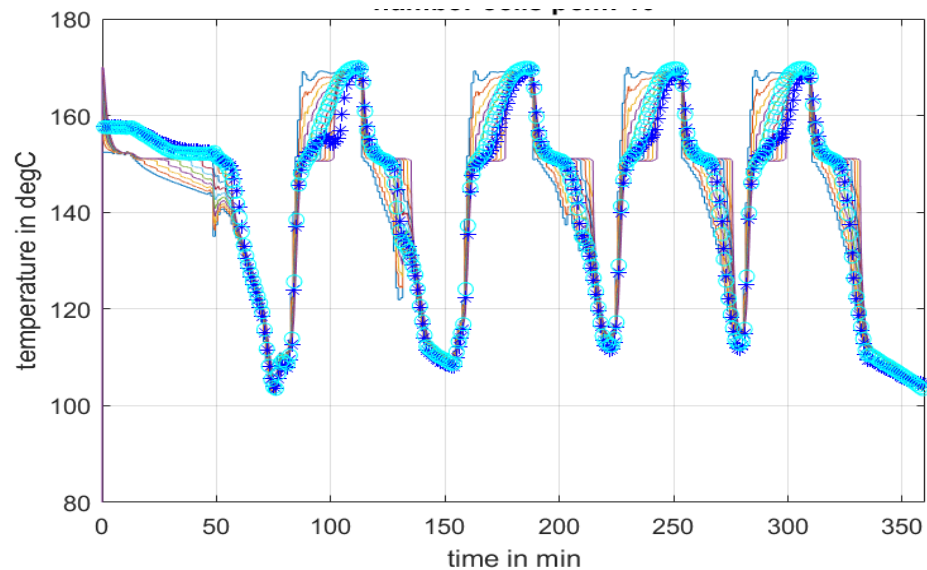
Het systeem is voorafgaand aan de tests voorzien van thermische isolatie om de warmteverliezen sterk te beperken. Het PCM warmteopslagsysteem is getest op laden en ontladen onder een reeks verschillende condities. Figuur 6 toont de verschillende beladingscycli met respectievelijk 10, 20 en 30 graden drijvende kracht, oftewel stoom van 160, 170 en 180°C. Uit deze metingen blijkt dat bij kleine drijvende kracht van 10 Kelvin het systeem in 30 minuten volledig geladen kan worden. Dit gaat nog sneller met grotere drijvende kracht. De metingen tonen ook aan dat het model de werkelijke waarde goed benadert en daarmee goed bruikbaar is voor een eerste inschatting van de systeemprestaties.



Figuur 6: Beladingscycli bij verschillende stoomtemperaturen, metingen (blauwe lijnen) en modelberekeningen (op verschillende afstanden in de buis).

Naast metingen aan de snelheid van belading/ontlading zijn er ook herhaalde cycli gemeten om te bepalen in welke mate de resultaten herhaalbaar zijn en/of er veranderingen optreden in de prestaties van de warmteopslag unit. Figuur 7 toont

de resultaten van een viertal aaneengesloten laad/ontlaad cycli. Hieruit blijkt een stabiel werkend systeem.



Figuur 7: Temperatuur van het PCM-grafiet composiet (blauwe lijnen) als functie van de tijd in herhaalde metingen, samen met gemodelleerde waarden.

Het PCM warmteopslagsysteem heeft in het temperatuurgebied van 130-170°C een opslagcapaciteit van rond 10 kWh (36 MJ). Daarvan is er 4 kWh (14 MJ) opslagcapaciteit in latente warmte van het PCM en de rest in voelbare warmte van de constructiematerialen en het watervolume onder in het vat.

Het thermisch vermogen tijdens laden en ontladen kon worden bepaald aan de hand van meting van de verandering van het niveau van het condensaat onder in het vat. Tijdens het laden neemt het waterniveau geleidelijk toe door condensatie van de toegevoerde stoom, bij ontladen neemt het niveau weer af door afvoer van de stoom.

De gemiddelde thermische vermogens tijdens laden en ontladen variëren tussen 20-40kW, afhankelijk van de ingestelde condensatietemperatuur (=stoomdruk) bij laden en ontladen. Met deze vermogens kon de PCM in laad-ontlaad cycli van 1 uur volledig worden geladen en weer ontladen.

De round-trip efficiency van een laad-ontlaad cyclus ligt voor het huidige systeem rond 80% bij cycli van 1 uur. Deze efficiency wordt voornamelijk bepaald door de mate van warmteverlies van de opstelling en de duur van een cyclus. In deze kleinschalige testinstallatie is het warmteverlies nog vrij hoog (~2kW bij 160°C) in verhouding tot de opslagcapaciteit. Bij opschaling zal de relatieve bijdrage van het warmteverlies kleiner zijn en mag een hogere efficiency (typisch ~90%) worden verwacht.

2.3 Perspectief voor toepassing

2.3.1 Technisch

De huidige resultaten laten zien dat het technisch mogelijk is om met het modulair ontwerp van het PCM warmteopslagsysteem, warmte op te slaan en terug te leveren in de vorm van stoom. Vervolgactiviteiten zouden erop gericht moeten zijn

om de basis van deze waarnemingen te verstevigen, bijvoorbeeld door aanvullende metingen aan de huidige test-opstelling, gericht op aspecten zoals de cyclische stabiliteit over vele cycli, het gedrag bij deellast bedrijf en bij onvolledige laad /ontlaad cycli. Aanvullend moeten vervolgactiviteiten zich richten op duurtests aan het PCM composiet en zal een post-test analyse van de buizen en het composiet bruikbare informatie verschaffen over het lange termijn stabiliteit.

Verder verdient het aanbeveling alternatieve PCM's te ontwikkelen om zodoende het concept over een groter temperatuurgebied (van 130-300°C) te kunnen toepassen en daarmee het toepassingspotentieel verder te vergroten. Tot slot zal er aandacht moeten uitgaan om het concept op te schalen naar MWh-opslag grootte, bij voorkeur in een on-site demonstratie. Dit zal inzicht geven in de eventuele aandachtspunten bij opschaling naar fullscale units en bijbehorende integratievraagstukken.

2.3.2 *Economisch*

Onder energiemarktcondities van vóór de oorlog tussen Rusland en Oekraïne is de terugverdiëntijd van industriële warmteopslag nog niet aantrekkelijk. Alleen in zeer specifieke situaties, waarbij op jaarbasis zo'n 1000 of meer laad en ontlad cycli worden doorlopen is er mogelijkheid op voldoende korte terugverdiëntijden. Er zijn 2 markt ontwikkelingen die een positieve uitwerking geven op de economische haalbaarheid voor warmteopslag in de industrie.

- De recente grote veranderingen in de energiemarkt en de stijgende prijzen voor gas en elektra, maakt dat energie efficiency maatregelen, zoals warmte-terugwinning met tussenkomst van warmteopslag, zich veel sneller kunnen terugverdienen.
- De stijging van het aandeel zon en wind in de energiemix, vraagt om meer flexibiliteit in het energiesysteem. Warmteopslagtechnologie, in combinatie met industriële elektrificatie biedt hiervoor goede kansen om op een kosten-effectieve manier tijdelijke overschotten aan duurzame elektriciteitsopwekking, om te zetten naar warmte en deze te bufferen voor momenten met laag aanbod.

3 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

Duurzame energiehuishouding

De beoogde markt voor warmteopslagtechnologie voor stoom systemen is de proces industrie. Stoom vormt het meest gebruikte medium voor warmtetransport en overdracht in een breed scala van industriële processen. Momenteel wordt het merendeel van de stoomopwekking in de industrie aangedreven door fossiele brandstoffen, met name aardgas.

De inzet van warmteopslag in industriële processen draagt op 2 manieren bij aan de verduurzaming van warmte voor deze processen.

- Verbeteren van de energie efficiency
- Verhogen van de energie flexibiliteit van de processen

De verbetering van de energie efficiency door warmteopslag ontstaat door het loslaten van gelijktijdigheid in het terugwinnen en hergebruiken van restwarmte uit processen. Met warmteopslag is het mogelijk aanbod van en vraag naar warmte in de tijd op elkaar af te stemmen, waarmee een groter energiebesparingspotentieel kan worden ontsloten. Daarnaast kan warmteopslag een rol als 'enabling technology' spelen voor de bredere toepassing van industriële warmtepomp-technologie, als efficiënte warmteopwekker. Ook bij warmtepompen is een gedeeltelijke ontkoppeling tussen aanbod van restwarmte en warmtevraag nodig, vooral bij niet-continue processen, om een goede integratie van een warmtepomp in een proces te verkrijgen.

De vergroting van energie flexibiliteit van processen door integratie van warmteopslag heeft betrekking op de integratie van fluctuerende duurzame opwekking van energie in industriële processen. Met name bij elektrificatie van industriële warmteprocessen biedt warmteopslag de flexibiliteit om variaties in aanbod van elektriciteit uit zon en wind op te vangen en naar gelang de vraag van het proces weer af te geven. Op deze manier draagt de flexibiliteit door warmteopslag bij om een groter aandeel duurzame opwekking te benutten en tijdelijke overschotten duurzame opwekking te voorkomen.

Kennispositie

Het Flexsteam project heeft kennis gegenereerd op het gebied van materiaal-karakterisering en materiaalselectie van PCM's voor warmteopslag toepassingen in industriële stoom systemen. Daarnaast is er kennis opgebouwd over de warmtegeleiding van PCM materiaal, en hoe deze met toevoeging van grafiet verbeterd kan worden. De kennis over de warmtestromen in een PCM warmteopslagsysteem zijn in een rekenmodel toegepast, en dit model is gevalideerd aan de hand van meetresultaten aan het ontwikkelde testsysteem. Ook de kennis om PCM warmteopslag toe te passen in combinatie met stoom als warmteoverdrachtsmedium is in het project ontwikkeld.

Deze technische kenniselementen dragen bij om in de verdere ontwikkeling en opschaling van de technologie zowel op materiaal als op systeemniveau tot goed werkende concepten te komen.

Naast technische kennis is ook een goed inzicht verkregen in de economische aspecten van warmteopslag, en de factoren die een belangrijke rol spelen om tot een goede business case voor warmteopslag te komen.

4 Spin off binnen en buiten de sector

Een Europees projectvoorstel is opgezet voor vervolgonderzoek naar PCM warmteopslag voor industriële toepassingen. Het consortium omvat naast TNO ook Tata Steel en diverse internationale partijen, waaronder kennisinstituten, maakpartijen en eindgebruikers. Het voorstel is gericht op de verdere ontwikkeling van het Flexsteam concept en verbreding van temperatuurbereik en de toepasbare PCM's daarvoor.

Daarnaast is een project in de TSE-Industrie call ingediend waarin een tool zal worden ontwikkeld, waarmee een screening van elektrificatie opties voor industriële processen kan worden uitgevoerd. Als onderdeel hiervan wordt ook de flexibiliteit van de diverse technologieën beoordeeld, en wordt warmteopslag in PCM als één van de flexibiliteitsopties meegenomen.

5 Publicaties over het project

De kennisverspreiding voor het Flexsteam project heeft plaatsgevonden via de IRES (Int. Renewable Energy Storage) conferentie en de International Heat Powered Cycle conferentie.

Bij IHPC conferentie is een paper en een poster over de resultaten met de kleinschalige test en modellering gepresenteerd

https://www.researchgate.net/publication/361791869_9th_HPC_Conference_Proceedings

Paper pagina 151-158: *Development of a latent heat storage for industrial application based on adipic acid – graphite composite*, M. van der Pal, K. Ingenwepelt and R. de Boer

Poster, pagina 721: *Numerical model of a latent heat storage unit for industrial application*, K. Ingenwepelt, M. van der Pal

Bij de IRES conferentie van 2020 is werk over materiaal tests gepresenteerd:

<https://www.atlantis-press.com/article/125952207.pdf>

Development of an Industrial Heat Storage Using High-Temperature PCM-Graphite Composites, H.A. Zondag et al.

Bij de IRES conferentie (2022) wordt een overzicht van de resultaten behaald met de testinstallatie gepresenteerd.

Testing of an industrial PCM heat storage prototype using adipic acid-graphite, H.A. Zondag et al.

Het project is verder in het netwerk van ISPT en in het warmte integratie platform onder de aandacht gebracht bij stakeholders.

<https://ispt.eu/projects/steam-storing>

Projectvoortgang zijn door ISPT gedeeld via een posterpresentatie

<https://ispt.eu/publications/?project-tag=UH-30-02>

en nieuws-updates in het netwerk en bij het brede publiek.

Ondertekening

R. de Boer
Auteur

S. van Loo
Research Manager