

Warmteopslag met faseovergang materialen

R&D roadmap

Datum: 1 maart 2016

Versie: 1.4

Auteurs: dr. G.W.P. van Pruissen, Cornelissen Consulting Services BV (CCS)
ir. A. J. Kalkman, TNO
ing. K. Algera, Itho Daalderop

In opdracht van:



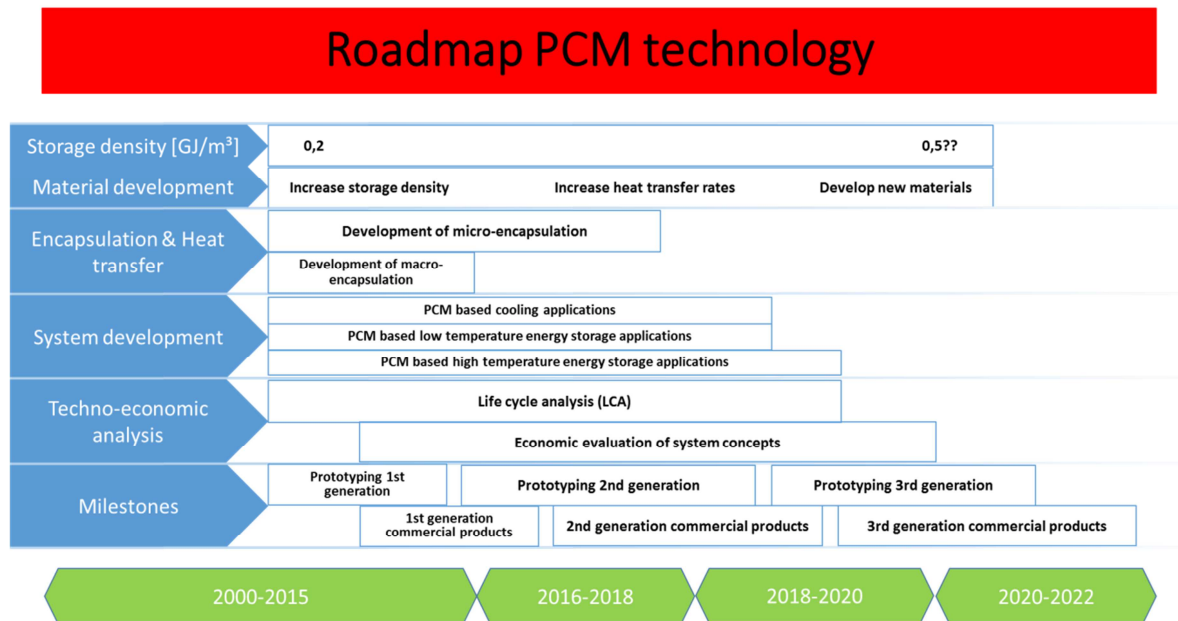
1. INLEIDING

Warmteopslag maakt het mogelijk om onevenwichtigheden in vraag en aanbod van warmte en koude op te vangen. Zo kan bijvoorbeeld overtollige warmte overdag opgeslagen worden en 's nachts, als er warmtevraag is, weer worden afgegeven. Hiervoor zijn een aantal technieken en materialen beschikbaar die gebruik maken van verschillende natuurkundige/chemische processen, elk met zijn eigen voor- en nadelen.

Sensibele warmteopslag maakt gebruik van de warmtecapaciteit van materialen en slaat warmte op door het materiaal te verwarmen, bijvoorbeeld water van 10°C naar 50°C. Omdat de warmtecapaciteit

Latente warmteopslag maakt gebruik van de overgangsenthalpie in een faseovergang. Bekende voorbeelden zijn de overgang van ijs naar water en van water naar stoom. Deze faseovergangen vinden plaats bij één bepaalde temperatuur (smelttemperatuur = 0°C of kooktemperatuur = 100°C). Bij deze vaste temperatuur kunnen vaak grote hoeveelheden energie (warmte) worden opgenomen- of afgestaan.

1.1. VISUALISATIE R&D ROADMAP



Figuur 1 - PCM roadmap 2015 - 2025

In Figuur 1 is de R&D roadmap geschetst zoals die door de betrokken partijen is voorzien. Achtergronden en de belangrijkste ontwikkelingsvragen worden in het navolgende hoofdstukken verder uitgewerkt.

2. SYSTEEMVEREISTEN

2.1. USE CASE

Als eigenaar van een gemiddelde woning in Nederland wil ik mijn woning zo duurzaam mogelijk verwarmen op een comfortabele, geluidloze, compacte en klimaat neutrale manier, volledig onafhankelijk van fossiele brandstoffen.

2.2. REFERENTIESITUATIE

We beschouwen een SenterNovem referentie EGW van 123 m², gebouwd na 1-1-2015, met een zeer goede isolatiewaarde (R_c façade, dak en vloer 5,0; 6,5 en 3,5 m²K/W respectievelijk, U-waarde beglazing 1,0 W/m²K, energie efficiënte ventilatie met HR-warmte terugwinning en een specifieke luchtdichtheid < 0,6 dm³/sm²), resulterend in een aansluitvermogen van 2 kW_{th} voor ruimteverwarming. In de referentiesituatie wordt dit huis verwarmd en van warm tapwater voorzien met een gasketel, die in dit specifieke geval een rendement van 75% heeft.

2.3. DOEL

Het doel van de huiseigenaar is om de gasaansluiting af te sluiten, energie en kosten te besparen en voor de benodigde energie uitsluitend duurzame bronnen te gebruiken, zonder concessies aan comfort te doen.

2.4. KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPI'S)

Het systeem dient aan de volgende minimale specificaties te voldoen:

- Comfortabel: 21 °C in de verblijfsruimten bij een buitentemperatuur van -10 °C, buitentemperatuur - 3 °C bij buitentemperaturen > 26 °C.
- Geluidloos: geluidsniveau < 28 dB(A) in de verblijfsruimtes van de woning.
- Compact: afmeting 0,6 x 0,6 meter, maximaal verdiepinghoogte voor de systeemonderdelen die niet zonder ruimtebeslag weggewerkt kunnen worden in andere delen van de constructie.
- Klimaatneutraal: Er wordt geen gebruik gemaakt van schadelijke of gevaarlijke processen, chemicaliën of materialen. (bijvoorbeeld geen gebruik van koudemiddelen die een *ozone depletion potential* (ODP) of *global warming potential* (GWP) hebben.)
- Veilig: Geen toepassing van brandbare materialen of hoge systeemdrukken.
- Energie-efficiënt: Er wordt een zo laag mogelijk extern energieverbruik nagestreefd, bij voorkeur nul op de meter of netto producent.

3. UITWERKING ROADMAP

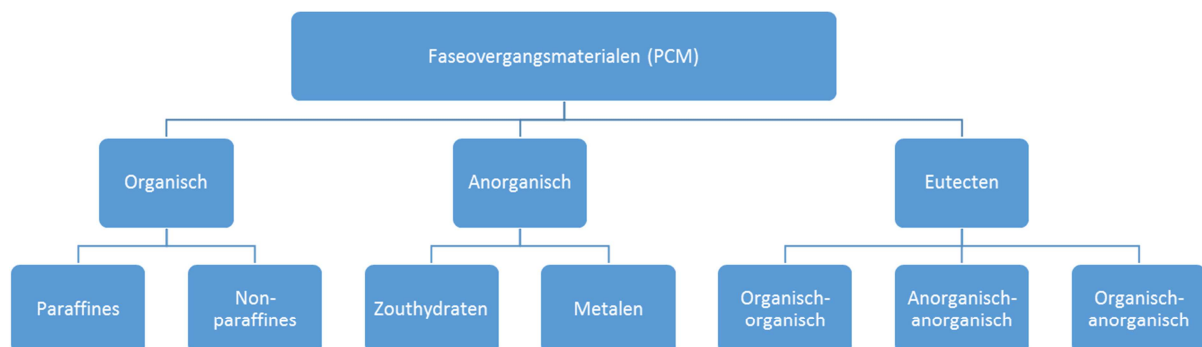
3.1. ENERGIE OPSLAGDICHTHEID

De latente warmteopslag in een faseovergang is een thermodynamische eigenschap van het betreffende materiaal. Eén van de materialen met de hoogst bekende smeltenthalpie is water; 334 kJ/kg bij een smeltemperatuur van 0 °C. Voor compacte energieopslag in woningen, met de in de use case gestelde ruimtebeperking, zou een veel hogere energiedichtheid gewenst zijn, zeker als het over seizoensopslag gaat. Onderzoek van de afgelopen decennia heeft weliswaar veel nieuwe materialen met andere smeltemperatures en relatief hoge smeltenthalpie opgeleverd maar het ontwikkelen van een materiaal met een significant hogere smeltenthalpie dan die van water lijkt niet realistisch.

Ondanks de lager dan gewenste energie opslagdichtheid biedt het gebruik van PCM veel voordelen. De vormvrijheid maakt het bijvoorbeeld mogelijk PCM op veel meer plaatsen te verwerken zonder additioneel ruimtegebruik. Daarmee kunnen toch de benodigde volumes in een woning gerealiseerd worden. Onderzoek naar PCM richt zich daarom meer op hoe PCM verwerkt kan worden in bijvoorbeeld bouwmaterialen en in wat voor systemen PCM het best gebruikt kan worden.

3.2. MATERIAALONTWIKKELING

Zowel organische, anorganische en mengsels van beide materialen kunnen als PCM gebruikt worden. In de afgelopen decennia is veel onderzoek naar de materiaaleigenschappen en mogelijk toepassingen van PCM uitgevoerd dat in verschillende reviews is samengevat.¹⁻⁷ De meest gebruikte PCM materialen vallen in één van de categorieën van Figuur 2. Elk van deze categorieën heeft zijn eigen voor- en nadelen waardoor materiaalontwikkeling zich richt op het verminderen van deze specifieke problemen. Een korte omschrijving van de belangrijkste voor- en nadelen per categorie staat in Bijlage I, PCM Categorieën. Belangrijke materiaaleigenschappen zijn de smeltemperatuur, de smeltenthalpie, de warmtegeleiding, hysteresis in de stol/smelt cyclus en de stabiliteit tijdens veelvoudige cycli. Met name in de laatste parameters



Figuur 2 – Schematisch overzicht van de verschillende materiaalcategorieën van veel gebruikte materialen voor PCM.

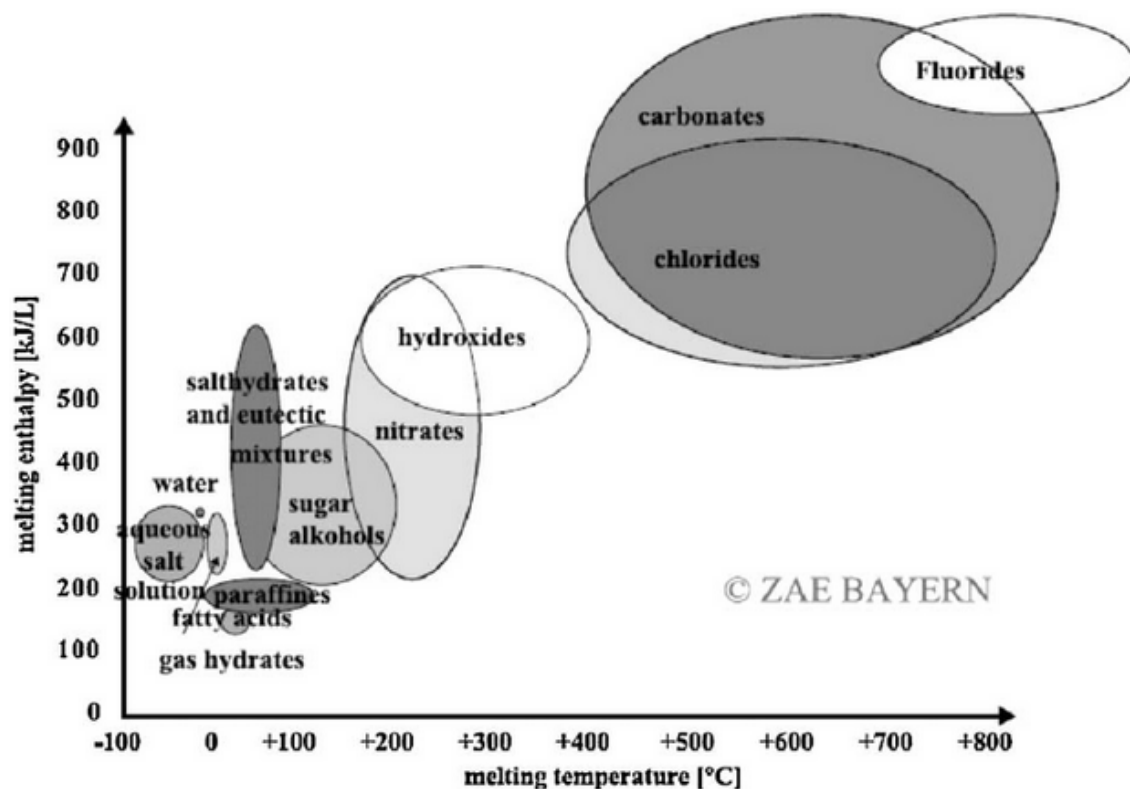
SMELTTEMPERATUUR

Water is wellicht het bekendste voorbeeld van een PCM en heeft een smeltemperatuur van 0°C. Andere materialen hebben smeltpunten bij temperaturen die zich over een breed spectrum verspreiden. Cabeza *et al.* hebben daarvan een uitgebreide inventarisatie naar temperatuur gebied

gemaakt.⁸ Afhankelijk van welke werktemperatuur er voor een bepaalde toepassing vereist is, voor klimaatbeheersing in leefruimten bijvoorbeeld 20 – 24 °C, zijn er voldoende materialen beschikbaar met een smeltemperatuur in dat specifieke gebied. Voor veel materialen is dit door gebruik van toevoegingen of andere mengverhoudingen ook nog eens heel nauwkeurig af te stemmen. Verder onderzoek naar smeltemperatuur/nieuwe materialen met andere smeltemperatuur is in het licht van deze Roadmap niet nodig.

SMELTENTHALPIE

Smeltenhamthapie bepaalt in hoge mate de energie opslagdichtheid voor PCM materialen. Voor toepassingen in woningen is een hoge opslagdichtheid, en daarmee een hoge smeltenhamthapie gewenst om het ruimtebeslag tot een minimum te beperken. Voor de nu bekende/veel gebruikte materialen met een smeltemperatuur die geschikt is voor gebruik in de gebouwde omgeving ligt de smeltenhamthapie tussen de 100 – 300 kJ/kg. Doordat sommige materialen een hoger soortelijk gewicht hebben kunnen energiedichtheden tot 0,5 GJ/m³ gehaald worden. Heel veel hogere smeltenhamthapie (orde grootte groter) lijkt, in ieder geval in het gewenste temperatuurbereik voor toepassing in de gebouwde omgeving, een weinig reële wens als er geen fundamentele nieuwe inzichten komen (zie Figuur 3). Materiaalontwikkeling zal zich dan ook met name moeten toeleveren op het optimaal laten functioneren van PCMs in het temperatuurbereik voor de gebouwde omgeving (0 – 60 °C). Daarvoor zijn warmtegeleiding, stabiliteit (m.n. in de vloeibare fase) en minimale hysteresis in de stol/smeltrajecten van groot belang.



Figuur 3 – Schematisch overzicht van de typische smeltenhamthapie als functie van de smeltemperatuur. (BRON: Cabeza et al.⁸, copyright ZAE BAYERN)

WARMTEGELEIDING

Om energie snel in en uit het PCM te transporteren op het moment dat er vraag naar warmte/koude is, is een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt belangrijk. Vaak is PCM verpakt in een container waarbij warmte door de container het PCM bereikt tijdens het smelten. Aan de rand van de container ontstaat dan vloeistof die door convectie relatief snel en makkelijk zijn warmte kan afgeven aan het nog vaste materiaal. Bij het stollingsproces, dus bij het onttrekken van warmte, vormt zich als eerste een vaste laag PCM aan de rand van de container. De lage warmtegeleidingscoëfficiënt van vast PCM zorgt ervoor dat het, met het aangroeien van de vaste PCM laag, steeds lastiger wordt om warmte nog goed uit de container te leiden. Een uitgebreid overzicht van warmtegeleidingsonderzoek is beschreven door Regin *et al.*⁹ Tal van opties zoals vin-structuren, metalen grids en toevoeging van allerlei warmte geleidende materialen aan een PCM zoals metaaldeeltjes of grafiet kunnen gebruikt worden om de thermische geleidbaarheid van het PCM systeem te vergroten. Welke keuze hierin gemaakt wordt hangt in grote mate af van het gekozen PCM en het totale systeemontwerp voor de gewenste toepassing.

HYSTERESE EN ONDERKOELING

Een PCM dat zich ideaal gedraagt heeft gedurende het hele stol/smelttraject een constante temperatuur. In de praktijk gedragen veel PCMs zich op een niet ideale manier waarbij het stol/smelttraject geen isotherm proces is. Veel zouthydraten hebben bijvoorbeeld last van onderkoeling, het duurt even voordat er voldoende kristallen gevormd zijn om het stolproces goed te kunnen faciliteren, daardoor zakt de temperatuur eerst tot onder de smelttemperatuur. Daarnaast vindt er hysteresis plaats, het temperatuurverloop is anders tijdens het stolproces dan tijdens het smeltproces. Dit niet ideale karakter van PCM maakt het soms lastiger om bij een gewenste temperatuur te laden/ontladen. Het kan zijn dat de benodigde temperatuur voor het laden of ontladen een flink aantal graden hoger of lager moet zijn dan de smelttemperatuur waardoor voor veel toepassingen slechts één van de twee processen efficiënt gebeurt. Hoe kleiner de hysteresis en onderkoeling hoe efficiënter het PCM geladen én ontladen kan worden, beiden zijn van essentieel belang voor een succesvolle toepassing. Er zijn verschillende innovatieve methoden om een PCM zich idealer te laten gedragen. Om onderkoeling te voorkomen kan bijvoorbeeld een kleine hoeveelheid van een ander materiaal als startpunt voor kristallisatie worden toegevoegd.

STABILISATIE EN VERPAKKING

Het verpakken van PCM is min of meer onontkoombaar vanwege de fase overgang van een vaste stof naar een vloeistof. De noodzaak van een verpakking is aan de ene kant nadelig, het zorgt voor extra fabricagekosten, hogere kosten en minder thermische opslagcapaciteit. Aan de andere kant kan het ook meerdere nuttige functies vervullen in het systeem, namelijk bescherming van het PCM tegen invloeden van buitenaf, bescherming van de omgeving tegen mogelijk giftige PCM materialen, verbetering van het thermisch transport en het verbeteren van de structurele eigenschappen zoals bijvoorbeeld in bouwelementen nodig is.

Voor de verpakking van PCM wordt onderscheid gemaakt naar grootte van het te verpakken PCM deeltje:

1. Macro; PCM grootte > 1 mm.
2. Micro; PCM grootte 0 – 1000 μm .
3. Nano; PCM grootte 0 – 1000 nm.

De gevolgen voor het functioneren van PCM van de verschillende vormen van PCM verpakking, grootte, geometrie, barrière materiaal, barrière dikte en oppervlakte vs volume verhouding zijn door Salunkhe en Shembekar uitvoerig besproken.¹⁰ In de huidige Tweede Warmtereolutie wordt op dit gebied onderzoek gedaan naar combinaties van nanoverpakking/stabilisatie met macroverpakking. Voor de systeemtoepassingen zijn dit uitermate belangrijke parameters waar komende jaren nog een flinke stap in gezet kan worden ten opzichte van de huidige macroverpakking in prototypes die nu op de markt verschijnen.

SAMENVATTEND

Onderzoek en ontwikkeling van PCM materialen zal zich de komende jaren vooral richten op het toepasbaar maken van de bestaande PCMs in geïntegreerde systemen. Verbetering van de warmtegeleiding, stabilisatie van de vloeibare fase, geschikte verpakking op nano-, micro- en macroniveau en verwerking in verschillende systeemontwerpen zijn de aandachtsgebieden voor onderzoek in de komende jaren.

3.3. SYSTEEMONTWIKKELING

De toepassingsvormen voor PCM zijn van een zeer uiteenlopend karakter. Overal waar de beschikbaarheid van- en de vraag naar warmte niet synchroon lopen in de tijd kan PCM (deels) als warmtebuffer de pieken en dalen opvangen. Dit kan zowel in koeltoepassingen als in verwarmingstoepassingen van nut zijn en bij een breed bereik van temperaturen worden ingezet. Voor toepassing in gebouwde omgeving zijn met name temperaturen rond de 20 – 25 °C voor klimaatregeling in leefruimten en temperaturen rond de 55 – 65 °C voor tapwatervoorziening relevant. Afhankelijk van de warmtevraag en de beschikbaarheid (afhankelijk van klimaatzone, zoninstraling, gewenste verwarmings- en koelingsprofiel) zijn vele systemen denkbaar. Een belangrijke systeemcategorisatie is of het PCM actief dan wel passief wordt geladen/ontladen.

PASSIEVE SYSTEMEN MET PCM

Onder passieve systemen worden de toepassingen van PCM bedoeld waarin, uitsluitend door de aanwezigheid van het PCM, de gewenste bufferwerking wordt bereikt. Om met succes te kunnen worden toegepast, energetisch rendement te hebben en ook op lange termijn te kunnen werken moeten passieve systemen aan een aantal voorwaarden voldoen. Om herhaaldelijke laad-/ontlaadcycli mogelijk te maken moet de omgevingstemperatuur een periodiek karakter hebben en moet er regelmatig een volledige lading en ontlading plaatsvinden. Daarnaast moet de gewenste temperatuur gelijk zijn aan de gemiddelde temperatuur, moet deze zeer dicht bij de smelttemperatuur van het PCM liggen én moet het PCM zich nagenoeg ideaal gedragen met een isotherm stol-/smelttraject.

Het lijstje voorwaarden waaraan moet worden voldaan laat al zien dat het, zeker op langere termijn, nagenoeg onmogelijk is om passieve systemen van toegevoegde waarde te laten zijn en technisch goed te laten werken. Toch is het een terugkerend onderwerp van onderzoek. In het kader van de Roadmap beschouwen we toepassing van PCM in passieve systemen op bovenstaande gronden echter als onvoldoende kansrijk en moet onderzoek zich voornamelijk richten op het toepassen van PCM elementen in actieve systemen. Hierbij kan uiteraard wel geput worden uit het vele onderzoek dat naar PCM in passieve elementen is verricht.

ACTIEVE SYSTEMEN MET PCM

Onder actieve systemen worden alle toepassingen van PCM verstaan waarbij op enig moment het laden of ontladen van PCM onder invloed van een actie mogelijk wordt gemaakt dan wel versneld of vertraagd. In dit soort systemen is het vaak beter mogelijk om asymmetrie in de gewenste temperatuur, de omgeving, hysteresis in het PCM en tal van andere niet ideale parameters te accommoderen. Het is de kunst om hierbij maximaal gebruik te maken van de beschikbare energie, warmte én koude, en gebruik van additionele energie voor klimaatbeheersing in de gebouwde omgeving te minimaliseren. Dit vraagt om uitgekende totaalconcepten waarin verwarming, koeling, ventilatie, zoninstraling en de omgevingstemperatuur maximaal worden geïntegreerd.

3.4. SYSTEEMINTEGRATIE

Onderzoek zal zich de komende jaren in sterke mate toe moeten leggen op het ontwikkelen van totaalconcepten voor klimaatbeheersing waarin het potentieel van PCM maximaal wordt benut om onevenwichtigheden in vraag en aanbod van warmte en koude (energie) te bufferen.

Om vooraf een goed beeld van de prestaties van een bepaald systeemontwerp te kunnen inschatten kan simulatiesoftware met gevalideerde modellen van grote meerwaarde zijn. De praktijk leert dat veel toepassingen van PCM veelbelovend lijken maar de effecten om allerlei praktische/onvoorziene redenen tegen kunnen vallen. Dergelijke simulaties maken het systeemontwikkelp proces inzichtelijk en kunnen dit proces aanzienlijk versnellen.

Enkele potentieel interessante systemen voor prototype-ontwikkeling staan hieronder verder uitgewerkt.

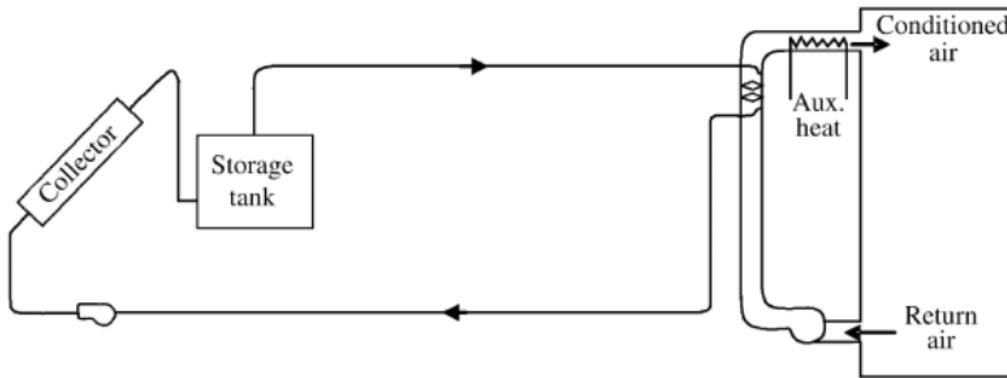
KOELING

Met strengere isolatie-eisen voor nieuwbouw verschuift het energiegebruik steeds meer van verwarmingsbehoefte naar koelbehoefte. Gedurende de zomer, met name in gebouwen met veel ramen (met name oost, zuid en west georiënteerd), kan de binnentemperatuur flink oplopen. Om de koelbehoefte op een duurzame manier in te vullen moet een systeem uit meerdere componenten nauw samenwerken. Het beperken van zoninstraling met zonneschermen is een simpele en effectieve maatregel die samen met een ventilatie systeem al te grote temperatuurstijging binnen moet kunnen voorkomen. Om de toegevoerde lucht verder op een aangename temperatuur te brengen kan deze over PCM geleid worden wat zich bijvoorbeeld in het ventilatiekanaal, het plafond of in een muurdeel bevindt waar de lucht actief langs geleid wordt. Hiermee kan topkoeling, het verlagen van de buitentemperatuur met een paar graden, bereikt worden. Iets wat doorgaans als prettige ervaren wordt dan een vaste binnentemperatuur die veel verder onder de buitentemperatuur ligt. Op het moment dat koeling niet aan de orde is moet een dergelijk systeem de PCM via een bypass kunnen omzeilen.

Om het PCM te regenereren kan 's nachts, als de temperatuur genoeg gedaald is, koude nachtlucht over het PCM gevoerd worden waarmee de overdag opgeslagen warmte afgevoerd wordt. Idealiter wordt een dergelijk systeem interactief en anticipeert het op weersvoorspellingen zodat, op het moment dat de dagen daarna warmtevraag voorspeld wordt, de warmte uit het PCM, via de ventilatielucht, weer beschikbaar komt in het gebouw in plaats van afgevoerd naar buiten. In dat geval moet uitgaande lucht via een warmtewisselaar de ingaande lucht voorverwarmen zodat het warmteverlies minimaal is.

LAGE TEMPERATUUR RUIMTEVERWARMING

Ook voor verwarming van gebouwen kan PCM ingezet worden. Daarbij is het doel om zoveel mogelijk van de ingestraalde energie uit zonlicht aan te wenden voor verwarming. Overdag is de verwarmingsbehoefte vaak laag(er). Een traditionele zonnecollector slaat de warmte op in een watervat maar een opslagtank met PCM kan een interessant alternatief zijn (zie Figuur 4).^{11,12} Systemen met uitsluitend de collector en het opslagvat zouden aangevuld kunnen worden met een warmtepomp die de collector/het opslagvat als bron gebruikt. Op deze manier kan de warmtepomp met een hogere COP (*coëfficiënt of performance*, prestatiecoëfficiënt) opereren. De zonne-energie die op deze manier op een later tijdstip beschikbaar gemaakt kan worden als warmte, kan via een vloerverwarmingssysteem of een luchtverwarmingssysteem worden aangewend voor verwarming van de ruimte.



Figuur 4 – Schematische weergave van een zonnecollector met opslagvat (PCM) die een ruimte via de lucht van warmte voorzien. (BRON: Kaygusuz 1999)

HOGE TEMPERATUUR RUIMTEVERWARMING EN TAPWATERVOORZIENING

De toepassing van PCM's in de woningbouw richt zich enerzijds op de verwarming van de woning anderzijds op het opslaan van energie voor de tapwater voorziening. Door de wens om steeds meer hernieuwbare energie als bron te gebruiken groeit de behoefte aan buffering van deze energie. Voor tapwater is met name de ontladsnelheid van een buffersysteem van belang om aan het comfortniveau voor een douchebeurt te voldoen, een vermogen van rond de 24Kw/h is hiervoor benodigd. Traditioneel wordt hiervoor een boiler vat gebruikt wat vanwege de drukopbouw een ronde vorm heeft. Juist deze vormfactor zorgt ervoor dat inpassing in de bestaande bouw lastig is. Omdat PCM's niet in een drukvat hoeven te zitten is de vormvrijheid naast de hogere opslagdichtheid een groot voordeel.

Een tapwater buffer moet een temperatuur aan het tapwater systeem kunnen leveren van 55°C. Dit is gebaseerd op een comfortvraag enerzijds en een preventieve maatregel ter voorkoming van legionella groei anderzijds. Vanwege de hysteresse van de meeste PCM's zal de laadtemperatuur echter hoger liggen. Daarnaast zal de laadcyclus zich grotendeel op dit temperatuurniveau afspelen omdat juiste de smelenthalpie gebruikt wordt bij een PCM materiaal. Een negatief effect hierbij is dat als de warmteopwekking wordt verzorgd door een warmtepomp de COP van deze warmtepomp daalt doordat er relatief lang op een hoge temperatuur geladen wordt ten opzichte van de traditionele water buffers.

3.5. TECHNISCHE EN ECONOMISCHE ANALYSE

Uiteindelijk moet een systeem ontwikkeld worden dat optimaal gebruik maakt van de (vrij beschikbare) energie en zonder negatieve milieu-impact tegen lage kosten een aangenaam binnenklimaat garandeert. Voor elk systeem dat in dit kader ontworpen wordt zal een degelijke haalbaarheidsstudie plaats moeten vinden waarbij de volgende facetten meegenomen moeten worden.

TECHNOLOGISCHE ANALYSE

Per geïntegreerd systeemontwerp met PCM moet uit een technologische analyse blijken dat deze ook daadwerkelijk de gewenste prestaties levert in termen van gewenste binnenklimaat, tapwatervoorziening en energiebesparing zoals in de use case beschreven is. Gedurende elk ontwikkelproces zal dit een belangrijke check zijn.

LEVENSZYCLUSANALYSE (LCA)

Bij de realisatie van een geïntegreerd systeem met PCM moet gekeken worden naar de milieu-impact van de gekozen materialen en technieken. Dit zal gedaan worden aan de hand van LCA. De

consequenties van materiaalkeuzes worden hiermee inzichtelijk gemaakt over de hele levenscyclus van het product, van de winning van grondstoffen via productie en (her)gebruik tot en met afvalverwerking.

ECONOMISCHE HAALBAARHEID

Uiteindelijk valt of staat een succesvol product met een goede business case voor de eindgebruiker. De economische meerwaarde van een geïntegreerd PCM systeem zal daarom met realistische aannames uitgewerkt moeten worden. Daarbij moet wel nadrukkelijk gekeken worden naar de totale kosten van aanschaf en gebruik over de hele levensduur van het systeem.

3.6. MIJLPALLEN

PCM bevindt zich momenteel in het stadium van marktintroductie. Er zijn verschillende PCMs die reeds commercieel verkrijgbaar zijn. Hiermee hebben verschillende bedrijven in de installatietechniek de eerste prototype materialen reeds ontwikkeld. In de komende jaren zullen daar meer prototype systemen bijkomen en zullen de eerste producten op commerciële schaal geproduceerd gaan worden. In elk van deze nieuwe producten zullen de bestaande issues zoals in deze Roadmap beschreven beter opgelost, beter op elkaar afgestemd en slimmer geïntegreerd moeten worden. Uiteindelijk moet dat leiden tot brede marktintroductie van op PCM gebaseerde systemen waarbij energiebesparingen van 30 - 50% gerealiseerd moeten worden door het PCM, bovenop de toepassing van al dan niet geïntegreerde additionele duurzame technologieën zoals isolatie, inzet van warmtepompen, gebruik van zonne-energie etc.

4. CONCLUSIES

In tegenstelling tot een aantal andere technologieën voor duurzame warmteopslag en warmteconversie, is PCM op een groot aantal terreinen al ver uitontwikkeld. Met commercieel beschikbare PCMs worden op dit moment de eerste commerciële producten gefabriceerd en toegepast. De sleutel voor brede uitrol in de gebouwde omgeving lijkt slimme integratie in totaaloplossingen voor klimaatbeheersing en tapwatervoorziening die aansluiten bij de use case. Het ontwikkelen van dit soort producten, waarbij materiaalverbeteringen, geoptimaliseerde verpakkingstechnieken enz. worden meegenomen moet de inzet van het onderzoek in de komende jaren zijn.

5. REFERENTIES

- ¹ Jegadheeswaran, S., & Pohekar, S. (2009). Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2225-2244.
- ² E., O., de Gracia, A., Castell, A., Farid, M., & Cabeza, L. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 99, 513-533.
- ³ Zhou, D., Zhao, C., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593-605.
- ⁴ Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
- ⁵ Zalba, B., Marín, J., Cabeza, L., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.
- ⁶ Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 327-349.
- ⁷ Tyagi, V., & Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1146-1166.
- ⁸ Cabeza, L., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675-1695.
- ⁹ Regin, A., Solanki, S., & Saini, J. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438-2458.
- ¹⁰ Salunkhe, P., & Shembekar, P. (2012). A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5603-5616.
- ¹¹ Kaygusuz, K. (1999). Investigation of a combined solar-heat pump system for residential heating. Part 1: experimental results. *International Journal of Energy Research*, 23(14), 1213-1223.
- ¹² Kaygusuz, K. (1999). Investigation of a combined solar-heat pump system for residential heating. Part 2: simulation results. *International Journal of Energy Research*, 23(14), 1225-1237.

