

TIJD VOOR EEN NIEUWE FASE?!

Phase Change Materials in de kantoorbouw



Datum inleveren: 21-05-2010
Afstudeerperiode: februari t/m juni 2010
Studenten: Mark Göertz 1537846
Jan-Willem Peterse 1501872
Bedrijf: Kuijpers Installaties Utrecht B.V. te De Meern
Begeleider: A.E.P.F. Scheffer
Opleiding: Hogere Installatie Techniek, Hogeschool Utrecht
1^e begeleider: L. Baart
2^e begeleider: H. Brekelmans

Niet vertrouwelijk

Het bestuur van de Stichting Hogeschool Utrecht te Utrecht aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor schade voortvloeiende uit het gebruik van enig gegeven, hulpmiddel, werkwijze of procedure in dit verslag beschreven. Vermenigvuldiging zonder toestemming van de auteur(s) en de school is niet toegestaan. Indien het afstudeerwerk in een bedrijf is verricht, is voor vermenigvuldiging of overname van tekst uit dit verslag eveneens toestemming van het bedrijf vereist.

Verantwoording

Titel:

Tijd voor een nieuwe fase?! Phase Change Materials in de kantoorbouw.

Status:

Definitief

Datum:

21-05-2010

Auteurs:

Mark Göertz

Jan-Willem Peterse

ID nummer:

Mark Göertz 1537846

Jan-Willem Peterse 1501872

Email adres:

Mgoertz@kuijpers.com

Jpeterse@kuijpers.com

Gecontroleerd door:

Ing. A.E.P.F. Scheffer (projectmanager)

Contact:

Kuijpers Installaties Utrecht B.V.

Damzicht 21, 3454 PS De Meern

Postbus 177, 3454 ZK De Meern

(t) 030-6629300

(f) 030-6629301

@ utrecht@kuijpers.com

www.kuijpers.com

Voorwoord

Deze scriptie ‘Tijd voor een nieuwe fase?!’ komt voort uit een afstudeerproject dat uitgevoerd is ter afsluiting van onze opleiding Hogere Installatie Techniek. De scriptie is geschreven voor Kuijpers Installaties Utrecht B.V. Bij het opstellen is uitgegaan van enige voorkennis van de installatietechniek.

Lezers die geïnteresseerd zijn in de belangrijke ontwerpfactoren van PCM producten, vinden dit in hoofdstuk 4 ‘Ontwerpfactoren’. De behandelde concepten PCM koelbatterij, PCM klimaatplafond en PCM inductie-unit zijn terug te vinden in respectievelijk hoofdstuk 8, 9 en 10. Productinformatie is terug te vinden in de bijlagen.

We zijn dank verschuldigd aan dhr. L. Baart, de 1^e begeleider vanuit de Hogeschool Utrecht en ing. E. Scheffer, de bedrijfsbegeleider vanuit Kuijpers Installaties Utrecht B.V. Daarnaast willen wij dhr. H. Brekelmans, de 2^e begeleider vanuit de Hogeschool Utrecht en de gecommitteerde bedanken. Als laatste gaat onze dank uit naar de bedrijven die informatie en advies hebben verschaft ten behoeve van dit onderzoek.

De Meern, mei 2010

Mark Göertz

Jan-Willem Peterse

Samenvatting

Kuijpers Installaties Utrecht B.V. wil zijn huidige positie in de markt behouden en verder versterken op het gebied van kennis over duurzame technieken. Dit onderzoek is geïnitieerd om ontbrekende kennis over het toepassen van PCM binnen de kantoorbouw op te doen. De hoofdvraag van Kuijpers Installaties Utrecht B.V. is of het toepassen van Phase Change Materials rendabel is binnen de kantoorbouw.

Om antwoord te geven op deze vraag zijn ten eerste de relevante ontwerpfactoren bepaald en onderzocht doormiddel van een literatuurstudie en bedrijfsbezoeken. Hierna zijn drie verschillende concepten onderzocht, te weten: PCM koelbatterij, PCM klimaatplafond, PCM inductie-unit. Dit is gedaan door de concepten theoretisch te simuleren in een referentiekantoor. Als referentiekantoor is het huidige pand van Kuijpers Installaties Utrecht B.V. te De Meern gebruikt. Om uiteindelijk antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag is een kosten-batenanalyse gemaakt.

De kritische ontwerpfactoren bij een PCM toepassing zijn smelttemperatuur, smeltpunt, warmteopslagcapaciteit, brandbaarheid, warmtegeleiding en dichtheid van een PCM. Qua smelttemperatuur, smeltpunt en warmteopslagcapaciteit blijkt geen relevant verschil te zijn tussen paraffine en zouthydraten als PCM. Voor brandbaarheid, warmtegeleiding en dichtheid komen zouthydraten echter als beste naar voren. Technisch zijn alle drie de concepten haalbaar, maar van de drie concepten blijkt de PCM koelbatterij in tegenstelling tot de andere twee concepten financieel niet rendabel.

De conclusie luidt: het toepassen van PCM binnen de kantoorbouw als PCM klimaatplafond of PCM inductie-unit is rendabel. Echter met een laag rendement. Daarnaast zijn er verschillende beperkingen, te weten: lager comfortniveau, beperkte regelbaarheid en lagere bedrijfszekerheid.

Aanbevolen wordt om de theoretisch onderzochte PCM concepten niet op eigen initiatief toe te passen, omdat het lage rendement niet opweegt tegen het lagere comfortniveau, de beperkte regelbaarheid en mindere bedrijfszekerheid. Geadviseerd wordt om te wachten op duidelijke resultaten van de praktijkprestaties.

Conclusie

Het toepassen van PCM binnen de kantoorbouw als PCM klimaatplafond of PCM inductie-unit is rendabel. Echter met een laag rendement. Daarnaast zijn er verschillende beperkingen, te weten: lager comfortniveau, beperkte regelbaarheid en lagere bedrijfszekerheid.

Bij het ontwerpen van PCM producten blijken de volgende factoren van het PCM kritisch: smeltemperatuur, smeltpunt, warmteopslagcapaciteit, brandbaarheid, warmtegeleiding en dichtheid.

In het onderzoek zijn zouthydraten en paraffine onderzocht. Op een aantal punten scoren beide stoffen gelijk, maar op brandbaarheid, warmtegeleiding en dichtheid scoren zouthydraten beter.

PCM's kunnen binnen de uitgangspunten van het referentiekantoor niet worden gebruikt als complete vervanger voor de klimaatinstallatie. Het is wel toepasbaar als koudeafgifte systeem, maar als warmteafgifte systeem is PCM niet toereikend.

De onderzochte systemen PCM klimaatplafond en PCM inductie-unit zijn beide financieel rendabel. Terugverdientijd is niet van toepassing, omdat de investering en exploitatiekosten gelijk zijn aan een conventioneel systeem. Het onderzochte systeem PCM koelbatterij is niet financieel rendabel.

In het referentiekantoor bleek het haalbaar om met een PCM klimaatplafond of PCM inductie-unit een ruimte te koelen. Met de PCM koelbatterij bleek het haalbaar de buitenlucht voor te koelen van 28 °C naar 21 °C.

Gerelateerd aan de binnentemperatuur geeft de PCM inductie-unit het meeste comfort. De binnentemperatuur stijgt niet boven de 24 °C. Het PCM klimaatplafond valt binnen de gewogen temperatuur overschrijdingsuren (GTO-uren) klasse A met minder dan 100 gewogen overschrijdingsuren.

Bij het concept PCM koelbatterij bleek het energieverbruik volgens de simulatie gereduceerd kan worden met 2 %. Bij het concept PCM klimaatplafond bleek het energieverbruik volgens de simulatie, met een PCM-22 (minste GTO-uren) gereduceerd kan worden met 1-7 %. Bij het concept PCM inductie-unit bleek het energieverbruik volgens de simulatie, met een PCM-21 gereduceerd kan worden met 0-5 %. Dit afgezet tegenover een conventionele concept met een koelmachine en ketel als opwekker.

Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om de theoretisch onderzochte PCM concepten niet op eigen initiatief toe te passen, omdat het lage rendement niet opweegt tegen het lagere comfortniveau, de beperkte regelbaarheid en mindere bedrijfszekerheid. Geadviseerd wordt om te wachten op duidelijke resultaten van de praktijkprestaties.

Om inzicht te krijgen in de praktijkprestaties dient er als vervolg onderzoek een studie gedaan te worden naar de praktijkresultaten waarin deze worden verzameld, geanalyseerd en beoordeeld.

Daarnaast wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar PCM als toevoeging aan een conventionele installatie, dus niet als vervanger. Om inzicht te krijgen in het energetisch- en financieel rendement.

Inhoudsopgave

Verantwoording.....	3
Voorwoord	5
Samenvatting	7
Conclusie.....	9
Aanbevelingen	11
Inhoudsopgave.....	13
Symbolen/afkortingen.....	15
1 Inleiding.....	17
2 Opslag van thermische energie	19
2.1 Thermische energie	20
2.2 Smeltwarmte	21
3 Phase Change Materials.....	23
3.1 Organische materialen.....	23
3.2 Anorganische materialen	25
4 Ontwerpfactoren	27
4.1 Smelten en stollen	27
4.2 Bereik van PCM's	29
4.3 Warmtecapaciteit.....	29
4.4 Reproduceerbaarheid	30
4.5 Warmteoverdracht.....	31
4.6 Dichtheid.....	33
4.7 pH waarde	34
4.8 Onderkoeling.....	34
4.9 Volumeverandering	35
4.10 Chemische stabiliteit en compatibiliteit.....	36
4.11 Brandbaarheid	37
4.12 Inkapseling.....	38
4.13 Kosten.....	39
4.14 Afdanken.....	40
4.15 Subsidie	41
4.16 Energieprijzen.....	41
4.17 Overzicht ontwerpfactoren	42
5 PCM in het algemeen als kantoorinstallatie	45

5.1	Waarom PCM?	45
5.2	Van de huidige naar de beoogde situatie met PCM	45
5.3	Huidige situatie zonder PCM	46
5.4	Beoogde situatie met PCM	48
5.5	Hoe kantoren koelen en verwarmen	49
5.6	PCM toepassingen in kantoren	50
6	Uitgangspunten referentiekantoorpand	53
6.1	Verwarming	53
6.2	Ventilatie	54
6.3	Koeling	54
6.4	Uitkomst berekeningen	55
7	PCM concepten	57
8	Concept: PCM koelbatterij	59
8.1	Werking concept	59
8.2	Dimensioneren	62
8.3	Simulatie	63
8.4	Kosten-batenanalyse	66
8.5	Voor- en nadelen	69
8.6	Conclusie PCM koelbatterij	70
9	Concept: PCM klimaatplafond	71
9.1	Werking concept	71
9.2	Dimensioneren	72
9.3	Simulatie PCM klimaatplafond	75
9.4	Kosten-batenanalyse	84
9.5	Voor- en nadelen	90
9.6	Conclusie PCM klimaatplafond	91
10	Concept: PCM inductie-unit	93
10.1	Werking concept	93
10.2	Dimensioneren	94
10.3	Simulatie PCM inductie-unit	96
10.4	Kosten-batenanalyse	105
10.5	Voor- en nadelen	110
10.6	Conclusie PCM inductie-unit	111
	Literatuurlijst	113
	Figuur- en tabellijst	115
	Bijlagen	117

Symbolen/afkortingen

ΔH	Enthalpieverandering	J/kg	C2C	Cradle to cradle
ΔQ	Verandering in warmte-inhoud	J		(afval=voedsel)
ΔT	Temperatuursverschil	K	COP	Coëfficiënt of Performance
A	Oppervlakte	m ²		(prestatiecoëfficiënt)
b	Breedte	m	Figuur	Figuur
c	Specifieke warmtecapaciteit	J/kg·K	GTO	Gewogen temperatuuroverschrijdingsuren
C	Warmtecapaciteit	J/K	HR	Hoog rendement
d	Dikte	m	ISSO	Kennisinstituut voor de installatiesector
$\mathcal{E}$	Emissiecoëfficiënt	-	kWh	Kilowattuur
h	Hoogte	m	kWh(e)	Kilowattuur elektrisch
I	Inhoud	m ³	LAP	Landelijke afvalbeheerplan
l	Lengte	m	LAP2	Landelijke afvalbeheerplan 2
m	Massa	kg	LTV	Lage temperatuur verwarming
P	Vermogen	J/s	NEN	Nederlandse Norm
q	Debiet	m ³ /s	PCM	Phase Change Materials
Q	Warmte	J		(fase transformatie materialen)
T	Temperatuur	°C	pH	Zuurgraad
t	Tijd	s		(Potentia hydrogenii)
U	Warmtedoorgangcoëfficiënt	J/m ² ·K	PMV	Predicted Mean Vote
α	Warmteoverdrachtcoëfficiënt	W/m ² ·K		(voorspelde negatieve stemmen)
λ	Warmtegeleidingcoëfficiënt	W/m·K	PP	Polipropyleen (kunststof)
ρ	(Soortelijke) Dichtheid	kg/m ³	RAL	ReichsAusschuss für Lieferbedingungen
σ	Constante van Stefan-Boltzmann	W/m ⁻² ·K ⁻⁴		(rijkscomité voor verkoopvoorwaarde)
			Tabel	Tabel
			TO	Temperatuuroverschrijving
			TVT	Terugverdiëntijd
			VABI	Vereniging voor Automatisering in de Bouw en installatietechniek
			ZTA	Zontoetredingsfactor

1 Inleiding

Kuijpers Installaties Utrecht B.V. wil zijn huidige positie in de markt behouden en verder versterken op het gebied van kennis over duurzame technieken. Dit onderzoek is geïnitieerd om ontbrekende kennis over het toepassen van PCM binnen de kantoorbouw op te doen.

De vraag die in deze scriptie wordt beantwoord luidt:

‘Is het toepassen van PCM binnen de kantoorbouw rendabel?’

Het is hierbij de doelstelling om Kuijpers Installaties Utrecht B.V. inzicht te geven in de werking van PCM, de mogelijke toepassing binnen de kantoorbouw en of dit tot energiebesparing leidt.

Hiervoor is begonnen met een algemeen onderzoek naar de eigenschappen van PCM en welke soort PCM het meest geschikt is voor de gewenste toepassing. Dit is gedaan middels een literatuurstudie en bedrijfsbezoeken. Daarna is onderzoek gedaan naar de algemene werking en toepassingen van PCM binnen de kantoorbouw. Om inzicht te krijgen in de mogelijkheden en beperkingen is voor drie concepten de werking onderzocht en deze gesimuleerd. Deze zijn uitgevoerd door gebruik te maken van een referentiekantoor, te weten: het kantoorpand van Kuijpers Installaties Utrecht B.V. te De Meern. Nadat de effecten duidelijk zijn geworden uit de simulaties is het mogelijk om kosten-batenanalyses te maken.

Om het onderzoek af te bakenen is gekozen om de volgende randvoorwaarden te hanteren: het gaat om toepassing van PCM in Nederland binnen de kantoorbouw ten behoeve van koelen en/of verwarmen. Er wordt ingegaan op het ontwerpniveau. Het eigenschappenonderzoek is gericht op de twee meest voorkomend PCM's, zouthydraten en paraffine. Voor het onderzoek is gekozen voor drie concepten, te weten: PCM klimaatplafond, PCM inductie-unit en PCM koelbatterij. De uitgebreide afbakening is weergegeven op de volgende pagina.

Om inzicht te geven in opslag van thermische energie wordt dit in hoofdstuk 2 behandeld. Daarna wordt in hoofdstuk 3 onderscheid gemaakt tussen de verschillende PCM's en haar eigenschappen. Relevante ontwerpfactoren die nodig zijn om inzicht te verschaffen in welke factoren een rol spelen bij het toepassen van PCM's komen aan bod in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 komt de algemene werking van PCM als klimaatinstallatie aan bod. De uitgangspunten van het referentiekantoorpand zijn gegeven in hoofdstuk 6. Daarna komen in hoofdstuk 7 t/m 10 de verschillende concepten aan bod, waarvan ter afsluiting van ieder hoofdstuk een conclusie wordt getrokken. Extra informatie is gegeven in de bijlagen.

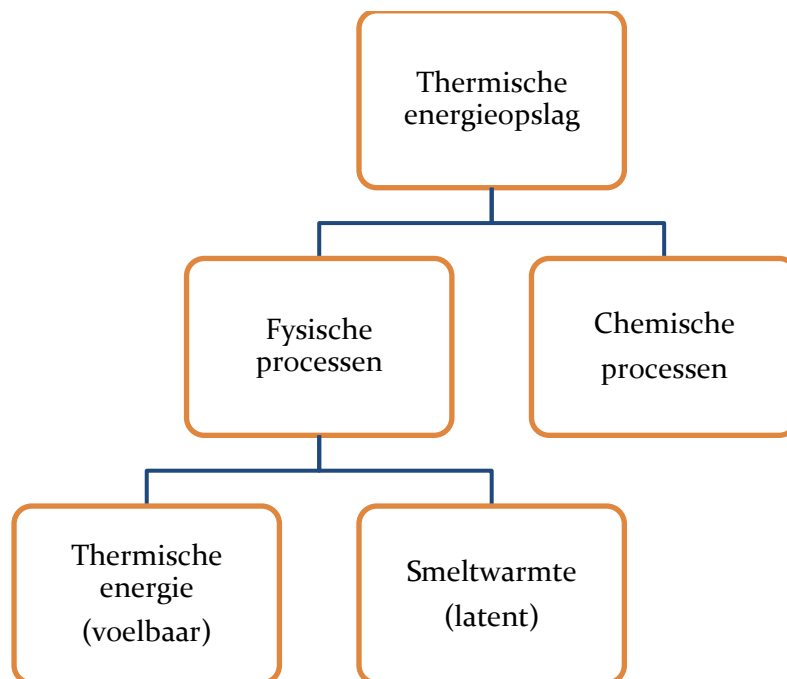
Afbakening

Om het onderzoek haalbaar, acceptabel en uitvoerbaar te maken is gekozen voor de volgende afbakeningen:

- PCM toepassingen ten behoeve van koeling en/of verwarming;
- PCM toepassingen ten behoeve van gebouwgebonden installaties;
- PCM toepassingen binnen de kantoorbouw;
- PCM toepassingen binnen Nederland;
- PCM toepassingen ten behoeve van de nieuwbouw;
- onderzoek vindt plaats op ontwerpniveau;
- drie toepassingen van PCM worden onderzocht, te weten:
 - PCM koelbatterij
 - PCM klimaatplafond
 - PCM inductie-unit
- uitgangspunten referentiekantoor volgens hoofdstuk 6;
- simulatie volgens uitgangspunten vermeld in hoofdstuk 7;
- PCM toepassing als vervanger van conventionele installatie;
- opbouw volgens *[literatuurbron:1]*;
- onderzoeken uitgewerkt volgens afstudeerhandleiding *[literatuurbron:2]*;
- de aggregatietoestandverandering smelten/stollen;
- paraffine en zouthydraten als PCM;
- simulaties in MS Excel;
- als variabele kosten wordt er in de kosten-batenanalyse gerekend met verwarming, koeling- en ventilatiekosten.

2 Opslag van thermische energie

Thermische energieopslag, ook wel warmte koude opslag genoemd, maakt het mogelijk warmte of koude voor een bepaalde tijd op te slaan zodat deze later weer gebruikt kan worden. Om van de opgeslagen warmte of koude later weer gebruik te maken, dient de opslag omkeerbaar te zijn. In figuur 2.0 zijn verschillende vormen van thermische energieopslag onderverdeeld.

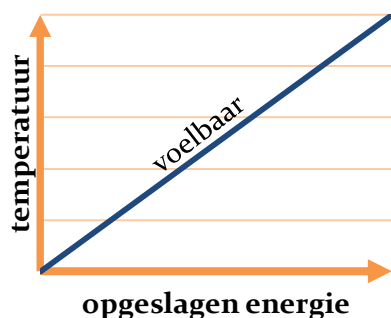


Figuur 2.0: Overzicht mogelijkheden voor thermische energieopslag

In deze scriptie wordt ingegaan op de fysische processen, die bestaan uit voelbare- en latente warmte.

2.1 Thermische energie

Bij het opslaan van thermische energie, wordt meestal gebruik gemaakt van voelbare warmte. Een boiler is hier een goed en bekend voorbeeld van. Het toevoeren van voelbare warmte aan een materiaal, doet de temperatuur van dit materiaal stijgen. De stijgende temperatuur door het toevoeren van warmte is weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1: Opgeslagen voelbare energie

De hoeveelheid warmte (ΔQ) die opgeslagen wordt door een verandering in de temperatuur (ΔT) wordt uitgedrukt in warmtecapaciteit (C).

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot \Delta T$$

De warmtecapaciteit wordt ook wel weergegeven in de energie die nodig is om een kg, m³ of mol, 1 K op te warmen. Dit wordt de specifieke warmtecapaciteit (c) genoemd. Als voorbeeld zijn in tabel 2.0 specifieke warmtecapaciteiten van materialen gegeven die gebruikt worden binnen de installatietechniek.

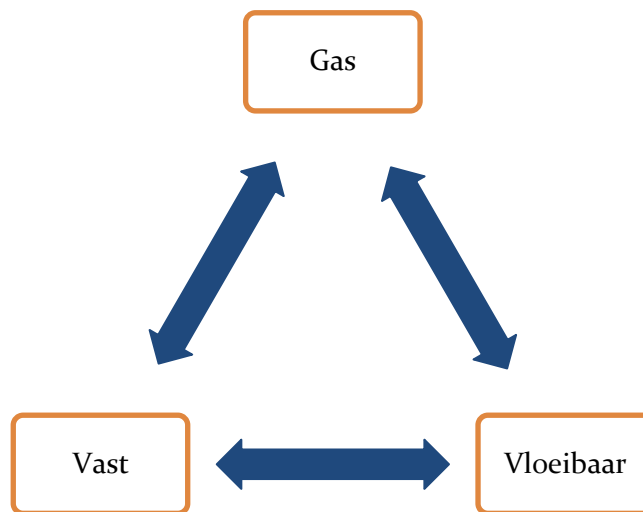
Materiaal	Warmtecapaciteit (kJ/kg·K)
Aluminium	0,9
Ijzer	0,4
Paraffine	2,7
Water	4,2
Zouthydraat	2,0

Tabel 2.0: Warmtecapaciteiten verschillende materialen

2.2 Smeltwarmte

Naast voelbare warmte is het ook mogelijk om latente warmte in een materiaal op te slaan. In deze paragraaf wordt uitgelegd wat latente warmte inhoudt. Dit is van belang om het vervolg van de scriptie goed te begrijpen.

Bij het opslaan van latente warmte verandert een materiaal van aggregatietoestand. Bestaande aggregatietoestanden worden weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.2: Aggregatietoestanden

In deze scriptie wordt ingegaan op de overgang tussen vast en vloeibaar, dit noemen we smelten en stollen. Door deze verandering van aggregatietoestand is het mogelijk een grote hoeveelheid energie op te slaan in een materiaal, zonder dat de temperatuur hiervan verandert. De temperatuur die tijdens deze verandering heerst, wordt de smelttemperatuur genoemd. Een uitgewerkt voorbeeld laat zien wat met een grote hoeveelheid energie bedoeld wordt.

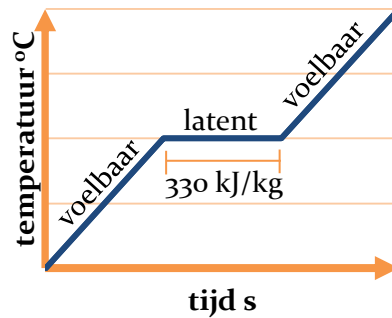
Gegeven:

Smeltwarmte van water = 330 kJ/kg

Specifieke warmtecapaciteit van water in vloeibare vorm = 4,2 kJ/kg·K

Dit betekent dat 330 kJ energie nodig is om 1 kg ijs volledig te laten smelten. Met deze energie is het mogelijk water $\frac{330 \text{ kJ/kg}}{4,2 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}} = 78,5 \text{ K}$ te verwarmen. Samengevat is de energie die nodig is om ijs in water om te zetten gelijk aan de energie die nodig is om water van 0 °C op te warmen naar 78,5 °C.

In figuur 2.3 is duidelijk te zien dat de temperatuur niet oploopt tijdens het opslaan op latente energie.



Figuur 2.3: Afkoelkromme

Nadat de verandering van aggregatietoestand volledig heeft plaats gevonden, dus als er 100% vloeistof of 100% vaste stof aanwezig is, wordt alleen nog voelbare warmte toegevoerd of afgevoerd.

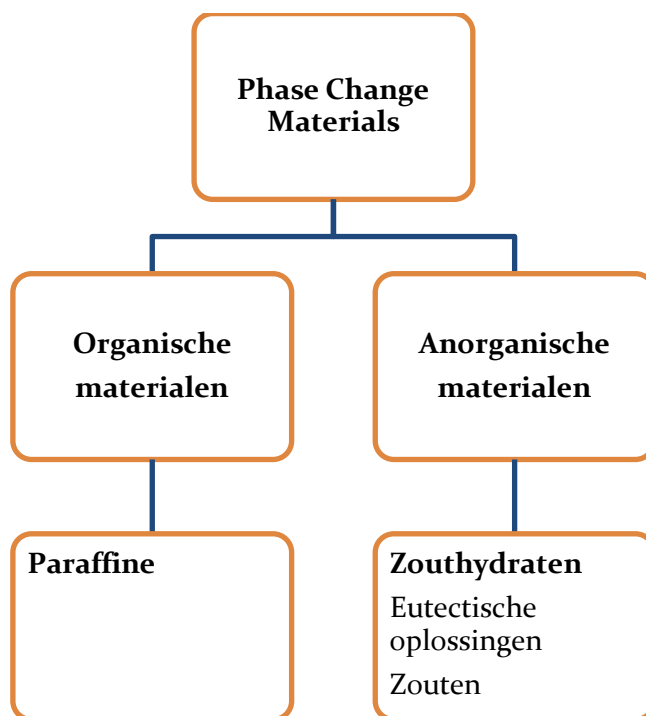
De hoeveelheid energie (ΔQ) die opgeslagen wordt door een verandering van aggregatietoestand wordt uitgedrukt in enthalpieverandering.

$$\Delta Q = m \cdot \Delta H$$

Materialen met een vast-vloeibaar overgang die gebruikt worden voor warmte- en koude opslag worden 'Phase Change Materials' (PCM) genoemd.

3 Phase Change Materials

Phase Change Materials worden opgedeeld volgens figuur 3.0. In deze scriptie wordt ingegaan op paraffine en zouthydraten.



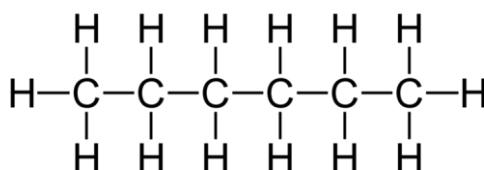
Figuur 3.0: Overzicht Phase Change Materials

3.1 Organische materialen

Organische materialen zijn chemische verbindingen die altijd koolstofatomen bevatten en meestal ook waterstofatomen. Deze naam is afkomstig van het feit dat deze moleculen in levende wezens voorkomen.

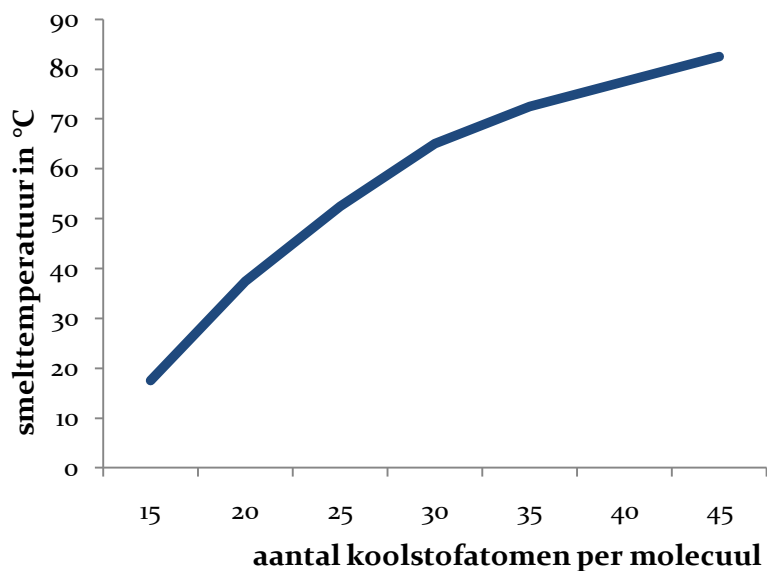
Paraffine

In de installatietechniek is paraffine de meest voorkomende organische PCM. Paraffine is een alkaan, dit is een eenvoudige koolwaterstof met de algemene formule C_nH_{2n+2} [internetbron:1]. In figuur 3.1 is de structuur van een alkaan weergegeven.



Figuur 3.1: Structuur alkaan [internetbron:2]

Het aantal C-atomen is bepalend voor de smelttemperatuur van de paraffine. In figuur 3.2 is dit quasi lineaire verband duidelijk zichtbaar.



Figuur 3.2: Verband smelttemperatuur en aantal koolstofatomen bij paraffine [literatuurbron:3]

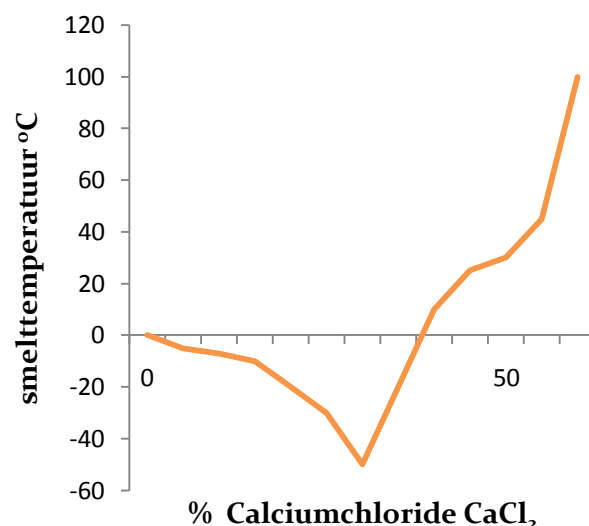
Volgens de datasheets uit [internetbron:3] heeft paraffine een smelttraject van 3-5 K. Dit houdt in dat de temperatuur tijdens het smelten niet gelijk is, maar verandert.

3.2 Anorganische materialen

Anorganische materialen zoals mineralen, zouten, metalen maar ook water bevatten geen koolstofatomen. In de installatietechniek zijn zouthydraten de meest voorkomende PCM. Dit omdat de smelttemperatuur van zouthydraten in het benodigde werkgebied ligt van 15 -25 °C.

Zouthydraten

Een zouthydraat is een zout dat water op kan nemen in zijn ionenrooster. Het opgenomen water in het ionenrooster wordt kristalwater genoemd. De hoeveelheid kristalwater dat een zouthydraat opneemt hangt af van de temperatuur en de vochtigheid van de omgeving. Bij verhoging van de temperatuur verliest het zouthydraat geleidelijk kristalwater totdat uiteindelijk watervrij zout overblijft. In figuur 3.3 is te zien, hoe voor een calciumchloride CaCl_2 mengsel het smeltpunt afhankelijk is van de hoeveelheid (kristal)water. Zouthydraten hebben een smelttraject van 1-2 K [internetbron:4].



Figuur 3.3: Smeltdiagram $\text{CaCl}_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ [internetbron:5]

4 Ontwerpfactoren

Om inzicht te geven in welke factoren een relevante rol spelen en op welke manier, voor het ontwerpen en selecteren van PCM's, is een literatuurstudie gedaan naar de belangrijke ontwerpfactoren.

In tabel 4.0 zijn de ontwerpfactoren weergegeven die een rol spelen bij het selecteren en ontwerpen van een PCM toepassing. In paragraaf 4.1 tot met 4.16 wordt op deze punten verder ingegaan.

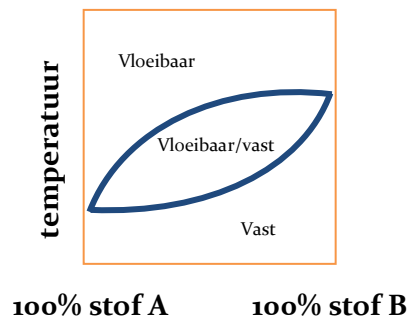
<u>Ontwerpfactoren</u>		
Fysisch	Technisch	Economisch
Dichtheid	Brandbaarheid	Afdanken
Opslagcapaciteit	Chemische stabiliteit	Energieprijs
pH	Compatibiliteit	Kosten
Reproduceerbaarheid	Inkapseling	Subsidies
Smelten/stollen	Uitzettingsgraad	
Onderkoeling	Veiligheidsvoorschriften	
Warmteoverdracht		

Tabel 4.0: Ontwerpfactoren

4.1 Smelten en stollen

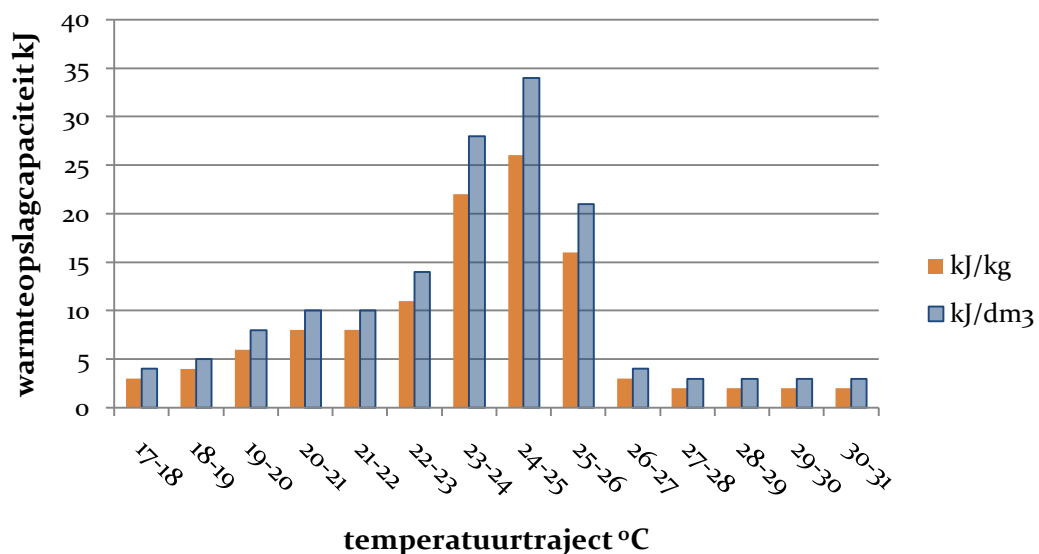
Om de juiste PCM te kiezen voor een bepaalde toepassing is het belangrijk om op de smeltemperatuur van de PCM te letten. Zoals eerder al is behandeld, werkt warmte en koude opslag met PCM's op basis van een aggregatieovergang. Een aggregatieovergang begint bij de smeltemperatuur van een materiaal en eindigt bij dezelfde temperatuur wanneer al het materiaal van aggregatietoestand is veranderd.

In de praktijk blijkt dat PCM's geen vast smeltpunt hebben, omdat het geen zuivere stoffen zijn. Een samenstelling van meerdere stoffen heeft altijd een smelttraject in plaats van een smeltpunt, omdat iedere stof een eigen smeltemperatuur heeft. Dit is duidelijk te zien in figuur 4.0 waar een fasediagram aangeeft hoe de samenstelling van stoffen het smeltpunt/traject beïnvloedt.



Figuur 4.0: Fasediagram

In figuur 4.1 is te zien dat het PCM over een breed temperatuurtraject warmte opneemt, maar op een bepaald traject een piek vertoont in de specifieke warmtecapaciteit. Dit punt waar de meeste warmte wordt opgenomen, is het punt dat fabrikanten als smelttemperatuur opgeven. Tevens is in figuur 4.1 de warmteopslagcapaciteit over een bepaald temperatuurtraject weergegeven van een PCM. In dit geval is 24 °C als smelttemperatuur opgegeven.



Figuur 4.1: Opslagcapaciteit Thermusol HD28CCE [literatuurbron:4]

Aangezien PCM's uit mengsels bestaan hebben zij geen smeltpunt maar een smelttraject afhankelijk van de samenstelling.

4.2 Bereik van PCM's

In principe is ieder materiaal een PCM, maar deze zijn lang niet allemaal geschikt voor warmte en koude opslag zoals die gebruikt wordt in de installatietechniek. Vaak bepaald alleen de smelttemperatuur al of de PCM geschikt is voor een bepaalde toepassing. In deze scriptie wordt daarom ingegaan op de PCM's die voor kantoorinstallaties qua temperatuur interessant zijn.

Tabel 4.1 geeft de onderverdeling van verschillende PCM's weer op basis van de smelttemperatuur [literatuurbron:5].

Smelttemperatuur bereik	PCM
$< 0^{\circ}\text{C}$	eutectische water-zout oplossingen
$5^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$	zouthydraten en paraffine
$> 150^{\circ}\text{C}$	zouten

Tabel 4.1: Overzicht smelttemperatuur verschillende PCM's

Qua bereik komen zouthydraten en paraffine in aanmerking om toegepast te worden binnen de installatietechniek.

4.3 Warmtecapaciteit

De warmtecapaciteit wordt uitgedrukt in een hoeveelheid opgeslagen warmte ten gevolge van een temperatuurverandering. Meestal wordt de warmtecapaciteit uitgedrukt in de hoeveelheid energie die nodig is om een bepaalde hoeveelheid 1 K op te verwarmen of te koelen bij een gelijke druk en volume.

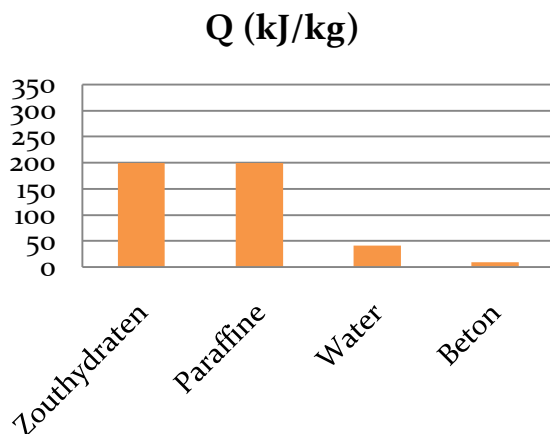
Warmtecapaciteit wordt op drie verschillende manieren uitgedrukt, te weten:

- per volume $\text{J/m}^3\cdot\text{K}$
- per gewicht $\text{J/kg}\cdot\text{K}$
- per molair $\text{J/mol}\cdot\text{K}$

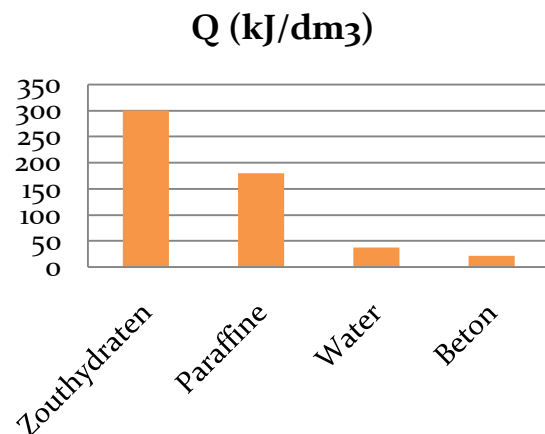
Daarnaast is er de warmtecapaciteit ten gevolge van de verandering van aggregatietoestand (latente warmte). Hier wordt de energie bedoeld die benodigd is om een materiaal volledig van aggregatietoestand te laten veranderen bij een constante druk en volume. Dit laatste is het meest relevant voor PCM's, aangezien deze gebruik maken van de latente warmte in het

gewenste werkgebied. Met het werkgebied wordt het temperatuurgebied bedoeld, waarmee men te maken heeft bij het in temperatuur regelen van kantoren. Voor klimaatinstallaties is dit werkgebied te stellen op 15-25 °C.

In figuur 4.2 en figuur 4.3 wordt de warmtecapaciteit (in het werkgebied 15-25 °C) van paraffine en zouthydraten vergeleken met enkele in de gebouwde omgeving voorkomende stoffen.



Figuur 4.2: Warmtecapaciteit per kg



Figuur 4.3: Warmtecapaciteit per dm³

PCM's hebben, mits de smelttemperatuur in het werkgebied ligt, een hogere warmtecapaciteit dan standaard bouwmaterialen.

4.4 Reproduceerbaarheid

Reproduceerbaarheid, ook wel cycli stabiliteit genoemd, wil zeggen hoe vaak het materiaal van fase kan veranderen. Voor de warmte en koude opslag loopt dit op tot duizenden keren. Er mag van worden uitgegaan dat voor de warmte en koude opslag in een gebouw maximaal 365 cycli per jaar gedraaid worden, maximaal één cyclus per dag.

Een probleem dat zich voordoet bij een samenstelling van verschillende stoffen, is segregatie. Segregatie is ontmenging, waardoor de verschillende stoffen uit het mengsel los naast elkaar gaan bestaan. Een mengsel smelt volgens een smelttraject, maar zodra dit uit elkaar valt ontstaan verschillende samenstellingen met ieder hun eigen smelttraject.

Met betrekking tot PCM's heeft de RAL (Duitse rijkscomité voor verkoopvoorwaarde) een richtlijn [internetbron:6] opgesteld waarin PCM's in verschillende klassen worden opgedeeld. De klassen zijn weergegeven in tabel 4.2.

Klasse	Aantal cycli
A	10000
B	5000
C	1000
D	500
E	100
F	50

Tabel 4.2: Klassen PCM's

Een PCM wordt volgens de RAL richtlijn afgekeurd als het voldoet aan één of meer van de volgende criteria:

- enthalpieverandering >10 %
- temperatuurafwijking >1 K
- massawijziging >3 %

De complete richtlijn is te vinden in **bijlage C**.

Reproduceerbaarheid is belangrijk voor de werking van een PCM. Vallen mengsels uiteen in verschillende nieuwe samenstellingen dan veranderen ook de smelttrajecten waardoor deze eventueel niet meer binnen het gewenste werkgebied vallen. Dit is tegen te gaan door middel van mixen, verdikken of door het toevoegen van een geleermiddel.

4.5 Warmteoverdracht

Warmteoverdracht komt voor in drie vormen, te weten:

- Geleiding (conductie): Dit is de warmteoverdracht binnen een stof die van de warme naar de koude delen stroomt door het verschil in temperatuur.
- Straling (radiatie): Dit is warmteoverdracht tussen twee objecten zonder dat deze in contact staan met elkaar. De objecten maken geen gebruik van een tussenmedium. Door middel van elektromagnetische straling die van het warme naar het koude object straalt wordt de energie overgedragen.

- **Stroming (convectie):** Dit is warmteoverdracht die wordt veroorzaakt door verplaatsing van een gas of vloeistof.

Bij al deze vormen van warmteoverdracht is de drijvende kracht een temperatuursvereffening tussen twee stoffen en/of objecten.

Theoretische formules [literatuurbron:6]

Algemene formule voor warmtestroom:

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T$$

De verschillende vormen van warmteoverdracht worden beschreven door de volgende formules:

Conductie	$Q = A \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T$
Radiatie	$Q = A \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_2^4 - T_1^4)$
Convectie	$Q = A \cdot \alpha \cdot \Delta T$
Warmtedoorgangscoefficiënt	$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}}$

Gegevens

Emissiecoëfficiënt (ε) [literatuurbron:6]

Absoluut zwart voorwerp	1
Aluminium, gepolijst	0,04
Emaillak, radiatorlak	0,9
Beton, baksteen	0,95

Warmtegeleidingcoëfficiënt (λ) W/m·K [literatuurbron:6]

Water	0,60
Polipropyleen (PP)	0,22-0,24
Aluminium	240
Paraffine	0,18
Zouthydraten	0,57

Warmteoverdracht convectie (α) W/m²·K [literatuurbron:5]

Gas, vrije convectie	2-25
Gas, gedwongen convectie	25-250
Vloeistof, vrije convectie	10-1000
Vloeistof, gedwongen convectie	50-20000

(voor meer gegevens zie **bijlagen D en E**)

Toegepast op PCM in de kantoorbouw

De rol van warmteoverdracht is afhankelijk van snelheid waarmee de energie uitgewisseld dient te worden. Veel processen binnen de installatietechniek zijn gebaseerd op vrije of licht gedwongen convectie waardoor de warmteoverdracht factor daarvan bepalend is en de overige factoren van ondergeschikt belang zijn.

Theoretische formules zijn uitstekend bruikbaar om de orde van grootte van bepaalde factoren te bepalen. Hier uit blijkt dat voor PCM's binnen de installatietechniek de geleidingsweerstand van ondergeschikt belang is.

4.6 Dichtheid

De dichtheid van een materiaal geeft aan hoeveel kg zich bevindt in een m³ van dat materiaal, de eenheid is dan ook kg/m³. Dit is onder andere van belang bij het bepalen van het benodigde volume voor de opslag van energie. Onderstaande vergelijking geeft aan wat het verschil in dichtheid is tussen twee soorten PCM's. De eenheid kg/dm³ wordt gebruikt om op bruikbare waardes uit te komen [literatuurbron:5].

Zouthydraten	= 1,5 kg/dm ³
Paraffine	= 0,8 kg/dm ³

Uit dit voorbeeld blijkt dat het verschil in dichtheid er voor zorgt dat bij een gelijke warmtecapaciteit per dm³ 47 % minder volume nodig is als zouthydraten gebruikt worden in plaats van paraffine, voor de opslag van dezelfde hoeveelheid warmte.

4.7 pH waarde

De pH of zuurgraad is een manier om aan te geven of water zuur, neutraal of basisch is. Zijn in het water meer (H⁺)ionen of positief geladen waterstofionen dan (OH⁻)ionen of negatief geladen hydroxide ionen dan is het water zuur (pH tussen 1 en 7). Zijn er echter meer (OH⁻)ionen dan (H⁺)ionen dan is het water basisch of alkalisch (pH tussen 7 en 14). De waarde wordt weergegeven op een schaal van 0 tot 14 en is een dimensieloos getal. De waarde 7 staat voor een neutrale stof, een waarde die geldt voor zuiver water. De pH waarde is een logaritmische waarde, wat inhoudt dat als iets 10x zuurder is, de pH waarde met één eenheid daalt. Is iets 100x zuurder, dan daalt de pH waarde met twee eenheden.

In formulevorm ziet de pH waarde er als volgt uit: *[internetbron:7]*

$$pH = -\log [H_3O^+]$$

Het is belangrijk om te weten hoe zuur of basisch een stof is. Beide zijn in bepaalde gevallen schadelijk voor de mens. Volgens de EU-richtlijnen voor chemische stoffen is een waarde <2 of >11,5 een indicatie voor eventuele gevaren voor de gezondheid.

Een overzicht om inzicht te geven in wat zuur of basisch is staat in **bijlage F**.

Bij elk product dient een veiligheidskaart afgeleverd te worden, waarop de gevarenklasse staat gegeven. Een afnemer kan dan inschatten of het bij gebruik schadelijk kan zijn.

4.8 Onderkoeling

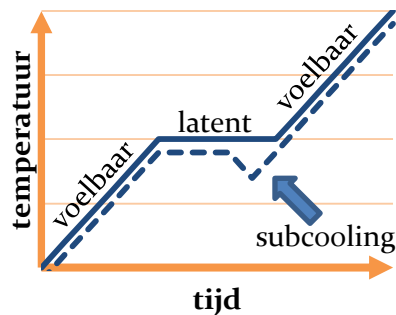
Onderkoeling, ook wel subcooling genoemd, is wanneer de temperatuur onder de aangegeven smelttemperatuur van een materiaal daalt voordat dit materiaal daadwerkelijk begint te stollen/kristalliseren. Het is gewenst om een zo klein mogelijke subcooling te hebben, om er voor te zorgen dat het smelten en stollen op een zo klein mogelijk werkgebied plaatsvindt.

Subcooling vindt alleen plaats als het materiaal nog voor 100 % vloeibaar is. Het heeft dan nog geen vaste deeltjes, nucleus (ook wel startkristal) genoemd, waar het op gaat kristalliseren. 'Nucleus' komt van het woord 'Nucleatie' wat 'het worden van een kern' betekent. Een manier waarop subcooling deels tegen gegaan wordt, is heterogene nucleatie.

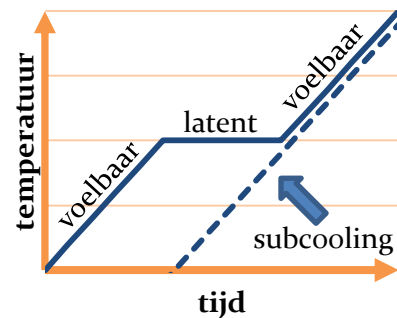
Heterogene nucleatie

Bij heterogene nucleatie worden aan een PCM andere deeltjes met een hogere smelttemperatuur toegevoegd. Als het PCM volledig gesmolten is zijn deze toegevoegde deeltjes door hun hogere smelttemperatuur nog niet gesmolten. Deze deeltjes fungeren als startkristal waarop het PCM kan kristalliseren.

In figuur 4.4 en figuur 4.5 is het verschil tussen subcooling met en zonder nucleatie weergegeven. De doorgetrokken lijn geeft het smeltverloop en de onderbroken lijn geeft het stolverloop weer.



Figuur 4.4: Subcooling met nucleatie



Figuur 4.5: Subcooling zonder nucleatie

Subcooling wordt door middel van heterogene nucleatie beperkt tot 1 á 2 K waardoor het geen probleem hoeft te betekenen voor toepassing binnen de installatietechniek.

4.9 Volumeverandering

Bij het stollen of smelten van een materiaal verandert de dichtheid. De meeste materialen krimpen tijdens het stollingsproces, zo ook de PCM's waar in deze scriptie over gesproken wordt. Water is een uitzondering op voorgaande regel en zet tijdens het stollingsproces uit.

Paraffine

Vast	0,9 kg/dm ³
Vloeibaar	0,8 kg/dm ³
Volumeverandering	11 %

Zouthydraat

Vast	1,7 kg/dm ³
Vloeibaar	1,5 kg/dm ³
volumeverandering	12 %

In de literatuur [literatuurbron:5] is gegeven dat zouthydraten en paraffine een volumeverandering van circa 10 % veroorzaken. Dit komt als snelle rekenwaarde in de buurt van de uitzetting die in deze paragraaf berekend is.

Duidelijk is dat beide PCM's uitzetten als zij smelten en krimpen tijdens het stollen. Het is belangrijk dat hier tijdens het ontwerpen van een product rekening mee wordt gehouden. Het mag duidelijk zijn dat de uitzetting belangrijk is bij het ontwerpen van een verpakking voor de PCM, deze moet uiteraard op het grootste volume gedimensioneerd zijn.

4.10 Chemische stabiliteit en compatibiliteit

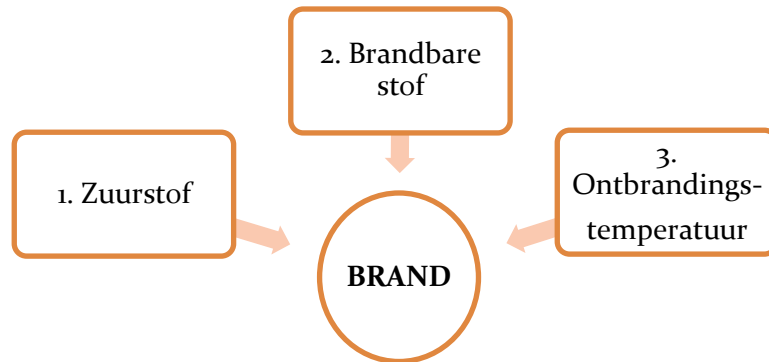
Chemisch stabiel wil zeggen dat het materiaal geen reactie aan gaat met andere stoffen, bijvoorbeeld oxidatie. Hierdoor verandert de samenstelling en is de warmtecapaciteit niet meer gelijk. Het zorgt dan kortweg voor een onbetrouwbare werking.

Daarom is het belangrijk om de juiste keuze tussen materialen te maken als PCM's worden ingekapseld. Aan de ene kant wil men een 'verpakkingsmateriaal' met een hoge warmtegeleiding, maar aan de andere kant ook een materiaal dat niet aangetast wordt door het PCM (met lekkage als gevolg). Een voorbeeld hiervan is corrosie. Er bestaan materialen die met PCM's geen reactie aan gaan, een deel daarvan is duur. Daarom dient een afweging gemaakt te worden tussen de prijs en de warmtegeleiding.

PCM's kunnen problemen veroorzaken in combinatie met andere materialen.

4.11 Brandbaarheid

Brand ontstaat wanneer aan alle drie van de volgende factoren uit zogenaamde branddriehoek (figuur 4.6) wordt voldaan.



Figuur 4.6: Branddriehoek [internetbron:8]

Hieruit volgen dan ook de drie manieren om een brand te blussen, te weten:

1. zuurstof toevoer verhinderen;
2. brandbare stof verwijderen;
3. temperatuur verlagen.

Voor het gebruik van PCM's als product betekent dit, dat naar deze drie factoren moet worden gekeken.

1. Zuurstof: Bij het toepassen van PCM's binnen de kantoorbouw is zuurstof te allen tijde aanwezig en het is ook geen reële optie om deze factor weg te nemen.
2. Brandbare stof: Bij dit punt dient onderscheid gemaakt te worden tussen zouthydraten en paraffine. Zouthydraten als toepassing voor PCM is keuze uit een breed scala aan onbrandbaar materialen, daarom wordt aangenomen dat te allen tijde gebruik wordt gemaakt van onbrandbare zouthydraten. Paraffine is daarentegen wel brandbaar.
3. Ontbrandingstemperatuur: Aangezien er wordt uitgegaan van onbrandbare zouthydraten hoeft er op de ontbrandingstemperatuur niet te worden ingegaan. Voor de toepassing van paraffine uiteraard wel. Hiervan is het vlampunt net als het smeltpunt afhankelijk van de ketenlengte (aantal C-atomen). In het werkgebied 15-25 °C betekent dit dat het vlampunt ligt op 150-175 °C [internetbron:3]. Hiermee is

het volgens 'Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals' [internetbron:9] geen brandbare vloeistof. Deze schrijft de volgende klassen voor:

1. vlampunt $<23\text{ }^{\circ}\text{C}$ kookpunt $<35\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. vlampunt $<23\text{ }^{\circ}\text{C}$ kookpunt $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. vlampunt $>23\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $<60\text{ }^{\circ}\text{C}$
4. vlampunt $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $<93\text{ }^{\circ}\text{C}$

Zouthydraten vormen geen probleem qua brandgevaar aangezien deze onbrandbaar zijn. Paraffine is daarentegen wel brandbaar, maar valt niet in een gevarenklasse.

4.12 Inkapseling

Om het PCM toe te passen moet het ingesloten worden, dit wordt inkapseling genoemd. Het is een lastig materiaal om mee te werken, omdat het een vloeibare aggregatietoestand kent. Als het PCM vloeibaar is en het in bijvoorbeeld kleding toegepast is, gaat de kleding PCM lekken. Daarnaast is het belangrijk dat zouthydraten geen vocht van buiten aantrekken omdat de samenstelling dan verandert, dus moet vochtuitwisseling worden voorkomen.

Inkapseling bestaat in twee vormen, te weten:

- Micro-inkapseling

Bij micro-inkapseling wordt het PCM verpakt in een laagje, waarbij het totale ingekapselde PCM een diameter krijgt tussen de 2-20 μm . Deze vorm van inkapseling wordt al uitgevoerd bij paraffine door BASF (wereldwijde onderneming in de chemische industrie), die dit product onder de naam "Micronal" op de markt heeft gebracht.

Bij zouthydraten is micro-inkapseling een stuk recenter en dit wordt gedaan door Capzo International BV, zij passen dit onder andere toe in hun product "K-block". Tevens zijn zij het eerste bedrijf dat zouthydraten micro-inkapselt.

- Macro-inkapseling

Deze vorm van inkapseling wordt vooral toegepast bij zouthydraten en staat voor alle ingekapselde PCM's die groter zijn dan de micro-ingekapselde. Vaak wordt gekozen voor een kunststof als verpakking, het is hierbij van belang te letten op de dampdichtheid aangezien dit kan leiden een andere samenstelling. Een kunststof verpakking in combinatie met een organische PCM (paraffine) vereist ook extra aandacht, omdat organische materialen een kunststof zacht kunnen maken. In situaties waarin de warmtegeleiding belangrijk is, is het mogelijk om te kiezen voor een metaal

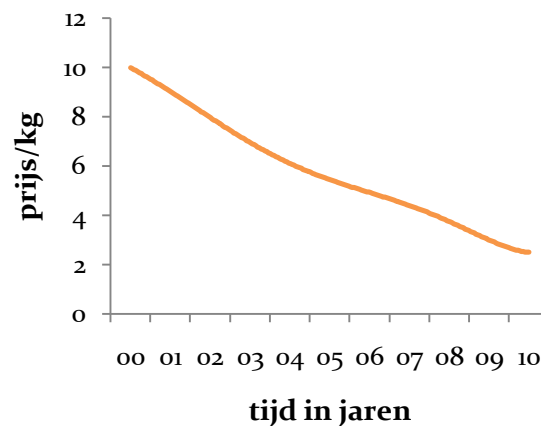
als verpakking. Hierbij moet uiteraard wel gelet worden op de mogelijkheid van corrosie. Bij het gebruik van kunststof ingekapselde PCM's zijn er weinig beperkingen qua vorm, waardoor fabrikanten veel verschillende vormen op de markt brengen.

PCM's moeten altijd ingekapseld worden voor eindgebruik. Hiervoor kan bij zowel paraffine als zouthydraten micro- en macro-inkapseling gebruikt worden.

4.13 Kosten

In deze paragraaf wordt ingegaan op de kostprijs van PCM in pure vorm. Dit ligt voor paraffine en zouthydraten praktisch gelijk. Het vergelijken van kant en klare eindproducten is hier niet aan de orde, omdat dan eerst verder moet worden ingegaan op de specificaties van die producten.

De gemiddelde prijs anno 2010 van puur PCM ligt tussen de 1-3 €/kg. Deze prijzen komen naar voren in de literatuur [literatuurbron:7] en komt ook overeen met informatie van leveranciers [mondelinge bron:1]. De prijs is dalende, dit is te zien in figuur 4.7. Het inkapselen bepaalt een groot deel van de prijs en afhankelijk van of dat product nog verwerkt wordt in een eindproduct, is de prijs nog hoger van de gehele unit. De prijs van een eindproduct is dus afhankelijk van waar het PCM in verwerkt is, waardoor op dit moment geen prijs voor een eindproduct gegeven kan worden.



Figuur 4.7: Prijsontwikkeling PCM [literatuurbron:7]

De prijs van pure PCM ligt zowel voor paraffine als voor zouthydraten op circa 1-3€/kg.

4.14 Afdanken

Op de vraag of PCM's recyclebaar zijn, is het antwoord: Ja. Een paraffine die gebruikt is voor warmte- en koude opslag is nadien nog steeds een paraffine en kan dus gebruikt worden voor hetzelfde doeleinde, of voor een ander product die bestaat uit paraffine.

Een zouthydraat bestaat alleen uit zout en water, waardoor ook deze prima te recyclen is. Het zout kan gebruikt worden als strooizout. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat het zouthydraat ingekapseld is en deze apart bekeken moet worden. Is er de wens om het PCM materiaal af te voeren als afval dan valt dit onder chemische afval en moet informatie worden verschaft aan de gemeente of een containerbedrijf. Hier is geen eenzijdige wet- en regelgeving voor.

Wordt er gesproken over paraffine en zouthydraten dan zijn beide te recyclen. Bij producten hangt de recyclebaarheid af van welke materialen gebruikt zijn. Bij het afvoer als afval moet informatie worden verschaft aan de gemeente en/of een containerbedrijf.

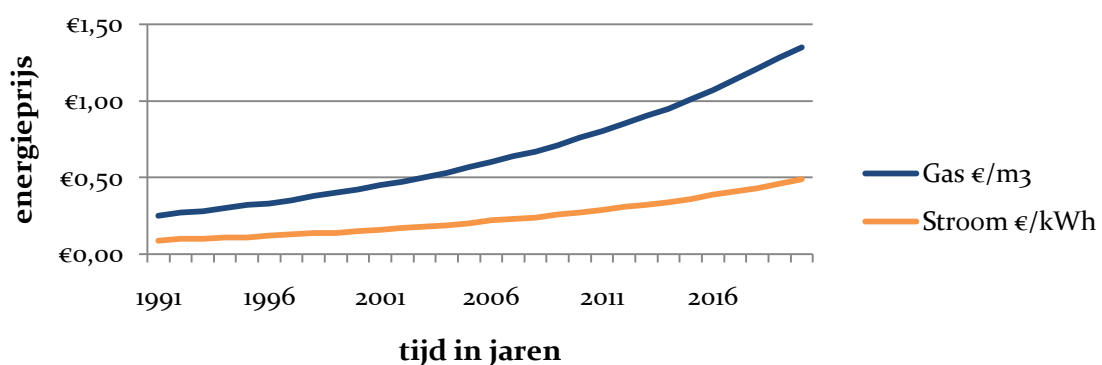
4.15 Subsidie

Tegenwoordig zijn voor veel energiebesparende maatregelen subsidies te krijgen. Ook de toepassingen van PCM's in de installatietechniek zijn energiebesparend, maar helaas nog te nieuw en wellicht te onbekend. Deze toepassingen zijn daarom nog niet opgenomen in de subsidieregelingen en niet in te geven in programma's waarmee de Energie Prestatie Coëfficiënt berekend wordt [mondelinge bron:1].

Momenteel is er nog geen subsidie beschikbaar.

4.16 Energieprijzen

Voor het bepalen van de huidige en toekomstige energieprijzen is uitgegaan van de cijfers zoals gegeven door het CBS [internetbron:10]. Om een blik op de toekomst te werpen zijn beide grafieken geanalyseerd en daaruit is gebleken dat de prijs van zowel stroom als gas gemiddeld per jaar stijgt met 6 %. Op basis van dit gegeven is figuur 4.8 opgesteld.



Figuur 4.8: Voorspelling prijsontwikkeling

Omdat niemand weet hoe de energieprijzen zich zal ontwikkelen wordt in deze scriptie gebruik gemaakt van twee scenario's: gelijk blijvende prijs en gemiddelde prijsstijging van 6 %.

4.17 Overzicht ontwerpfactoren

In tabel 4.3 zijn de ontwerpfactoren overzichtelijk neergezet voor zouthydraten en paraffine, de twee meest voorkomende PCM's. Daarnaast zijn de twee PCM's ook beoordeeld op de kritische ontwerpfactoren, dit is te zien in tab 4.4.

Ontwerpfactoren	Zouthydraten	Paraffine
Brandbaar	nee	ja
Chemisch actief	ja	nee
Corrosief	ja, metalen	ja, kunststof
Dichtheid	1,5-1,7 kg/dm ³	0,8-0,9 kg/dm ³
Hygroscopisch (vochtaantrekkend)	ja	nee
Kosten	1-3 €/kg	1-3 €/kg
Macro-inkapseling	ja	ja
Micro-inkapseling	ja	ja
pH	3-10,5	niet vastgesteld
Recyclebaar	ja	ja
Segregatie	aandachtspunt	vrijwel niet
Smeltpunt	traject	traject
Smelttemperatuur	5-130 °C	5-130 °C
Subkoeling	aanwezig	aanwezig
Subsidies	nee	nee
Volumeverandering	10-15 %	10-15 %
Warmtegeleiding	0,6 W/m·K	0,2 W/m·K
Warmteopslagcapaciteit	200 kJ/kg	200 kJ/kg

Tabel 4.3: Ontwerpfactoren

Kritische ontwerpfactoren	Zouthydraten	Paraffine
Brandbaarheid	+	-
Dichtheid	+	-
Smeltpunt	=	=
Smelttemperatuur	=	=
Warmtegeleiding	+	-
Warmteopslagcapaciteit	=	=

- = Geen relevant verschil
- Nadelig
- + Voordelig

Tabel 4.4: Vergelijking kritische ontwerpfactoren

5 PCM in het algemeen als kantoorinstallatie

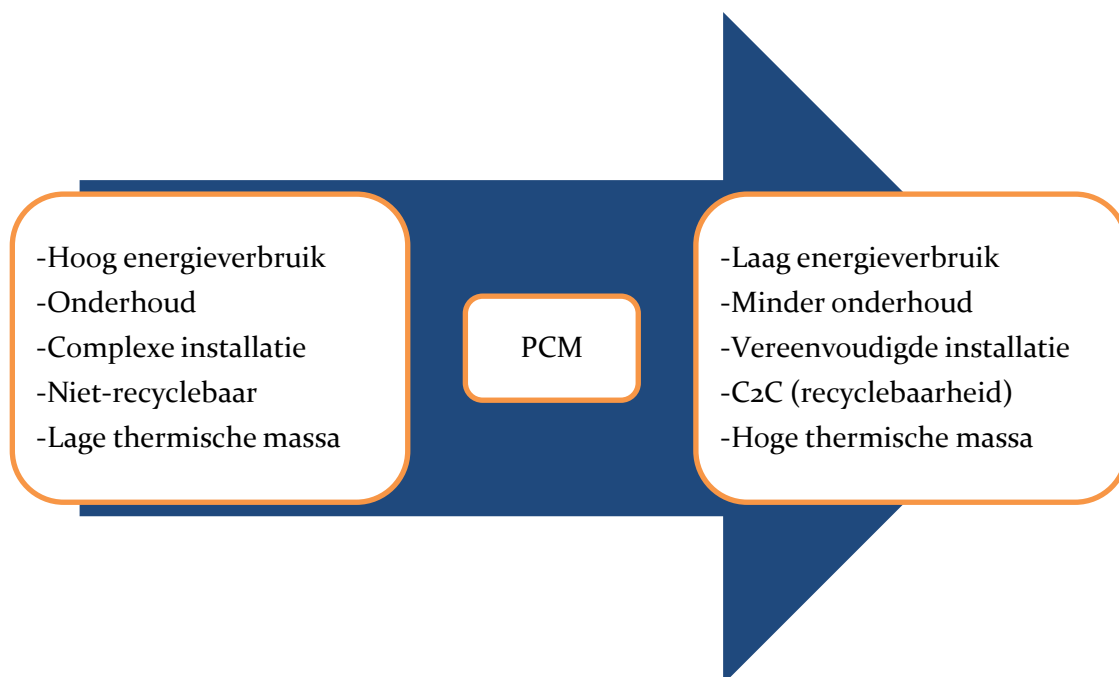
5.1 Waarom PCM?

Tegenwoordig wordt over de hele wereld veel energie gebruikt om de leefomgeving van de mens binnen bepaalde comfortgrenzen te regelen. Voor een beter milieu en met het oog op de toekomst, moet de energievraag aanzienlijk dalen. Het toepassen van PCM's, in deze scriptie gericht op de installatietechniek, zorgt volgens de producenten en leveranciers voor een reductie van de huidige of te ontwerpen koel- en verwarmingsinstallatie en waarborgt het huidige comfort.

Door het gebruik van PCM's bestaat eventueel de mogelijkheid om de huidige 'standaard' om te zetten naar 'energiezuinigere' (gereduceerde) installaties. Maar daarbij komen nog meer verbeteringen ten opzichte van de huidige installaties. Deze zullen in de volgende paragraaf besproken worden.

5.2 Van de huidige naar de beoogde situatie met PCM

In figuur 5.0 is de overgang van de huidige naar de beoogde situatie geschetst.

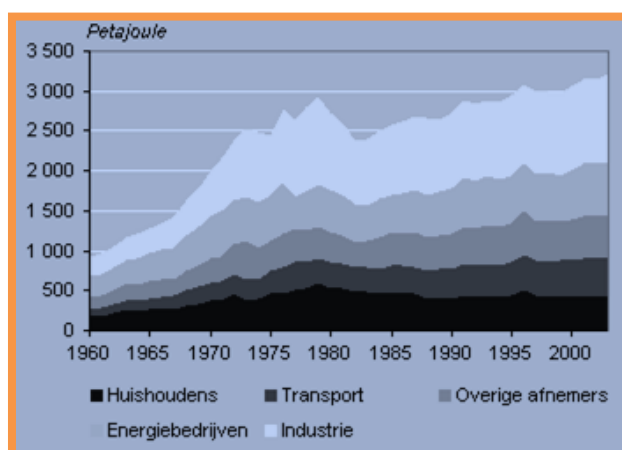


Figuur 5.0: Van huidige naar beoogde situatie met PCM zoals geclaimd door producenten en leveranciers.

5.3 Huidige situatie zonder PCM

Hoog energieverbruik

Anno 2010 wordt meer energie gebruikt dan ooit te voren in de geschiedenis. In figuur 5.1 is te zien hoe het energieverbruik in Nederland zich heeft ontwikkeld de afgelopen halve eeuw. Hierin is te zien dat de industrie de grootste afnemer is van energie in Nederland.



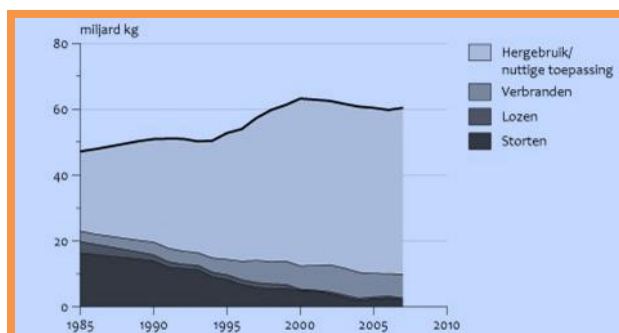
Figuur 5.1: Energieverbruik Nederland [internetbron:10]

Complexe installaties

In de huidige installatietechniek worden de concepten die worden toegepast steeds complexer en daarmee ook duurder in aanschaf, duurder in engineering en wordt het risico op falen groter. Ook door de regelingen van een installatie, is de kans op een storing of niet functioneren groter.

Niet recyclebare materialen

De grondstoffen die vandaag de dag worden gebruikt zijn vaak slechts gedeeltelijk recyclebaar. De doelstellingen die opgesteld staan in het Landelijk Afvalplan (LAP) lijken volgens figuur 5.2 te worden gehaald.



Figuur 5.2: Afvalproductie en de wijze van verwerking [internetbron:11]

Belangrijke doelstelling (LAP) voor de periode tot en met 2012 zijn:

- het versterken van de reeds bereikte relatieve ontkoppeling van het bruto binnenlands product en het totale afvalaanbod door voortzetting en intensivering van het preventiebeleid;
- opvoeren van het percentage nuttige toepassing van afvalstoffen tot 86 % in 2012;
- beperking van de hoeveelheid te verwijderen afvalstoffen tot 9,5 miljard kg, waarvan 2 miljard kg te storten onbrandbaar afval (het storten van brandbaar afval moet gestopt worden).

[internetbron:12]

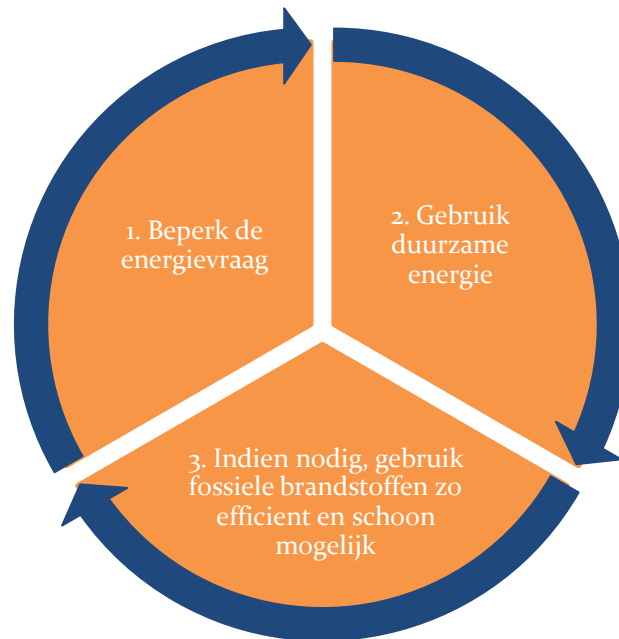
Lage thermische massa

Huidige nieuwbouw bestaat vaak uit lichte constructies met een lage thermische massa. Thermische massa geeft aan in welke mate een gebouw energie (warmte) kan opslaan/bufferen in haar constructie. Een lage thermische massa houdt in dat de temperatuur in het gebouw snel reageert op de buitentemperatuur. Dit houdt in dat het gebouw zich snel op laat warmen en het snel heet wordt door bijvoorbeeld zonlicht. Andersom geldt dat het gebouw zich snel laat afkoelen.

5.4 Beoogde situatie met PCM

Energiegebruik beperken

Men wil toe naar een situatie waarin minder energie verbruikt wordt en waar toch hetzelfde resultaat geleverd wordt als in de huidige situatie. Dit is nodig omdat energiebronnen op den duur uitgeput raken en de energievraag nog steeds blijft stijgen. In welke volgorde het gebruik van fossiele brandstoffen beperkt moet worden volgens Novem, is weergegeven in figuur 5.3.



Figuur 5.3: Trias Energetica [internetbron:13]

Minder onderhoud

De voorkeur gaat uit naar een systeem dat minder onderhoud nodig heeft dan de conventionele systemen.

Vereenvoudigde installatie

Huidige systemen bestaan vaak uit veel leidingwerk en appendages om te koelen en verwarmen. Een situatie waarin koelen en verwarmen met één systeem zonder leidingwerk mogelijk is, zou ideaal zijn. Hiermee wordt bespaard op zowel de materiaalkosten als de ruimte die het systeem inneemt.

Cradle 2 Cradle (recyclebaar)

Om bewust met het milieu bezig te zijn dienen de materialen C2C zijn. Dit houdt in dat alles gerecycled kan worden zodat er geen onbruikbaar afval overblijft. Het VROM heeft dit punt opgenomen in zijn Landelijk Afvalbeheerplan 2009-2012 (LAP2).

“Gebruiken van het C2C concept als inspiratiebron bij de zeven prioritaire stromen die in het kader van het ketengericht afvalbeleid worden opgepakt.” *[internetbron:12]*

Hoge thermische massa

De thermische massa vergroten houdt in dat de gebruikte materialen in een gebouw een hoger warmteaccumulerend vermogen hebben. De accumulerende werking van bijvoorbeeld een kathedraal is in de zomer te merken als men vanuit de brandende zon naar binnen stapt.

5.5 Hoe kantoren koelen en verwarmen

Er zijn verschillende manieren om PCM toe te passen in kantoren. Op welke manier het ook toegepast wordt, er moet een temperatuurverschil aanwezig zijn om het PCM zijn 'werk' te laten doen. Een verschil tussen de binnentemperatuur en de smelttemperatuur van het PCM, zorgt voor een warmtestroom van of naar het PCM. In tegenstelling tot conventionele installaties wordt niet de temperatuur van het verwarm- of koelelement gevarieerd om een temperatuursverschil te creëren, maar de binnentemperatuur.

Bij een binnentemperatuur die hoger is dan de smelttemperatuur van het PCM, neemt de PCM warmte uit de ruimte op. Bij een binnentemperatuur die lager dan de smelttemperatuur is, staat het PCM zijn warmte aan de ruimte af. In beide gevallen neemt de binnentemperatuur uiteindelijk in de ideale situatie de faseovergangtemperatuur van het PCM aan.

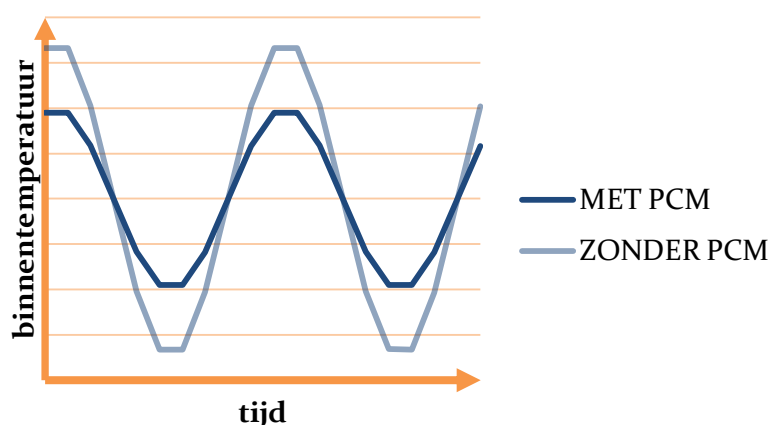
Als overdag een kantoorruimte in gebruik is, stijgt door de interne en externe warmtelast de temperatuur. Stijgt de temperatuur hoog genoeg, dan begint het PCM warmte op te nemen, waardoor de resterende koelvraag daalt. 's Nachts geeft het PCM zijn warmte af om later weer warmte op te nemen. Het afstaan van warmte gebeurt alleen als het PCM gekoeld wordt met een temperatuur onder de smelttemperatuur. In de winter en tussenseizoenen is dit niet snel een probleem. Maar in de zomer bestaat de kans dat er gekoeld moet worden met bijvoorbeeld een koelmachine. Dat het PCM in de nacht gekoeld moet worden, houdt wel in dat de luchtbehandelingkast naast zijn dagbedrijf, ook 's nachts moet blijven draaien om koude lucht langs het PCM te blazen wat tot extra energieverbruik leidt.

Belangrijk is dat het PCM zo gekozen wordt dat het overdag genoeg warmte op kan nemen, maar dat het 's nachts ook alle opgenomen warmte weer af kan geven. Als dit niet het geval is

en 's ochtends nog warmte in het PCM aanwezig is bestaat de kans dat op die dag te weinig gekoeld kan worden.

Bij een goed ontworpen installatie met PCM, zullen over de gehele dag piektemperaturen gedempt worden, waardoor het mogelijk is de installatie te reduceren. In de nacht worden de lagere temperaturen gedempt doordat het PCM zijn warmte af gaat geven aan de ruimte. PCM zorgt voor een constantere binnentemperatuur bij een variabele buitentemperatuur.

In figuur 5.4 is het beoogde temperatuurverloop met PCM weergegeven.



Figuur 5.4: Binnentemperatuur verloop met en zonder PCM

5.6 PCM toepassingen in kantoren

Hoe is het toe te passen

PCM kan op vele manieren worden toegepast in kantoren. Zo wordt het onder andere in gipsplaten, beton en daken verwerkt. Dit is te veel op de bouwkundige kant gericht voor deze scriptie omdat dit onderzoek wordt gedaan in opdracht van Kuijpers Installaties Utrecht B.V. Zij zijn vooral geïnteresseerd in toepassingen binnen de installatietechniek.

Gekozen is om onderzoek te gaan doen naar PCM klimaatplafonds, PCM inductie-units en een PCM koelbatterij in de luchtbehandelingkast. Dit zijn bestaande concepten, waardoor informatie afkomstig is van leveranciers. Een PCM koelbatterij in de luchtbehandelingkast bestaat uit een kast met daarin PCM platen die voor een groot oppervlak zorgen. Hiermee wordt de lucht centraal gekoeld.

Hoe te ontwerpen?

Het ontwerpen wordt in principe op dezelfde manier gedaan als bij conventionele installaties, er is dus geen aanvullende kennis voor benodigd.

Ten eerste dient zoals gebruikelijk een koellast en warmteverlies berekening gemaakt te worden waaruit het benodigde vermogen blijkt. Er vanuit gaande dat het minimale ventilatiedebiet bekend is, wordt hierop het aantal benodigde PCM inductie-units bepaald. Deze zijn ontworpen voor een bepaald debiet. Een PCM inductie-unit zoals deze zich momenteel op de markt bevindt, bevat maximaal 24 PCM platen. Met dit gegeven kan de totale warmtecapaciteit van het PCM bepaald worden. Bij een PCM klimaatplafond wordt de beleggingsgraad hierdoor bepaald. Waaraan dan een hoeveelheid PCM met een bepaalde warmtecapaciteit hangt.

Wat bij het ontwerp belangrijk is, is dat een temperatuur gerealiseerd wordt waarmee het PCM gestold kan worden. In sommige gevallen is dit direct met de buitenlucht mogelijk, in andere gevallen moet de lucht nagekoeld worden. Maar hoe dan ook moet de luchtbehandelingkast draaien om de lucht langs het PCM te blazen, zowel overdag voor ventilatie, als 's nachts voor het stollen van het PCM. Wat leidt tot extra energieverbruik.

6 Uitgangspunten referentiekantoorpand

Het kantoorpand van Kuijpers Installaties Utrecht B.V. is gevestigd aan Damzicht 29 te De Meern. Het pand bestaat uit twee bouwdelen. Bouwdeel A is voor eigen gebruik en Bouwdeel B ten behoeve van verhuur aan derden. Beide bouwdelen zijn voorzien van een eigen luchtbehandelinginstallatie. Voor de koeling maken beide bouwdelen gebruik van dezelfde grondwaterbron. De warmteopwekking geschiedt centraal in het eigen bouwdeel door middel van een warmtepomp met een ketel voor piekbelasting.

Er is gekozen voor dit kantoorpand omdat de gegevens ervan bekend zijn en eenvoudig te verkrijgen. Daarnaast voldoet het aan een standaard kantoorpand volgens de huidige norm qua duurzaamheid.

Voor beide bouwdelen gelden de volgende uitgangspunten [*literatuurbron:8*]:

6.1 Verwarming

- binnentemperatuur:
 - Verblijfsruimten 21 °C
 - Verkeersruimten 15 °C
 - Toiletten 15 °C
 - Magazijn/bedrijfshal 12-15 °C
- u-waarden:
 - Buitengevel 0,4 W/m²·K
 - Beganegrondvloer 0,4 W/m²·K
 - Dak 0,4 W/m²·K
 - Glas 1,1 W/m²·K
- berekening conform NEN 5066/ISSO 55
 - Buitentemperatuur -10 °C
 - Infiltratie 0,2 dm³/s·m²
 - Opwarmtoeslag 0 W/m²
- de kantoormuimte in beide panden zijn vrij indeelbaar op basis van 3,6 meter;
- warmteopwekking middels warmtepomp en aanvullende HR cv-ketel;
- verwarmingssysteem uitgevoerd als LTV systeem;
- warmteafgifte middels klimaatplafond;
- entree uitgevoerd met vloerverwarming;

- bedrijfshal wordt verwarmd middels gerecirculeerde lucht uit bouwdeel A, dit kan worden naverwarmd en wordt ingeblazen middels een inblaasornament.

6.2 Ventilatie

- gebaseerd op één persoon per tien m² vloeroppervlakte in kantoorruimte;
- gebaseerd op één persoon per 5 m² vloeroppervlakte in vergader- en kantineruimte;
- verblijfsruimte 2-voudig
- vergader-/kantine-/directieruimte 4-voudig

6.3 Koeling

- gebaseerd op TO-berekening;
- maximaal 75-150 uur overschrijding bij 25 °C;
- 0 uur overschrijding bij 28 °C;
- PMV +/- 0,5;
- een en ander ten opzichte van het referentiejaar 1964/1965 [literatuurbron:9];
- koudeopwekking middels bron;
- ZTA glas = 0,3;
- binnenzonwering;
- koude afgifte middels lucht en klimaatplafonds;
- buiten condities uitgangspunt.
 - 28 °C
 - 55 %

6.4 Uitkomst berekeningen

In tabel 6.o zijn de uitkomsten weergegeven van de berekeningen die zijn uitgevoerd door Kuijpers Installaties Utrecht B.V. ten tijde van de ontwerpfase [literatuurbron:8].

Omschrijving	Verdieping	Oppervlakte	Koellast	Warmteverlies	Ventilatie	Primairkoelvermogen	Koelvermogen L BK	Secundairkoelvermogen	Primairverwarmingsvermogen	Verwarmingsvermogen L BK	Secundairverwarmingsvermogen	Interne warmteproductie
-	-	m ²	W/m ²	W/m ²	m ³ /h·m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²
Kantoorruimte	BG	286	54	72	7	20	43	35	0	7	72	43
Kantoorruimte	1e	302	67	66	7	20	43	47	0	7	66	53
Kantine	1e	103	46	39	11	32	70	15	0	11	39	16
Kantoorruimte	2e	450	61	63	5	15	34	46	0	5	63	30

Tabel 6.o: Gegevens Kuijpers m.b.t. de klimaatinstallatie

7 PCM concepten

Voor Kuijpers Installaties Utrecht B.V. worden de volgende drie concepten geanalyseerd die potentie hebben binnen de nieuwbouw van kantoren:

1. **PCM koelbatterij** - In dit concept wordt een PCM koelbatterij gebruikt om buitenlucht in de zomer voor te koelen. 's Nachts wordt deze koelbatterij afgekoeld met koude buitenlucht. Dit met als doel om vermogensreductie te creëren (kleinere conventionele koelbatterij en kleinere koude opwekking) en reductie van het energieverbruik.
2. **PCM klimaatplafond** - In dit concept wordt PCM toegepast als klimaatplafond om overdag warmte op te nemen. Deze warmte wordt 's nachts afgegeven aan de afkoelende ruimte en de nachtventilatie. Dit met als doel om vermogensreductie te creëren (kleinere koude opwekking), een kleinere installatie (geen leidingwerk naar de klimaatplafonds) en reductie van het energieverbruik.
3. **PCM inductie-unit** - In dit concept wordt PCM verwerkt in inductie-unit om overdag warmte op te nemen. Deze warmte wordt 's nachts afgegeven aan de afkoelende ruimte en de nachtventilatie. Dit met als doel om vermogensreductie te creëren (kleinere koude opwekking), een kleinere installatie (geen leidingwerk naar de klimaatplafonds) en reductie van het energieverbruik.

De concepten worden eerst in het algemeen opzichzelfstaand geanalyseerd en daarna als toepassing in het referentiekantoor.

Tijdens deze analyse worden de volgende punten uitgewerkt:

- **Technische werking** - Hierin wordt toegelicht hoe het concept in theorie werkt.
- **Dimensioneren** - Eerst wordt in het algemeen toegelicht hoe het concept gedimensioneerd dient te worden. Daarna wordt dit toegepast op het referentiekantoor.
- **Simulatie** - Om inzicht te geven in de effecten van verschillende ontwerp variabelen wordt een globale MS Excel simulatie uitgevoerd. Hieruit zijn ook gegevens te halen over het te verwachten energieverbruik.

- **Kosten-batenanalyse** - Om te bepalen of een concept financieel haalbaar is worden ten eerste de meer- en minderinvesteringen op een rij gezet. Daarna worden de bepalende variabele kosten en hun verandering in kaart gebracht. Hieruit volgt de terugverdientijd (TVT) en worden de eventuele opbrengsten over een periode van 5, 10 en 15 jaar uiteengezet.
- **Voor- en nadelen** - De gevonden voor- en nadelen overzichtelijk en beknopt weergegeven.
- **Conclusie** - Een conclusie ter afsluiting.

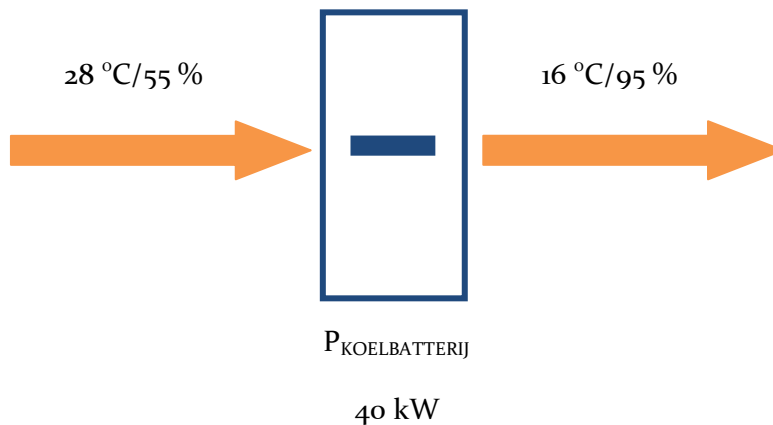
Voor het dimensioneren, simuleren en de kosten-batenanalyse is uitgegaan van de volgende aannames/uitgangspunten:

- uitkomsten verifiëren met cijfers Senternovem [*internetbron:14*];
- berekeningen verifiëren door drie collega's met technische HBO opleiding;
- buitencondities volgens verkort referentiejaar 1964/1965;
- thermische gebouw massa 110 kJ/m²·K volgens NEN 2916 tabel 16a;
- PCM heeft een smeltpunt;
- gegevens PCM Energy aangehouden [*internetbron:4*];
- geen vermindering in prestaties;
- geen subcooling;
- prijsopgave PCM volgens [*mondelinge bron:1*];
- prijsopgave installaties volgens Vuistregels voor installatiekosten en calculatie Kuijpers [*literatuurbron:10*];
- COP (dimensieloze prestatiecoëfficiënt)
 - Koelmachine = 4
 - Warmtepomp = 4
 - Bron = 100
- 1 m³ gas staat gelijk aan 8,8 kWh;
- energieprijzen:
 - Elektriciteit = 0,27 €/kWh
 - Gas = 0,67 €/m³

8 Concept: PCM koelbatterij

8.1 Werking concept

Indien sprake is van een normale luchtbehandeling met een koelbatterij ten behoeve van de koeling ziet dit er bij 28 °C en een relatieve vochtigheid van 55 % buiten en een gewenste inblaastemperatuur van 16 °C/95 % uit als is gegeven in figuur 8.o.

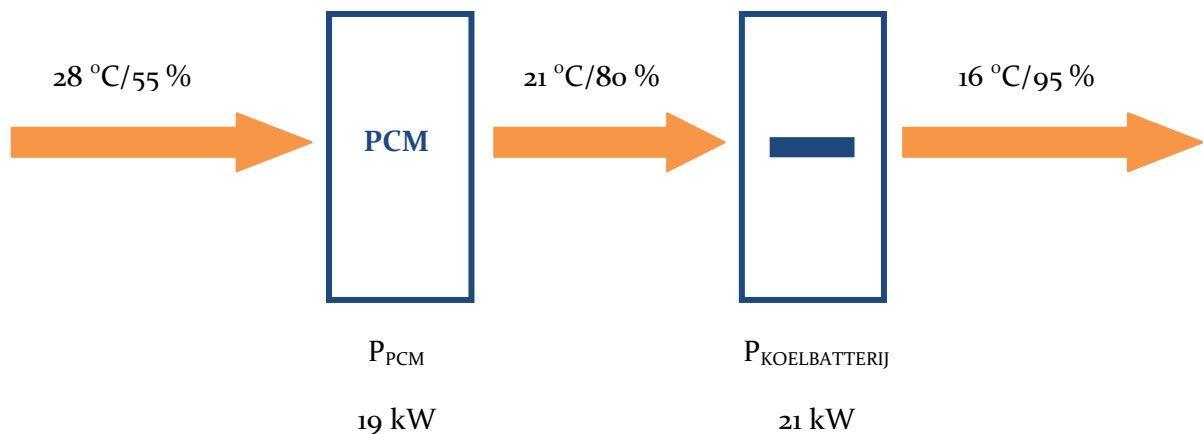


Figuur 8.o: Effect koelbatterij

Het vermogen van een koelbatterij wordt berekend volgens onderstaande formule. De enthalpieverandering die ingevuld dient te worden, is op te zoeken in het Mollier-diagram.

$$P_{\text{KOELBATTERIJ}} (\text{kW}) = \text{debiet} (\text{m}^3/\text{s}) \cdot \text{dichtheid} (\text{kg}/\text{m}^3) \cdot \text{enthalpieverandering} (\text{kJ}/\text{kg})$$

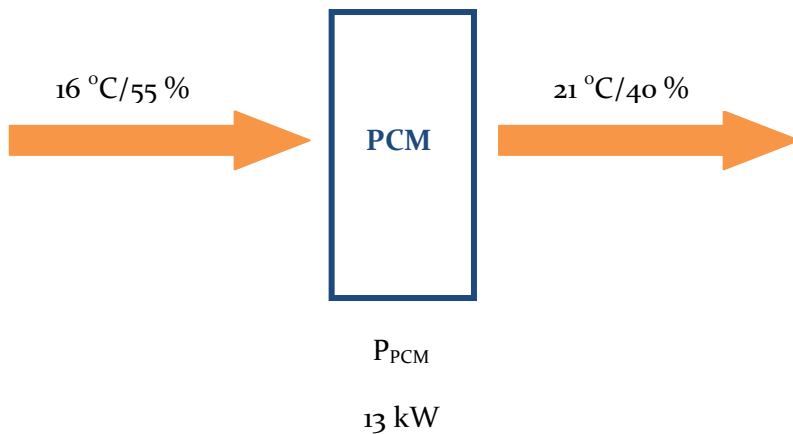
In het concept waarin PCM toegepast is, wordt buitenlucht met de temperatuur van 28 °C/55 % eerst door een PCM koelbatterij gehaald. Hier wordt deze afgekoeld tot een fractie boven de smelttemperatuur van het PCM. Dit betekent voor een PCM-21 een temperatuur van 21 °C/80 %. Dit wordt dan de intredeconditie voor de conventionele koelbatterij. Dit concept is weergegeven in figuur 8.1.



Figuur 8.1: Effect koelbatterij i.c.m. PCM

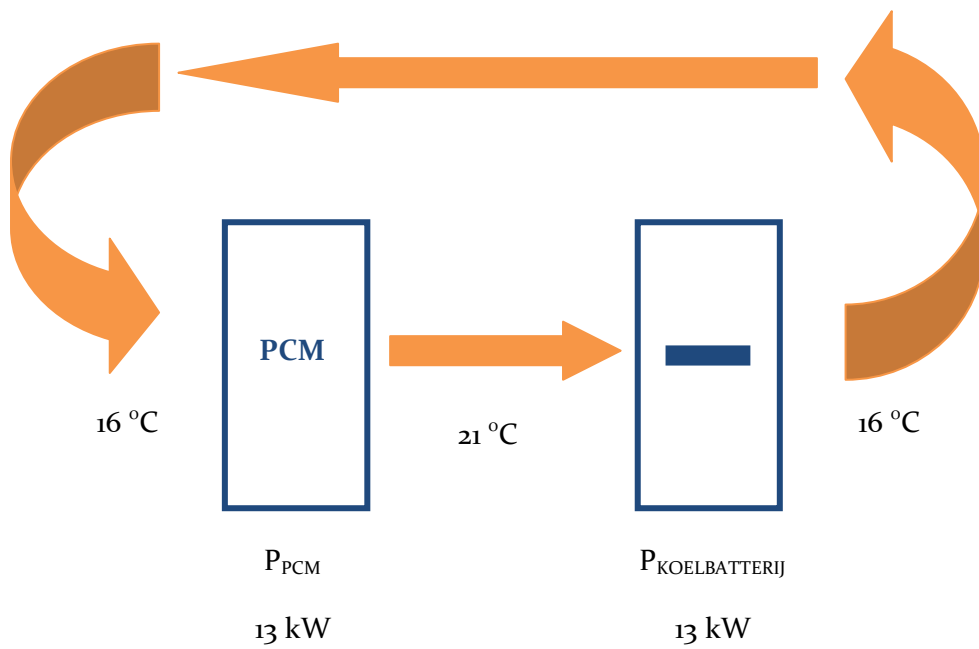
Dit betekent een vermogens reductie aangezien het te installeren vermogen wordt terug gebracht van 40 kW naar 21 kW . Daaruit volgt een procentuele reductie van **48 %**.

Om het PCM te laten stollen moet deze gekoeld worden. Hiervoor dient in eerste instantie de koude buitenlucht 's nachts te worden gebruikt. Deze lucht wordt 's nacht over de PCM koelbatterij geblazen waardoor deze wordt afgekoeld. Dit is schematisch weergegeven in figuur 8.2.



Figuur 8.2: Effect PCM

Mocht dit echter niet toereikend zijn dan is het mogelijk om met de conventionele koelbatterij van de luchtbehandelingkast de PCM af te koelen. Deze koelt dan de lucht die over de PCM koelbatterij geblazen wordt af, waardoor het PCM afkoelt. De opgewarmde lucht wordt vervolgens weer afgekoeld door de koelbatterij. Deze modus is schematisch weergegeven in figuur 8.3.



Figuur 8.3: Regenereren van PCM door koelbatterij

8.2 Dimensioneren

Om de eerst orde van grootte te bepalen van een PCM koelbatterij zijn de volgende factoren van belang.

- **PCM smelttemperatuur** – Voor het selecteren van de juiste PCM is het van belang de gewenste smelttemperatuur te bepalen. Deze temperatuur moet zodanig worden gekozen dat een zo groot mogelijk verschil zit tussen de intredeconditie en de smelttemperatuur. Deze temperatuur wordt echter begrensd, omdat als gekozen wordt voor een te lage smelttemperatuur het niet meer mogelijk is de PCM voldoende af te koelen 's nachts. De voorkeur gaat dan ook uit naar een smelttemperatuur die precies tussen de ontwerp buitentemperatuur overdag en 's nachts ligt. Dit om te zorgen dat de PCM evenveel warmte kan opnemen als het kan afstaan.

$$\text{Richtwaarde smelttemperatuur} = \frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2}$$

- **Warmteopslagcapaciteit PCM** – De warmteopslagcapaciteit van de PCM moet groot genoeg zijn om een ontwerp vollastdag in de zomer aan te kunnen. Dit betekent dat het vollast vermogen wordt vermenigvuldigd met het aantal bedrijfsuren. In formulevorm ziet dit er als volgt uit:

$$\text{Warmteopslagcapaciteit (kWh)} = \text{vollastvermogen (kW)} \cdot \text{Bedrijfsuren (h)}$$

- **Warmteoverdracht PCM** – Om daadwerkelijk het benodigde vermogen te behalen moet de warmteoverdracht groot genoeg zijn. Dit wordt als volgt bepaald:

$$\text{Warmteoverdracht (kW/K)} = \frac{\text{vollastvermogen (kW)}}{\text{temperatuursverschil (K)}}$$

Toegepast in het referentiekantoor

Als dit wordt ingevuld voor het referentiekantoor komt dit op het volgende neer:

- Smelttemperatuur $= \frac{(28^{\circ}\text{C} + 16^{\circ}\text{C})}{2} = 22^{\circ}\text{C}$
- Warmteopslagcapaciteit $= 19 \text{ kW} \cdot 10 \text{ h} = 190 \text{ kWh}$
- Warmteoverdracht $= \frac{19 \text{ kW}}{3 \text{ K}} = 6,3 \text{ kW/K}$

Afmetingen PCM

Om de afmeting van de PCM koelbatterij te bepalen moet eerst het aantal liters benodigd PCM worden uitgerekend.

$$\text{Volume PCM} = \frac{190 \text{ kWh}}{0,09 \text{ kWh/dm}^3} = 2111 \text{ dm}^3 = 2,1 \text{ m}^3$$

Daarna moet rekening worden gehouden met het overig materiaal en de plaats die de lucht inneemt. Hiervoor wordt een benuttinggraad van 50 % gekozen. Hieruit volgt het volgende totale volume:

$$\text{Totale volume} = \frac{2,1 \text{ m}^3}{0,5} = 4,2 \text{ m}^3$$

Dit resulteert in een geschatte omvang van $l \cdot b \cdot h = \sqrt[3]{4,2} = 1,6 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m}$

8.3 Simulatie

Om te bepalen hoe de PCM koelbatterij gaat werken is een simulatie gemaakt met behulp van MS Excel voor de zomerperiode (14 weken/3 maanden: juni t/m augustus).

De simulatie werkt met een tijdsinterval van één uur. De invoervariabelen veranderen per uur. Hierdoor wordt ieder uur de uitvoer berekend. De berekening is dynamisch, omdat de uitvoer van voorgaand uur wordt gebruikt als invoer voor het opvolgende uur.

De beïnvloedbare invoervariabele is de **smelttemperatuur** van het PCM. Deze is te beïnvloeden, omdat er bij de aanschaf gekozen kan worden tussen verschillende temperaturen.

Onbeïnvloedbare invoervariabelen zijn de buitentemperatuur, inblaastemperatuur en de warmteoverdracht. De **buitentemperatuur** is per uur verschillend op basis van het referentiejaar 1964/1965. De **inblaastemperatuur** staat in deze simulatie vast op 16 °C. De **warmteoverdracht** geeft aan hoeveel warmte het PCM afgeeft aan de lucht afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de PCM smelttemperatuur en de luchttemperatuur.

Onder relevante uitvoer vallen PCM buffergrootte, PCM koelen, koelbatterij in combinatie met PCM, koelbatterij zonder PCM, ventilator in combinatie met PCM, ventilator zonder PCM en besparing energieverbruik. **PCM buffergrootte** geeft aan hoeveel warmte zich maximaal bevindt in het PCM, dit is van belang om te bepalen hoeveel PCM er toegepast moet worden. **PCM koelen** geeft de hoeveelheid energie aan die het PCM aan koeling realiseert in een jaar. **Koelbatterij i.c.m. PCM** geeft aan hoeveel energie de conventionele koelbatterij dient te leveren als er gebruik wordt gemaakt van een PCM koelbatterij. **Koelbatterij zonder PCM**

geeft de hoeveelheid energie aan die de conventionele koelbatterij zou moeten realiseren als er geen gebruik gemaakt wordt van een PCM koelbatterij. **Ventilator i.c.m. PCM** laat de energiehoeveelheid zien die de ventilator in de luchtbehandelingkast verbruikt in het PCM koelbatterij concept. Deze is hoger dan in de **ventilator zonder PCM** situatie, omdat de ventilator in het PCM concept ook 's nachts moet draaien. **Besparing energieverbruik** laat het verschil in energieverbruik zien tussen de koelbatterij in combinatie met PCM en de koelbatterij zonder PCM.

In **bijlage M** zijn de in- en uitvoer weergegeven in het eindblad van de simulatie.

Uitvoer simulatie

In tabel 8.o is de uitvoer van de simulatie bij verschillende smelttemperaturen vastgelegd.

Smelt temperatuur	PCM, koelen	PCM, buffergrootte	Koelbatterij (i.c.m. PCM)	Koelbatterij (zonder PCM)	Ventilator (i.c.m. PCM)	Ventilator (zonder PCM)	Besparing energieverbruik	Procentuele besparing (koelenergie)
°C	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
15	13200	9200	0	11000	1500	1000	11000	100
16	10900	4600	2400	11000	2500	1000	8600	79
17	8500	2700	5100	11000	2000	1000	5900	53
18	6500	1500	6900	11000	1700	1000	4100	37
19	4600	600	8200	11000	1500	1000	2800	26
20	3100	300	9000	11000	1400	1000	2000	18
21	2100	200	9400	11000	1200	1000	1600	14
22	1300	100	9800	11000	1100	1000	1200	11
23	800	70	10200	11000	1100	1000	800	7
24	400	40	10600	11000	1100	1000	400	3
25	100	10	10900	11000	1000	1000	100	1
26	0	0	11000	11000	1000	1000	0	0
27	0	0	11000	11000	1000	1000	0	0
28	0	0	11000	11000	1000	1000	0	0
29	0	0	11000	11000	1000	1000	0	0
30	0	0	11000	11000	1000	1000	0	0

Onwenselijk

Wenselijk

Tabel 8.o: Uitvoer berekening

Effect ontwerpvariabelen

In tabel 8.1 is vastgelegd welke smelttemperatuur gekozen moet worden om gunstig te zijn voor de genoemde variabelen. Daarnaast is de grens van de variabelen aangegeven waar deze minimaal aan moet voldoen.

Variabele	Grens	Smelttemperatuur
Koelen met PCM	> 0	zo laag mogelijk
Opslagcapaciteit PCM	$< P_{\text{MAX}} \text{ (kW)} \cdot t_{\text{MAX}} \text{ (h)}$	zo hoog mogelijk
Koelen met koelbatterij	$< \text{referentie zonder PCM}$	zo laag mogelijk
Verbruik nachtventilatie	$< \text{besparing}$	zo hoog mogelijk
Energiebesparing	$> 0 \%$	zo laag mogelijk

Tabel 8.1: Gunstigste smelttemperatuur voor een bepaalde variabele in de simulatie

8.4 Kosten-batenanalyse

Voor het bepalen van de meer- of minderinvestering en de variabele kosten wordt gekeken naar de installatie ten behoeve van de luchtbehandeling. Ten eerste wordt de investering berekend met een installatie zoals het referentiekantoor heeft, met een bron in combinatie met warmtepomp. Daarna wordt de investering berekend voor een eenvoudiger concept met een koelmachine in combinatie met een ketel. Vervolgens worden de eventuele opbrengsten berekend in 15 jaar met tussenstappen van vijf jaar. De rekensheet is te zien in **bijlage J**.

Investering

Meer-investering

De meer-investering die van toepassing is op dit concept is:

- PCM

De hoeveelheid PCM waarin geïnvesteerd moet worden voor dit concept is een nieuwe kostenpost. Op basis van de berekende hoeveelheid en de gemiddelde prijs die in dit onderzoek naar voren is gekomen, kost dit $3170 \text{ kg} \cdot 2,50 \text{ €/kg}$ [mondelinge bron:1] = €8.000. Daarna wordt er nog een eindproduct van gemaakt, waarvoor een vermenigvuldigingsfactor van 3 wordt aangenomen. Deze factor komt ook bij bestaande producten voor. De totale kosten voor het PCM eindproduct zullen dan €24.000 bedragen.

Minder-investering

De minder-investeringen die van toepassing zijn op dit concept zijn:

- Koelbatterij

De conventionele koelbatterij in de huidige situatie levert 40 kW, door het toepassen van de PCM koelbatterij is het mogelijk deze te halveren naar 20 kW.

- Opwekker

Een gehalveerde koude vraag van de conventionele koelbatterij houdt in dat de koude opwekking ook kleiner uitgevoerd kan worden. Een vermindering van 20 kW in de koelbatterij, houdt in dat de opwekker tevens verkleind kan worden met 20 kW.

Variabele kosten

De variabele kosten die van toepassing zijn op dit concept zijn:

- Het energieverbruik van de koudeopwekker

Het energieverbruik van de koudeopwekker wordt berekend met een COP van 100.

- Het energieverbruik voor de ventilatie

In het concept waarbij het PCM toegepast is als koelbatterij in de luchtbehandelingkast moet de ventilatie ook 's nachts actief zijn. Dit houdt in dat de luchtbehandelingkast naast de standaard tien kantooruren ook nog extra uren moet draaien.

TVT

Het PCM concept in combinatie met een bron als koudeopwekker levert geen terugverdientijd op. Dit komt omdat de extra benodigde ventilatie meer energie vraagt dan de koeling via een bron.

In tabel 8.2 zijn de opbrengsten weergegeven van een bron als opwekker gecombineerd met PCM verminderd met de installatie zonder PCM.

Na 0 jaar	-€17.400,-
Na 5 jaar	-€17.600,-
Na 10 jaar	-€17.800,-
Na 15 jaar	-€18.100,-

Tabel 8.2: Opbrengsten van PCM i.c.m. bron

Het PCM concept gecombineerd met een koelmachine als opwekker levert een terugverdientijd van 57 jaar op. Dit is normaal gesproken te lang voor een investeerder. De besparing die het PCM oplevert is te laag om de extra investering van het PCM op redelijk termijn terug te verdienen.

In tabel 8.3 zijn de opbrengsten weergegeven van de koelmachine als opwekker gecombineerd met PCM verminderd met de installatie zonder PCM.

Na 0 jaar	-€20.400,-
Na 5 jaar	-€20.100,-
Na 10 jaar	-€19.800,-
Na 15 jaar	-€19.300,-

Tabel 8.3: Opbrengsten van PCM i.c.m. koelmachine

8.5 Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van de PCM koelbatterij zijn weergegeven in tabel 8.4.

Voordelen	Nadelen
Verbruikreductie Vermindering energieverbruik van circa 10-15%.	Aanschafkosten De hoge aanschafkosten zijn mogelijk een drempel voor potentiële opdrachtgevers.
Vermogenreductie Reductie van het te installeren vermogen van circa 50 %.	Afmeting Door de grote afmeting neemt de PCM koelbatterij veel plaats in, in de technische ruimte.
	Complex In tegenstelling tot de doelstelling wordt de installatie complexer.
	Onderhoud In tegenstelling tot de doelstelling meer onderhoud door het toevoegen van de PCM koelbatterij.
	Terugverdientijd Investering is niet terug te verdienen in zijn levensduur. TVT > 30 jaar

Tabel 8.4: Voor- en nadelen van de PCM koelbatterij

8.6 Conclusie PCM koelbatterij

Geconcludeerd kan worden dat de PCM koelbatterij niet rendabel is met de onderzochte uitgangspunten.

Uit de berekeningen blijkt dat het mogelijk is om met een PCM koelbatterij ventilatielucht voor te koelen. Het koelvermogen wordt begrensd door de smelttemperatuur van het PCM. Als deze te laag wordt gekozen is het niet meer mogelijk om op een ontwerpvollastdag het PCM 's nachts compleet te stollen.

De smelttemperatuur voor een PCM koelbatterij is in eerste orde van grootte te bepalen door de smelttemperatuur precies tussen de ontwerp buiten nacht en dag temperatuur te kiezen. De benodigde opslagcapaciteit kan worden bepaald door het vollast vermogen te vermenigvuldigen met het aantal bedrijfsuren van één dag.

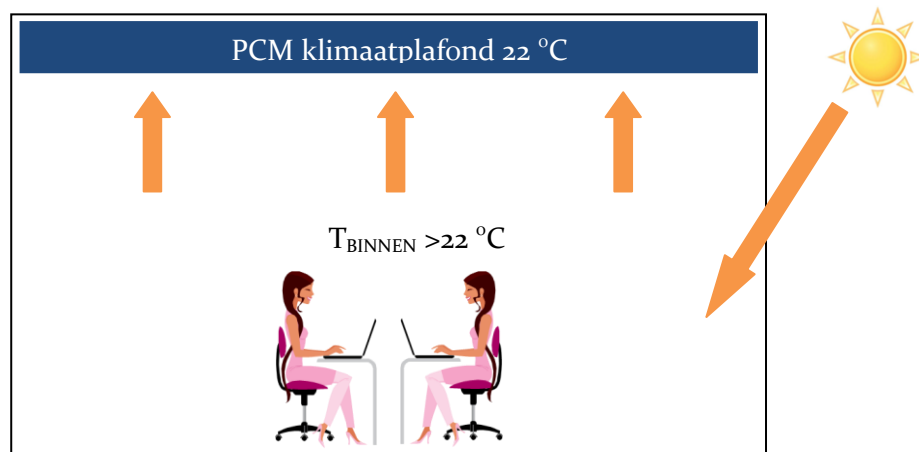
Uit de simulatie blijkt dat er een paradox is, aangezien dat bij een lager gekozen smelttemperatuur het koelvermogen van de PCM koelbatterij toeneemt, het koelvermogen van de conventionele koelbatterij afneemt, er meer ventilatie (door de extra ventilatie 's nachts) en meer besparing op het energiegebruik optreedt. Hier blijkt dat het gunstig is om een zo laag mogelijk smelttemperatuur te kiezen. Dit wordt echter beperkt door het wel of niet volledig stollen van de PCM koelbatterij in één nacht. Volgens de uitgevoerde simulatie betekent dit dat de smelttemperatuur minimaal 21 °C dient te zijn.

De investeringskosten anno 2010 zijn te hoog om terug te verdienen binnen de levensduur van de installatie. Het concept leverde een besparing op het energieverbruik op van maximaal 2 %. De oorzaak hiervan is dat de buitentemperatuur slechts sporadisch boven de smelttemperatuur van het PCM uitkomt. In combinatie met een bronsysteem heeft dit concept geen terugverdientijd aangezien de investering hoger ligt en de variabele kosten hoger zijn dan de toepassing zonder PCM koelbatterij. In combinatie met een koelmachine heeft dit concept een terugverdientijd van een kleine 60 jaar. Er kan bij dit concept niet gesproken worden over de opbrengsten aangezien de meest gunstige terugverdientijd ruimschoots hoger ligt dan de verwacht levensduur van de installatie.

9 Concept: PCM klimaatplafond

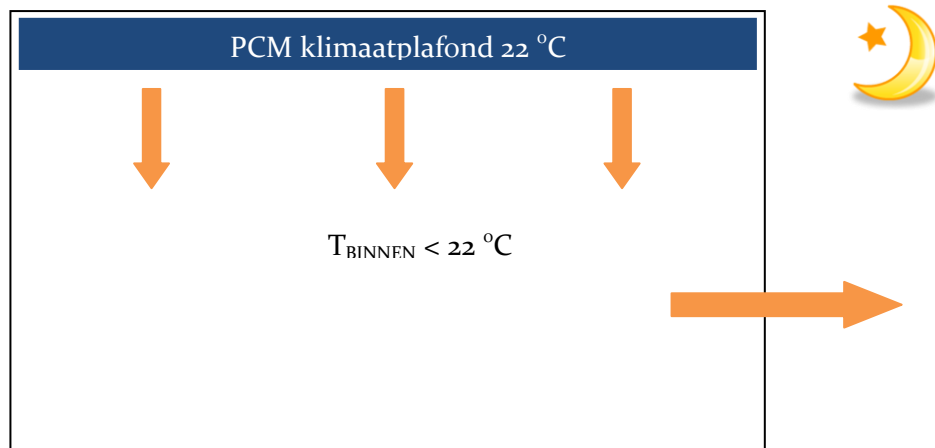
9.1 Werking concept

Als overdag in een kantoorruimte medewerkers werkzaam zijn, zullen deze fungeren als warmtebronnen. Daarnaast zijn warmtebronnen zoals licht en apparatuur aanwezig. Op warme dagen komt hier ook nog de warmtestroom vanaf buiten bij en zonnewarmte via zoninstraling. Hierdoor loopt de binnentemperatuur op wat de medewerkers een onaangenaam gevoel geeft met als gevolg dat de productiviteit afneemt. Om dit te voorkomen kan een PCM klimaatplafond worden toegepast die gaat smelten als de binnentemperatuur boven de faseovergang temperatuur van het PCM komt. Hierdoor ontstaat een warmtestroom van de ruimte naar het PCM klimaatplafond. Het PCM klimaatplafond is in deze situatie de ruimte aan het koelen. In figuur 9.0 zijn de optredende warmtestromen getekend.



Figuur 9.0: Schematische weergave van de energiestromen naar het PCM klimaatplafond tijdens koelen

Als 's avonds de medewerkers naar huis zijn, de zon niet meer schijnt en de buitentemperatuur daalt, ontstaat een warmtestroom van het PCM klimaatplafond naar de ruimte. Hierdoor gaat het PCM klimaatplafond veranderen van fase (vloeibaar naar vast). Het PCM klimaatplafond is in deze situatie de ruimte aan het verwarmen. In figuur 9.1 zijn deze optredende warmtestromen getekend.



Figuur 9.1: Schematische weergave van de energiestromen van het PCM klimaatplafond tijdens verwarmen

9.2 Dimensioneren

Om een PCM klimaatplafond te dimensioneren, dienen een warmteverliesberekening en een koellastberekening gemaakt te worden. Hieruit komt het benodigde vermogen per vierkante meter dat het kantoor op de gewenste temperatuur houdt. ISSO 48 [literatuurbron:11] geeft voor wat betreft het vermogen van klimaatplafonds voor koeling en verwarming het volgende:

- Koelen
 - $5 \cdot \Delta T$ (straling) (W/m²)
 - $2 \cdot \Delta T^{0,31} \cdot \Delta T$ (convectie) (W/m²)
- Verwarmen
 - $5,4 \cdot \Delta T$ (straling) (W/m²)
 - $0,54 \cdot \Delta T^{0,31} \cdot \Delta T$ (convectie) (W/m²)

Om bovenstaande formules in te vullen is een temperatuurverschil nodig, deze hangt af van de gewenste binnentemperatuur en de PCM smelttemperatuur.

Met behulp van onderstaande formules zijn bij mogelijk relevante temperatuurverschillen de vermogens berekend.

Koelen

In tabel 9.0 zijn voor koeling zes temperatuurverschillen, het bijbehorende vermogen en warmteoverdrachtcoëfficiënt gegeven.

$$5 \cdot \Delta T + 2 \cdot \Delta T^{0,31} \cdot \Delta T = W/m^2$$

Temperatuurverschil	Vermogen	Warmteoverdracht coëfficiënt
(K)	(W/m ²)	(W/m ² ·K)
1	7	7,0
2	15	7,5
3	24	8,0
4	32	8,0
5	42	8,3
6	51	8,5

Tabel 9.0: Koelvermogen van het PCM klimaatplafond bij een bepaald temperatuurverschil

Verwarmen

In tabel 9.1 zijn voor verwarmen zes temperatuurverschillen, het bijbehorende vermogen en warmteoverdrachtcoëfficiënt gegeven.

$$5,4 \cdot \Delta T + 0,54 \cdot \Delta T^{0,31} \cdot \Delta T = W/m^2$$

Temperatuurverschil	Vermogen	Warmteoverdracht coëfficiënt
(K)	(W/m ²)	(W/m ² ·K)
1	6	6,0
2	12	6,0
3	18	6,0
4	25	6,3
5	32	6,3
6	38	6,3

Tabel 9.1: Verwarmingsvermogen van het PCM klimaatplafond bij een bepaald temperatuurverschil

Totale warmtecapaciteit

De warmteopslagcapaciteit van het PCM moet groot genoeg zijn om een vollastdag in de zomer aan te kunnen. Dit betekent dat het vollast vermogen wordt vermenigvuldigd met het aantal bedrijfsuren. In formulevorm is dit als volgt:

$$\text{Warmteopslagcapaciteit (kWh)} = \frac{\text{vollastvermogen (kW)}}{\text{bedrijfsuren (h)}}$$

Toegepast in referentiekantoor

Als het voorgaande wordt toegepast op het referentiekantoor is dit als volgt:

- Gewenste koelvermogen = 57 W/m²
- Oppervlak gekoeld door PCM klimaatplafond = 1040 m²
- Beleggingsgraad PCM klimaatplafond* = 90 %
- Oppervlak PCM klimaatplafond = 936 m²
- Totaal benodigd koelvermogen = 59000 W
- Koelvermogen primaire lucht (5 m³/h.m²) = 17500 W
- Te koelen met PCM klimaatplafond = 41500 W
- Bedrijfsuren = 10 uur
- Maximum binnentemperatuur = 26 °C

* Het beschikbare plafond oppervlakte wordt niet helemaal benut i.v.m. verlichting etc.

Opslagcapaciteit

De opslagcapaciteit bedraagt 41,5 kW · 10 uur = 415 kWh om een gehele werkdag te koelen.

In het referentiekantoor hangt 936 m² PCM klimaatplafond waarvan is gegeven:

- 10 dm³/m²
- 0,09 kWh/dm³

Met deze gegevens is het mogelijk te berekenen hoelang het PCM klimaatplafond 41,5 kW kan leveren voordat het PCM verzadigd is.

$$936 \text{ m}^2 \cdot 10 \text{ dm}^3/\text{m}^2 = 9360 \text{ dm}^3$$

$$9360 \text{ dm}^3 \cdot 0,09 \text{ kWh/dm}^3 = 842 \text{ kWh}$$

$$\frac{842 \text{ kWh}}{42 \text{ kW}} = 20 \text{ h}$$

Het PCM klimaatplafond kan bij een beleggingsgraad van 90 % en een vermogen van 42 kW, 20 uur koelen zonder verzadigd te raken.

Koelvermogen

Het benodigde koevermogen bedraagt $\frac{59000 \text{ W} - 17500 \text{ W}}{0,9 \cdot 1040 \text{ m}^2} = 44,5 \text{ W/m}^2$.

In de eerder gegeven vermogens ten behoeve van koelen bij een bepaald temperatuurverschil is af te lezen dat dit vermogen wordt behaald met een temperatuursverschil van 6 °C. Een temperatuursverschil van 6 °C houdt in dit geval in dat een PCM-20 (26 °C- 6 °C) gebruikt moet worden. Een PCM-20 heeft meer dan 150 GTO uren, wat er voor zorgt dat deze niet geschikt is in deze situatie.

9.3 Simulatie PCM klimaatplafond

Voor het bepalen van de werking van het PCM klimaatplafond is een simulatie gemaakt met behulp van MS Excel voor het hele jaar (52 weken/12 maanden: januari t/m december).

De simulatie werkt met een tijdsinterval van één uur. De invoervariabelen veranderen per uur. Hierdoor wordt ieder uur de uitvoer berekend. De berekening is dynamisch, omdat de uitvoer van voorgaand uur wordt gebruikt als invoer voor het opvolgende uur.

De beïnvloedbare invoervariabelen zijn de opslagcapaciteit PCM, smelttemperatuur en de thermische gebouwmassa van het PCM. De **opslagcapaciteit PCM** geeft de hoeveelheid energie aan die maximaal opgeslagen kan worden. Dit is afhankelijk van de hoeveelheid PCM die toegepast wordt. De **smelttemperatuur** is te beïnvloeden, omdat er bij de aanschaf gekozen kan worden tussen verschillende temperaturen. De **thermische gebouwmassa** is tijdens de bouw te beïnvloeden door te kiezen voor bepaalde bouwmaterialen. Er kan zo, 'zwaar', 'gemiddeld' en 'licht' gebouwd worden.

Onbeïnvloedbare variabelen zijn de bedrijfsbezetting, buitentemperatuur, externe- en interne warmtelast, inblaastemperatuur, transmissieverliezen, warmteoverdracht en het verwarmingsvermogen. De **bedrijfsbezetting** is per uur verschillend en geeft de mate van bezetting aan. De **buitentemperatuur** is per uur verschillend op basis van het referentiejaar 1964/1965. De **interne warmtelast** is afhankelijk van de bedrijfsbezetting, deze varieert van nul 's nachts tot een piek overdag. De **externe warmtelast** is afhankelijk gemaakt van de buitentemperatuur [literatuurbron:12]. Het vermogen is bepaald volgens de revisie [literatuurbron:8]. De **inblaastemperatuur** wordt in deze simulatie volgens een vast setpoint geregeld. De **transmissie- en infiltratieverliezen** zijn afhankelijk van het verschil tussen de

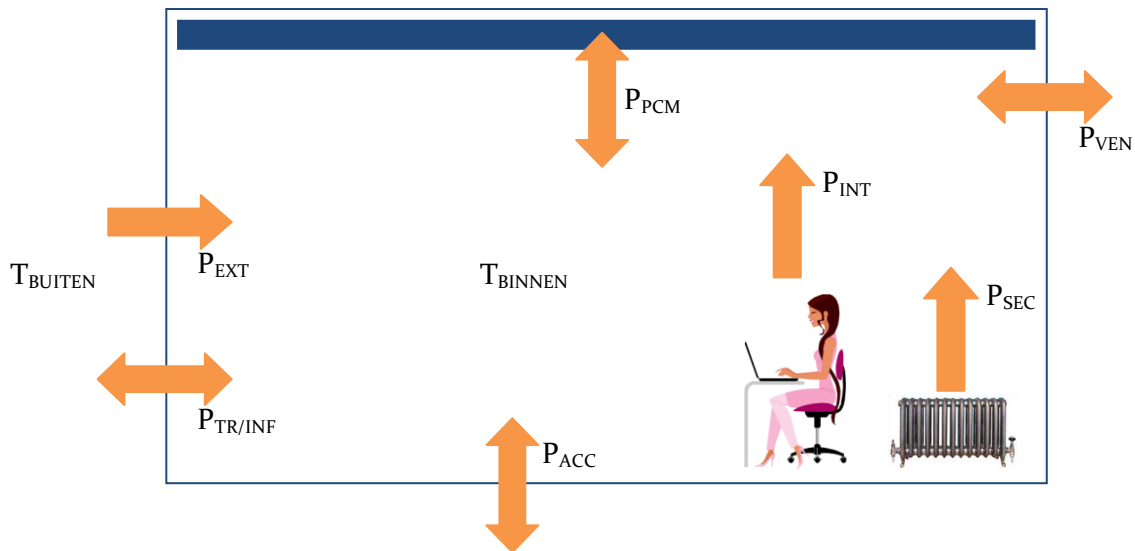
binnen- en buitentemperatuur. De **warmteoverdracht** geeft aan hoeveel warmte het PCM afgeeft aan de ruimte afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de PCM smelttemperatuur en de binnentemperatuur. Het **verwarmingsvermogen** is afhankelijk van de binnentemperatuur en gaat vermogen leveren als deze onder het setpoint zakt.

Onder relevante uitvoer vallen de binnentemperatuur, GTO-uren, maximale binnentemperatuur, TO-uren, koelbatterij, PCM koelen, PCM totaal, PCM verwarmen, secundaire verwarming, verwarmingsbatterij en vollastcycli. De **binnentemperatuur** is afhankelijk van het netto vermogen dat aan de ruimte geleverd wordt. Is deze positief dan stijgt de temperatuur, is deze negatief dan daalt de temperatuur. Het aantal **GTO-uren** is afhankelijk van het aantal uur dat een $PMV=0,5$ overschreden wordt. Hoe hoger de overschrijding, hoe zwaarder dat uur gewogen wordt. De **maximale binnentemperatuur** is de hoogste temperatuur die in een jaar bereikt wordt. De TO-uren zijn de uren waren de binnentemperatuur zich boven de $25,5\text{ °C}$ bevindt. **Koelbatterij** geeft aan hoeveel vermogen de conventionele koelbatterij moet leveren om de ingestelde temperatuur te bereiken. **PCM koelen** laat zien hoeveel koelvermogen het PCM levert. **PCM totaal** geeft aan hoeveel het PCM totaal aan energie uitwisselt met de ruimte. **PCM verwarmen** laat zien hoeveel het PCM aan verwarmingsvermogen levert. **Secundaire verwarming** geeft aan hoeveel er door een conventionele verwarming aan vermogen geleverd moet worden om de ingestelde temperatuur te bereiken. **Verwarmingsbatterij** laat zien hoeveel de conventionele verwarmingsbatterij aan vermogen levert om de gewenste inblaastemperatuur te bereiken. **Vollastcycli** wordt gegeven door PCM totaal te delen door de uitgewisselde energie bij één cycli (smelten-stollen).

In **bijlage K** zijn de in- en uitvoer weergegeven in het eindblad van de simulatie.

Opbouw simulatie PCM klimaatplafond

Voor het evalueren van de effecten van het PCM klimaatplafond is een simulatie uitgevoerd op basis van de energiebalans die schematisch weergegeven is in figuur 9.2.



Figuur 9.2: Energiebalans kantoor

			<u>Afhankelijk van</u>
P_{PCM}	Vermogen PCM	$W/m^2 \cdot K$	$T_{PCM} - T_{BINNEN}$
$P_{TR/INF}$	Vermogen transmissie/infiltratie	$W/m^2 \cdot K$	$T_{BUITEN} - T_{BINNEN}$
P_{VEN}	Vermogen ventilatie	$W/m^2 \cdot K$	$T_{VENTILATIE} - T_{BINNEN}$
P_{ACC}	Vermogen accumulerend	$W/m^2 \cdot K$	$T_{MASSA} - T_{BINNEN}$
P_{EXT}	Vermogen extern	$W/m^2 \cdot K$	Zoninstraling
P_{INT}	Vermogen intern	W/m^2	Bezetting
P_{SEC}	Vermogen secundair	W/m^2	$T_{BINNEN} < T_{SETPOINT}$
$P_{PCM} + P_{TR/INF} + P_{ACC} + P_{EXT} + P_{INT} + P_{SEC} = (m \cdot c) \cdot \Delta T_{BINNEN}$			

De simulatie is opgesteld in MS Excel. De invoer voor de buitentemperatuur is gegeven in [literatuurbron:9]. Gekozen is voor een interval van één uur om zo een werkbare simulatie te creëren. De invoer parameters zijn gehaald uit een VABI warmteverlies- en koellastberekening. Het beoogde doel van deze simulatie is om inzicht te geven in de effecten die verschillen ontwerp variabelen hebben. Daarnaast wordt een schatting gegeven van de energiebesparing.

Uitvoer simulatie

In tabel 9.2, 9.3 en 9.4 is de uitvoer van de simulatie weergegeven. 'Laag-gemiddeld-hoog' staat voor een plaatdikte van respectievelijk 0,5 cm, 1 cm en 1,5 cm. Hierdoor varieert de inhoud van een PCM plaat, waardoor verschillen te zien zijn in de uitvoer van de simulatie.

Smelttemperatuur	Maximale binnentemperatuur			Binnentemperatuur >25,5 °C		
(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(h)	(h)	(h)
	laag	gemiddeld	hoog	laag	gemiddeld	hoog
15	31,6	31,6	31,6	622	622	622
16	31,6	31,6	31,6	614	614	614
17	31,6	31,6	31,6	499	499	499
18	31,6	31,6	31,6	380	380	380
19	31,6	31,6	31,6	316	307	286
20	31,0	31,0	31,0	176	164	164
21	30,9	30,9	30,9	112	97	81
22	30,8	30,2	28,4	131	124	116
23	29,2	28,3	27,4	272	268	262
24	27,7	27,7	27,7	413	412	412
25	28,4	28,4	28,4	525	525	525
26	29,0	29,0	29,0	559	559	559
27	29,7	29,7	29,7	610	610	610
28	30,2	30,2	30,2	643	643	643
29	30,7	30,7	30,7	640	640	640
30	31,1	31,1	31,1	630	630	630
GEEN PCM	31,6			622		

Onwenselijk

Wenselijk

Tabel 9.2: Maximum binnentemperatuur en aantal uur boven 25,5 °C bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM

In tabel 9.2 is de maximale binnentemperatuur uitgezet als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit. Temperaturen onder de 30 °C zijn wenselijk (oranje) en temperaturen daarboven onwenselijk (blauw). Dit onderscheid is gemaakt aangezien de ARBO aangeeft dat er maatregelen getroffen dienen te worden als de binnentemperatuur boven deze temperatuur komt.

Daarnaast zijn het aantal uren boven de 25,5 °C (TO-uren) weergegeven als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit. 150 is als grens bepaald in de revisie van Kuijpers. Waarden daaronder zijn wenselijk (oranje) en waarden daarboven onwenselijk (blauw).

Smelttemperatuur	Q,verwarmen (conventioneel)			Q,PCM		
(°C)	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²
	laag	gemiddeld	hoog	laag	gemiddeld	hoog
15	128	129	130	2	3	5
16	136	137	138	17	18	20
17	139	140	141	43	45	47
18	131	132	133	82	84	85
19	117	116	116	103	106	109
20	115	114	114	84	86	86
21	115	114	114	58	60	62
22	118	118	117	44	46	47
23	121	121	121	32	33	34
24	123	123	123	24	24	24
25	125	125	125	16	16	16
26	126	126	126	11	11	11
27	126	126	126	7	7	7
28	126	126	126	3	3	3
29	126	126	126	2	2	2
30	126	126	126	1	1	1
GEEN PCM	127			0		

Onwenselijk

Wenselijk

Tabel 9.3: Conventionele verwarmingsenergie en de uitgewisselde energie per m² bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM

In tabel 9.3 is de benodigde verwarmingsenergie (Q,verwarmen) uitgezet als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit. Een lagere waarde dan bij een concept zonder PCM is wenselijk (oranje) en een waarde hoger als onwenselijk (blauw).

Daarnaast is de hoeveelheid energie die het PCM uitwisselt weergegeven als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit.

Smelttemperatuur	GTO-uren			Vollast Cycli/jaar		
(°C)	(h)	(h)	(h)	aantal	aantal	aantal
	laag	gemiddeld	hoog	laag	gemiddeld	hoog
15	1071	1071	1071	2	2	2
16	1038	1038	1038	20	11	8
17	763	763	763	52	27	19
18	640	640	640	98	50	34
19	512	504	484	124	64	44
20	308	301	301	101	51	35
21	233	204	152	70	36	25
22	170	121	89	53	27	19
23	206	185	176	39	20	14
24	314	314	314	29	14	10
25	469	469	469	19	10	6
26	645	645	645	13	6	4
27	860	860	860	8	4	3
28	964	964	964	4	2	1
29	1085	1085	1085	2	1	1
30	1113	1113	1113	1	1	0
GEEN PCM	1071			0		

Onwenselijk

Wenselijk

Tabel 9.4: Aantal GTO-uren en cycli bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM

In tabel 9.4 is het aantal GTO-uren uitgezet als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit. Een waarde onder de 250 is wenselijk (oranje) en een waarde daarboven onwenselijk (blauw). Dit omdat tot 250 uur nog onder acceptabel valt volgens de Rijksgebouwendienst.

Daarnaast is het aantal vollastcycli weergegeven als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit.

Effect ontwerpvariabelen

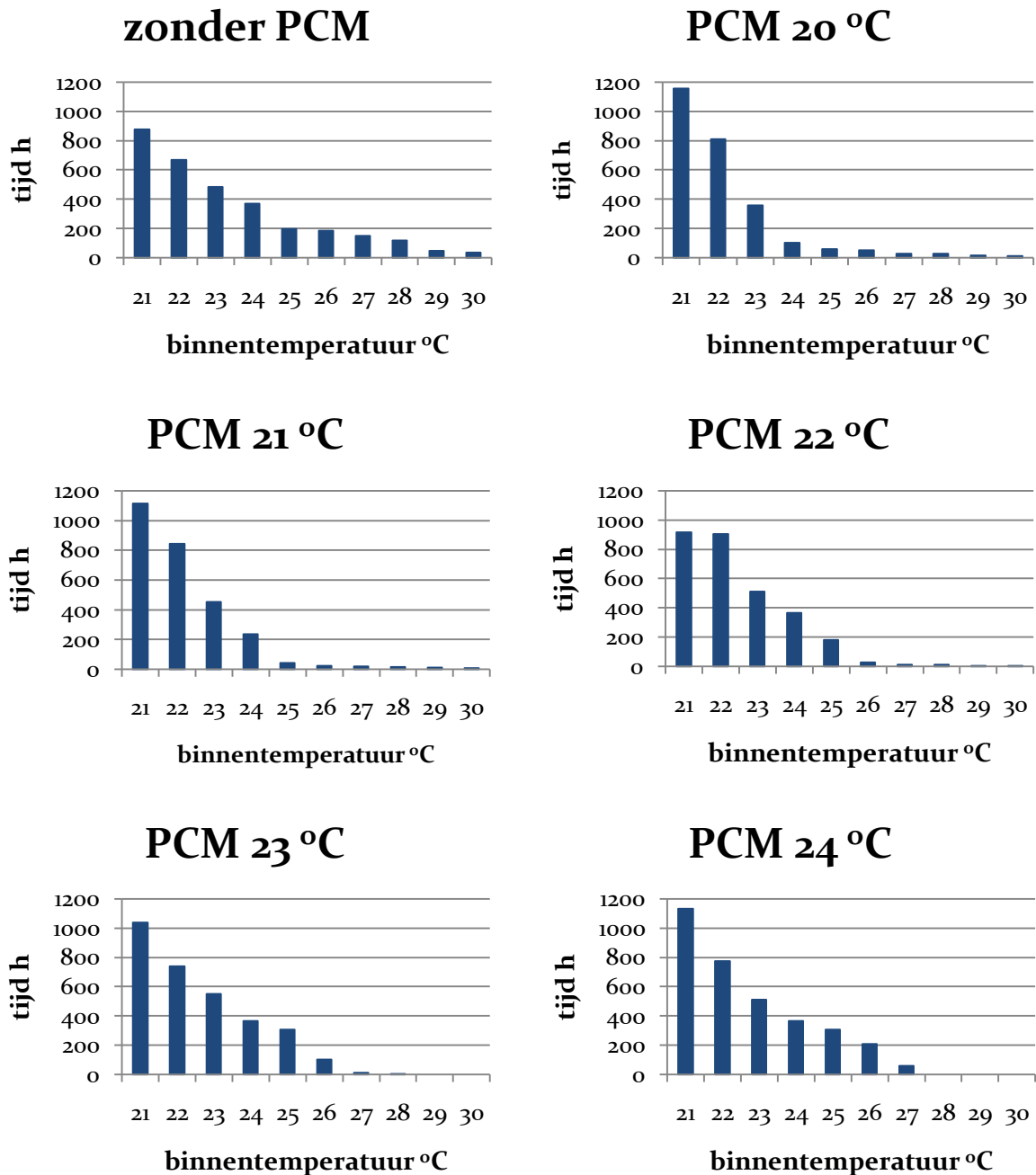
In tabel 9.5 is de gunstigste smelttemperatuur te zien voor verschillende variabelen. Ook is de grens aangegeven waaraan de variabelen minimaal moeten voldoen.

Uitvoervariabele	Grens	Smelttemperatuur
Minimaal aantal GTO-uren	<250 h	22 °C
Zo laag mogelijke maximale binnentemperatuur	<30 °C	24 °C
Zo min mogelijk conventioneel verwarmingsvermogen	<referentie	20,21 °C
Maximale energie uitwisseling van het PCM	>0 kWh	19 °C
Minimaal aantal uren boven de 25,5 °C	<150 h	21 °C
Maximaal aantal vollastcycli	>0 stuks	19 °C

Tabel 9.5: Gunstigste smelttemperatuur voor een bepaalde variabele in de simulatie

Grafieken uitvoer simulatie

In figuur 9.3 is het aantal uren weergegeven dat de ruimte een bepaalde temperatuur heeft. Op de horizontale as is de binnentemperatuur in °C gegeven en op de verticale as het aantal uren dat dit voorkomt per jaar.



Figuur 9.3: Uren dat een bepaalde binnentemperatuur heerst per jaar afhankelijk van de smelttemperatuur van het PCM.

9.4 Kosten-batenanalyse

Voor het bepalen van de meer- of minderinvestering en de variabele kosten wordt gekeken naar de complete werktuigbouwkundige installatie. Ten eerste wordt de investering berekend met een installatie zoals het referentiekantoor heeft, met een bron in combinatie met warmtepomp. Daarna wordt de investering berekend voor een eenvoudiger concept met een koelmachine in combinatie met een ketel. Vervolgens worden de eventuele opbrengsten berekend in 15 jaar met tussenstappen van vijf jaar. De rekensheet is te zien in **bijlage J**.

PCM in combinatie met een bron/warmtepomp installatie

Tabel 9.6 is een overzicht van de investeringskosten onderverdeeld per kostengroep.

Kostengroep	Toelichting	Met PCM	Zonder PCM	Vershil
Koeling	opwekking	€ 24.600,00	€ 57.500,00	-€ 32.900,00
Koeling	distributie	€ 0,00	€ 41.100,00	-€ 41.100,00
Plafondsysteem	klimaatplafond	€ 178.000,00	€ 112.000,00	€ 66.000,00
Verwarming	opwekking	€ 19.200,00	€ 21.000,00	-€ 1.800,00

Tabel 9.6: Investeringskosten PCM i.c.m. bron

Dit resulteert in een minderinvestering van **€9.800,-** bij het toepassen van het PCM klimaatplafond concept op de totale som van **€439.200,-**. Dit betekent **2,2 %** van de totale aanneemsom.

Variabele kosten

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor verwarmen, staan voor beide concepten in tabel 9.7.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
123.000 kWh	132.000 kWh	9.000 kWh
31.000 kWh(e)	33.000 kWh(e)	2.000 kWh(e)
€8.370,-	€8.910,-	€540,-

Tabel 9.7: Kosten verwarmen bij gelijkblijvende energieprijzen

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor koelen, staan voor beide concepten in tabel 9.8.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
13.500 kWh	23.500 kWh	10.000 kWh
180 kWh(e)	310 kWh(e)	130 kWh(e)
€49,-	€84,-	€35,-

Tabel 9.8: Kosten koelen bij gelijkblijvende energieprijzen

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor ventilatie, staan voor beide concepten in tabel 9.9.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
6.470 kWh	4.590 kWh	1.880 kWh
6.470 kWh(e)	4.590 kWh(e)	1.880 kWh(e)
€1.747,-	€1.239,-	€508,-

Tabel 9.9: Kosten ventilatie bij gelijkblijvende energieprijzen

Terugverdientijd

Aangezien het om een minderinvestering gaat die ook in energieverbruik goedkoper is, is er geen terugverdientijd.

Opbrengst

De opbrengst van het concept met PCM tegenover het concept zonder PCM zonder energieprijsstijging staat in tabel 9.10.

Na 0 jaar	€9.800,-
Na 5 jaar	€10.068,-
Na 10 jaar	€10.403,-
Na 15 jaar	€10.738,-

Tabel 9.10: Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met huidige energieprijis

De opbrengst van het concept met PCM tegenover het concept zonder PCM met 6 % energieprijsstijging staat in tabel 9.11.

Na 0 jaar	€9.800,-
Na 5 jaar	€10.093,-
Na 10 jaar	€10.570,-
Na 15 jaar	€11.208,-

Tabel 9.11: Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met energieprijsstijging van 6 % per jaar

PCM in combinatie met koelmachine/ketel installatie

In tabel 9.12 is een overzicht gegeven van de investeringskosten onderverdeeld per kostengroep.

Kostengroep	Toelichting	Met PCM	Zonder PCM	Vershil
Koeling	opwekking	€ 14.600,00	€ 33.800,00	-€ 19.200,00
Koeling	distributie	€ 0,00	€ 41.100,00	-€ 41.100,00
Plafondsysteem	klimaatplafond	€ 178.000,00	€ 112.000	€ 66.000,00

Tabel 9.12: Investeringskosten PCM i.c.m. koelmachine

Dit resulteert in een meerinvestering van **€5.700,-** bij het toepassen van het PCM klimaatplafond concept op de totale som van **€417.300,-**. Dit betekend **1,4 %** van de totale aanneemsom.

Variabele kosten

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor verwarmen staan gegeven in tabel 9.13.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
123.000 kWh	132.000 kWh	9.000 kWh
13.977 m ³	15.000 m ³	1.023 m ³
€10.623,-	€11.400,-	€777,-

Tabel 9.13: Kosten verwarmen bij gelijkblijvende energieprijzen

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor koelen staan gegeven in tabel 9.14.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
13.500 kWh	23.500 kWh	10.000 kWh
3.375 kWh(e)	5.875 kWh(e)	2.500 kWh(e)
€911,-	€1.586,-	€675,-

Tabel 9.14: Kosten koelen bij gelijkblijvende energieprijzen

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor ventilatie staan gegeven in tabel 9.15.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
6.470 kWh	4.590 kWh	1.880 kWh
6.470 kWh(e)	4.590 kWh(e)	1.880 kWh(e)
€1.747,-	€1.239,-	€508,-

Tabel 9.15: Kosten ventilatie bij gelijkblijvende energieprijzen

Terugverdientijd

De terugverdientijd van het concept met PCM tegenover zonder is **zes jaar**.

Opbrengst

Opbrengst van het concept met PCM tegenover het concept zonder PCM zonder energieprijsstijging staat gegeven in tabel 9.16.

Na 0 jaar	-€5.700,-
Na 5 jaar	-€1.900,-
Na 10 jaar	€2.800,-
Na 15 jaar	€7.500,-

Tabel 9.16: Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met huidige energieprijis

Opbrengst van het concept met PCM tegenover het concept zonder PCM met 6 % energieprijsstijging staat gegeven in tabel 9.17.

Na 0 jaar	-€5.700,-
Na 5 jaar	-€1.600,-
Na 10 jaar	€5.100,-
Na 15 jaar	€14.100,-

Tabel 9.17: Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met energieprijsstijging van 6 % per jaar

9.5 Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van het PCM klimaatplafond zijn weergegeven in tabel 9.18.

Voordelen	Nadelen
Cradle 2 Cradle Het is mogelijk om het PCM klimaatplafond C2C uit te voeren.	Minder bedrijfszekerheid Doordat de PCM's 100 % kunnen smelten en dan niet meer functioneren.
Energieverbruikreductie Gecombineerd wordt het energieverbruik voor koelen en verwarmen teruggebracht met maximaal 7 %.	Minder comfort Er is met PCM klimaatplafond een lager comfort niveau te halen dan met een conventionele installatie.
Investeringskosten De investering is kostenneutraal of een beperkte meerinvestering.	Niet beïnvloedbaar De PCM klimaatplafond zijn niet te regelen naar een bepaald vermogen en temperatuur.
Minder onderhoud Doordat de installatie kleiner wordt neemt het onderhoud af.	
Terugverdientijd Geen of zeer beperkte terugverdientijd.	
Vereenvoudigde installatie De installatie bevat minder onderdelen zoals leidingwerk, regelkleppen etc.	
Vermogensreductie koeling Het opwekkingsvermogen dat opgesteld dient te worden ten behoeve van koeling, wordt teruggebracht met 70 %.	

Tabel 9.18: Voor- en nadelen van het PCM klimaatplafond

9.6 Conclusie PCM klimaatplafond

In relatie tot de hoofdvraag kan geconcludeerd worden dat het concept PCM klimaatplafond rendabel is zowel in combinatie met een bron als met een koelmachine.

Uit de berekeningen blijkt dat het mogelijk is een ruimte te koelen met een PCM klimaatplafond als er ruime grenzen gesteld worden aan het comfort niveau en de koellast wordt beperkt. Verwarmen met PCM is een bijkomend effect, maar zo gering dat hier geen rekening mee gehouden moet worden bij het dimensioneren.

Voor de koeling wordt het PCM klimaatplafond bepaald volgens de koellastberekening NEN 5066. Voor verwarmen moet het vermogen dat het PCM klimaatplafond levert niet meegenomen worden aangezien deze dit niet met zekerheid altijd kan leveren.

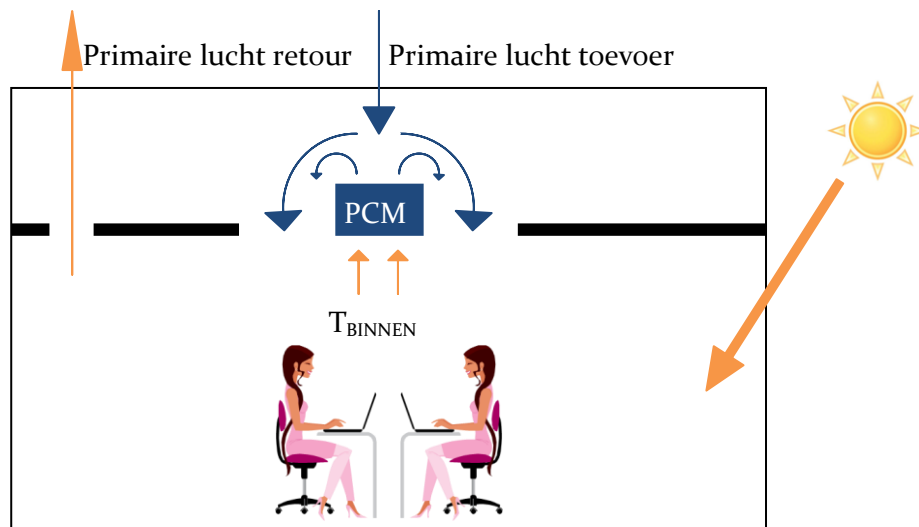
Uit de simulatie blijkt bij een te lage smelttemperatuur (20 °C of lager) de GTO-uren te boven de gewenste uren oplopen doordat het PCM niet meer gestold raakt 's nachts en het PCM overdag te snel smelt. Ook bij een te hoge smelttemperatuur (24 °C of hoger) lopen de GTO-uren te hoog op omdat het PCM pas gaat smelten bij een te hoge binnentemperatuur. Qua maximale binnentemperatuur loopt het wenselijke gebied van de smelttemperatuur van 23 °C tot en met 27 °C. Dit met dezelfde oorzaak van de beperkingen als de GTO-uren. Bij een smelttemperatuur van 19 °C is het PCM het meest actief omdat de binnentemperatuur het meest effectief om deze temperatuur heen slingert. Een groter gekozen maximale opslagcapaciteit van het PCM heeft een gunstig effect op zowel de GTO-uren, de maximale binnentemperatuur en het PCM gebruik. Dit zorgt echter voor minder vollastcycli en hogere investering.

De investeringskosten anno 2010 liggen nagenoeg gelijk aan een conventioneel concept. De besparing op de energiekosten voor koeling bedraagt 43 % en voor verwarming 7 % tegenover een conventioneel concept. De totale besparing voor koelen en verwarmen met de extra ventilatie meegerekend komt neer op 1 % in combinatie met een bron/warmtepomp. Bij een koelmachine/ketel is dit 7 %. Er is geen terugverdientijd in combinatie met een bron/warmtepomp omdat de investering en variabele kosten lager liggen dan bij een conventioneel concept. De terugverdientijd in combinatie met een koelmachine/ketel komt neer op circa zes jaar. De opbrengsten na tien jaar bedragen ruim tienduizend euro als gebruik wordt gemaakt van een bron/warmtepomp en een kleine drieduizend euro met een koelmachine/ketel.

10 Concept: PCM inductie-unit

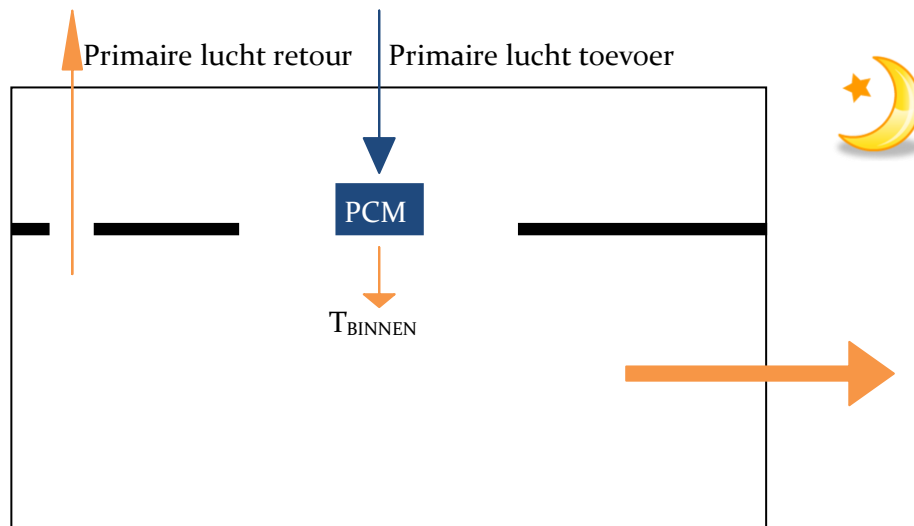
10.1 Werking concept

Overdag wordt voorgekoelde primaire lucht ingeblazen in de ruimte. Door het ontstaan van onderdruk in het inductierooster wordt secundaire lucht vanuit de ruimte over het PCM gezogen. Als gevolg hiervan wordt de ruimte gekoeld en slaat het PCM warmte op vanuit de ruimte door van aggregatietoestand te veranderen (smelten). De hoeveelheid ingeblazen primaire lucht wordt retour afgezogen. In figuur 10.0 is dit schematisch weergegeven.



Figuur 10.0: Schematische weergave van de energiestromen naar de PCM inductie-unit tijdens koelen

Als 's nachts de interne warmtebronnen zijn verdwenen, de zon niet meer schijnt en de buitentemperatuur lager ligt dan de binnentemperatuur wordt de primaire lucht rechtstreeks over het PCM geblazen. Het PCM verwarmd de lucht door warmte af te staan door van aggregatietoestand te veranderen (stollen). Hierdoor wordt in koudere perioden van het jaar ook nog eens de ruimte verwarmt als de binnentemperatuur onder de smelttemperatuur van het PCM zakt. In figuur 10.1 is dit schematisch weergegeven.



Figuur 10.1: Schematische weergave van de energiestromen van de PCM inductie-unit tijdens verwarmen

10.2 Dimensioneren

Het dimensioneren van de PCM inductie-units kan nadat de koellast e.d. bekend zijn op twee manieren gedaan worden. Eén mogelijkheid is om dit te doen op basis van de benodigde luchthoeveelheid. De tweede mogelijkheid is om dit te doen op basis van het gewenste koelvermogen. In deze scriptie wordt gekeken naar de PCM inductie-units, waarvan de specificaties te vinden zijn in **bijlage J**. Er wordt gebruikt gemaakt van de gegevens die via de leverancier hiervan verkregen zijn.

De grootste PCM inductie-unit die volgens de eerder genoemde specificaties leverbaar is, bestaat uit 24 platen PCM en is gebaseerd op een volumedebiet lucht van 75 m³/h.

De primaire inblaaslucht van 75 m³/h zorgt voor een koelvermogen van 250 W bij een inblaastemperatuur van 16 °C. De 24 platen PCM zorgen voor een koelvermogen van 200 W. Dit zorgt voor een totaal koelvermogen van 450 W per PCM inductie-unit.

In één plaat zit 3 kg PCM, wat bij de grootste PCM inductie-unit zorgt voor een totaal van 72 kg PCM. Dit staat voor $\frac{72 \text{ kg}}{1,5 \text{ kg/dm}^3} = 48 \text{ dm}^3$. De totale warmtecapaciteit van het PCM bedraagt $48 \text{ dm}^3 \cdot 0,09 \text{ kWh/dm}^3 = 4,3 \text{ kWh}$.

Toegepast in referentiekantoor (kantine)*Gegeven:*

Benodigd koelvermogen:	4750	W
Koelvermogen per PCM inductie-unit(50):	350	W
Koelvermogen per PCM inductie-unit(75):	450	W
Benodigde luchtdebiet:	1080	m ³ /h
Luchtdebiet per PCM inductie-unit(50):	50	m ³ /h
Luchtdebiet per PCM inductie-unit(75):	75	m ³ /h

Hiermee is het aantal benodigde PCM inductie-units te berekenen. Als eerst wordt dit gedaan op basis van de hoeveelheid inblaaslucht.

- Bij een PCM inductie-unit(50): $\frac{1080 \text{ m}^3/\text{h}}{50 \text{ m}^3/\text{h}} = 22$ units. 22 units zorgen voor een koelvermogen van $22 \cdot 350 \text{ W} = 7,7 \text{ kW}$. Dit is genoeg koelvermogen voor deze ruimte.
- Bij een PCM inductie-unit(75): $\frac{1080 \text{ m}^3/\text{h}}{75 \text{ m}^3/\text{h}} = 15$ units. 15 units zorgen voor een koelvermogen van $15 \cdot 450 \text{ W} = 6,75 \text{ kW}$. Dit is genoeg koelvermogen voor deze ruimte.

Als de PCM inductie-units berekend worden op basis van het gewenste koelvermogen, ziet dit er als volgt uit.

- Bij een PCM inductie-unit(50): $\frac{4750 \text{ W}}{350 \text{ W}} = 14$ units. 14 units realiseren een volumedebiet lucht van $14 \cdot 50 \text{ m}^3/\text{h} = 700 \text{ m}^3/\text{h}$. Dit is te weinig om aan de gestelde eisen te voldoen, de PCM inductie-units zullen daarom op basis van de hoeveelheid inblaaslucht gedimensioneerd worden.
- Bij een PCM inductie-unit(75): $\frac{4750 \text{ W}}{450 \text{ W}} = 11$ units. 11 units realiseren een volumedebiet lucht van $11 \cdot 75 \text{ m}^3/\text{h} = 825 \text{ m}^3/\text{h}$. Dit is te weinig om aan de gestelde eisen te voldoen, de PCM inductie-units zullen daarom op basis van de hoeveelheid inblaaslucht gedimensioneerd worden.

Voor de toepassing in het referentiekantoor wordt gekozen voor de PCM inductie-unit(75) gedimensioneerd op het luchtdebiet. De units zorgen dan gezamenlijk voor een koelvermogen van 6,75 kW, wat genoeg is om aan de gestelde eisen te voldoen. De opslagcapaciteit bedraagt totaal $15 \cdot 4,3 \text{ kWh} = 64,5 \text{ kWh}$. De PCM platen in deze unit leveren 200 W, dat voor een totaal

van $15 \cdot 200 \text{ W} = 3 \text{ kW}$ zorgt. Dit betekent dat $\frac{64,5 \text{ kWh}}{3 \text{ kW}} = 21,5$ uur het maximale vermogen geleverd kan worden.

10.3 Simulatie PCM inductie-unit

Voor de PCM inductie-unit is een simulatie gemaakt met behulp van MS Excel voor het gehele jaar (52 weken/12 maanden: januari t/m december).

De simulatie werkt met een tijdsinterval van één uur. De invoervariabelen veranderen per uur. Hierdoor wordt ieder uur de uitvoer berekend. De berekening is dynamisch, omdat de uitvoer van voorgaand uur wordt gebruikt als invoer voor het opvolgende uur.

De beïnvloedbare invoervariabelen zijn de smelttemperatuur en de thermische gebouwmassa van het PCM. De **smelttemperatuur** is te beïnvloeden, omdat er bij de aanschaf gekozen kan worden tussen verschillende temperaturen. De **thermische gebouwmassa** is tijdens de bouw te beïnvloeden door te kiezen voor bepaalde bouwmaterialen. Er kan zo, ‘zwaar’, ‘gemiddeld’ en ‘licht’ gebouwd worden.

Onbeïnvloedbare invoervariabelen zijn de opslagcapaciteit PCM, de bedrijfsbezetting, buitentemperatuur, externe- en interne warmtelast, inblaastemperatuur, transmissieverliezen, warmteoverdracht en het verwarmingsvermogen. De **opslagcapaciteit PCM** geeft de hoeveelheid energie aan die maximaal opgeslagen kan worden. Dit is afhankelijk van de hoeveelheid PCM die toegepast wordt. De **bedrijfsbezetting** is per uur verschillend en laat de mate van bezetting zien. De **buitentemperatuur** is per uur verschillend op basis van het referentiejaar 1964/1965. De **interne warmtelast** is afhankelijk van de bedrijfsbezetting, deze varieert van nul 's nachts tot een piek overdag. De **externe warmtelast** is afhankelijk gemaakt van de buitentemperatuur [literatuurbron:12]. Het vermogen is bepaald volgens de revisie [literatuurbron:8]. De **inblaastemperatuur** wordt in deze simulatie volgens een vast setpoint geregeld. De **transmissieverliezen** zijn afhankelijk van het verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur. De **warmteoverdracht** geeft aan hoeveel warmte het PCM afgeeft aan de ruimte afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de PCM smelttemperatuur en de binnentemperatuur. Het **verwarmingsvermogen** is afhankelijk van de binnentemperatuur en gaat vermogen leveren als deze onder het setpoint zakt.

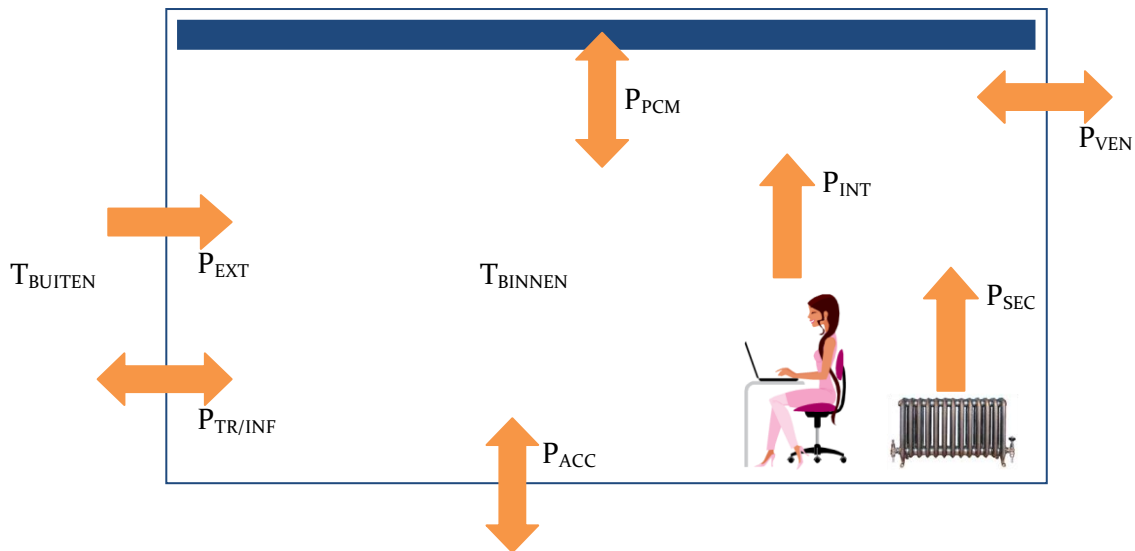
Onder relevante uitvoer vallen de binnentemperatuur, GTO-uren, maximale binnentemperatuur, TO-uren, koelbatterij, PCM koelen, PCM totaal, PCM verwarmen, secundaire verwarming, verwarmingsbatterij en vollastcycli. De **binnentemperatuur** is

afhankelijk van het netto vermogen dat aan de ruimte geleverd wordt. Is deze positief dan stijgt de temperatuur, is deze negatief dan daalt de temperatuur. Het aantal **GTO-uren** is afhankelijk van het aantal uur dat een $PMV=0,5$ overschreden wordt. Hoe hoger de overschrijding, hoe zwaarder dat uur gewogen wordt. De **maximale binnentemperatuur** is de hoogste temperatuur die in een jaar bereikt wordt. De TO-uren zijn de uren waarin de binnentemperatuur zich boven de $25,5\text{ °C}$ bevindt. **Koelbatterij** geeft aan hoeveel vermogen de conventionele koelbatterij moet leveren om de ingestelde temperatuur te bereiken. **PCM koelen** laat zien hoeveel koelvermogen het PCM levert. **PCM totaal** geeft aan hoeveel het PCM totaal aan energie uitwisselt met de ruimte. **PCM verwarmen** laat zien hoeveel het PCM aan verwarmingsvermogen levert. **Secundaire verwarming** geeft aan hoeveel er door een conventionele verwarming aan vermogen geleverd moet worden om de ingestelde temperatuur te bereiken. **Verwarmingsbatterij** laat zien hoeveel de conventionele verwarmingsbatterij aan vermogen levert om de gewenste inblaastemperatuur te bereiken. **Vollastcycli** wordt gegeven door PCM totaal te delen door de uitgewisselde energie bij één cycli (smelten-stollen).

In **bijlage L** zijn de in- en uitvoer weergegeven in het eindblad van de simulatie.

Opbouw simulatie PCM inductie-unit

Voor het evalueren van de effecten van de PCM inductie-unit is een simulatie uitgevoerd op basis van de energiebalans die schematisch is weergegeven in figuur 10.2.



Figuur 10.2: Energiebalans kantoor

			<u>Afhankelijk van</u>
P_{PCM}	Vermogen PCM	$W/m^2 \cdot K$	$T_{PCM} - T_{BINNEN}$
$P_{TR/INF}$	Vermogen transmissie/infiltratie	$W/m^2 \cdot K$	$T_{BUITEN} - T_{BINNEN}$
P_{VEN}	Vermogen ventilatie	$W/m^2 \cdot K$	$T_{VENTILATIE} - T_{BINNEN}$
P_{ACC}	Vermogen accumulerend	$W/m^2 \cdot K$	$T_{MASSA} - T_{BINNEN}$
P_{EXT}	Vermogen extern	$W/m^2 \cdot K$	Zoninstraling
P_{INT}	Vermogen intern	W/m^2	Bezetting
P_{SEC}	Vermogen secundair	W/m^2	$T_{BINNEN} < T_{SETPOINT}$

$$P_{PCM} + P_{TR/INF} + P_{ACC} + P_{EXT} + P_{INT} + P_{SEC} = (m \cdot c) \cdot \Delta T_{BINNEN}$$

De simulatie is opgesteld in MS Excel. De invoer voor de buitentemperatuur e.d. zijn gehaald uit het verkort referentiejaar 1964/1965. Gekozen is voor een interval van één uur om zo een werkbare simulatie te creëren. De invoerparameters zijn gehaald uit een VABI warmteverlies en koellast berekening. Het beoogde doel van deze simulatie is om inzicht te geven in de

effecten die verschillen ontwerpvariabelen hebben. Daarnaast geeft het een schatting voor de energiebesparing.

Uitvoer simulatie

In tabel 10.0, 10.1 en 10.2 is de uitvoer van de simulatie weergegeven.

Smelttemperatuur (°C)	Maximale binnentemperatuur (°C)	Binnentemperatuur >25,5 °C (h)
15	25,5	4
16	25,7	14
17	25,9	23
18	25,9	5
19	25,0	0
20	24,0	0
21	23,9	0
22	24,4	0
23	24,9	0
24	25,3	0
25	25,5	4
26	25,6	9
27	25,6	9
28	25,6	9
29	25,6	9
30	25,6	9
GEEN PCM	25,9	17

Onwenselijk

Wenselijk

Tabel 10.0: Maximum binnentemp. en aantal uur boven 25,5 °C bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM

In tabel 10.0 is de maximale binnentemperatuur uitgezet als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit. Temperaturen onder de 30 °C zijn wenselijk (oranje) en temperaturen daarboven onwenselijk (blauw). Dit onderscheid is gemaakt aangezien de ARBO aangeeft dat er maatregelen getroffen dien te worden als de binnentemperatuur boven deze temperatuur komt.

Daarnaast zijn het aantal uren boven de 25,5 °C (TO-uren) weergegeven als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit. 150 is als grens bepaald in de revisie van Kuijpers. Waarden daaronder zijn wenselijk (oranje) en waarden daarboven onwenselijk (blauw).

Smelttemperatuur	Q,verwarmen (conventioneel)	Q,PCM
(°C)	kWh	kWh
15	18.464	11.064
16	17.778	11.079
17	16.792	10.697
18	15.731	9.618
19	14.708	7.651
20	14.502	5.215
21	14.414	3.026
22	14.545	1.544
23	14.876	481
24	14.932	176
25	14.945	62
26	14.957	42
27	14.957	45
28	14.957	48
29	14.957	51
30	14.957	51
GEEN PCM	14.957	0

Onwenselijk

Wenselijk

Tabel 10.1: Conventionele verwarmingsenergie en de uitgewisselde energie per m² bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM

In tabel 10.1 is de benodigde verwarmingsenergie (Q,verwarmen) uitgezet als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit. Een lagere waarde dan bij een concept zonder PCM is wenselijk (oranje) en een waarde hoger als onwenselijk (blauw).

Daarnaast is de hoeveelheid energie die het PCM uitwisselt weergegeven als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit.

Smelttemperatuur	GTO-uren	Vollast Cycli/jaar
(°C)	(h)	(h)
15	2	86
16	8	86
17	14	83
18	3	75
19	0	59
20	0	40
21	0	23
22	0	12
23	0	4
24	0	1
25	2	1
26	5	0
27	5	0
28	5	0
29	5	0
30	5	0
GEEN PCM	10	0

Onwenselijk

Wenselijk

Tabel 10.2: Aantal GTO-uren en cycli bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM.

In tabel 10.2 is het aantal GTO-uren uitgezet als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit. Een waarde onder de 250 is wenselijk (oranje) en een waarde daarboven onwenselijk (blauw). Dit omdat tot 250 uur nog onder acceptabel valt volgens de Rijksgebouwendienst. Daarnaast is het aantal vollastcycli weergegeven als resultaat van een bepaalde smelttemperatuur en warmteopslagcapaciteit.

Effect ontwerpvariabelen

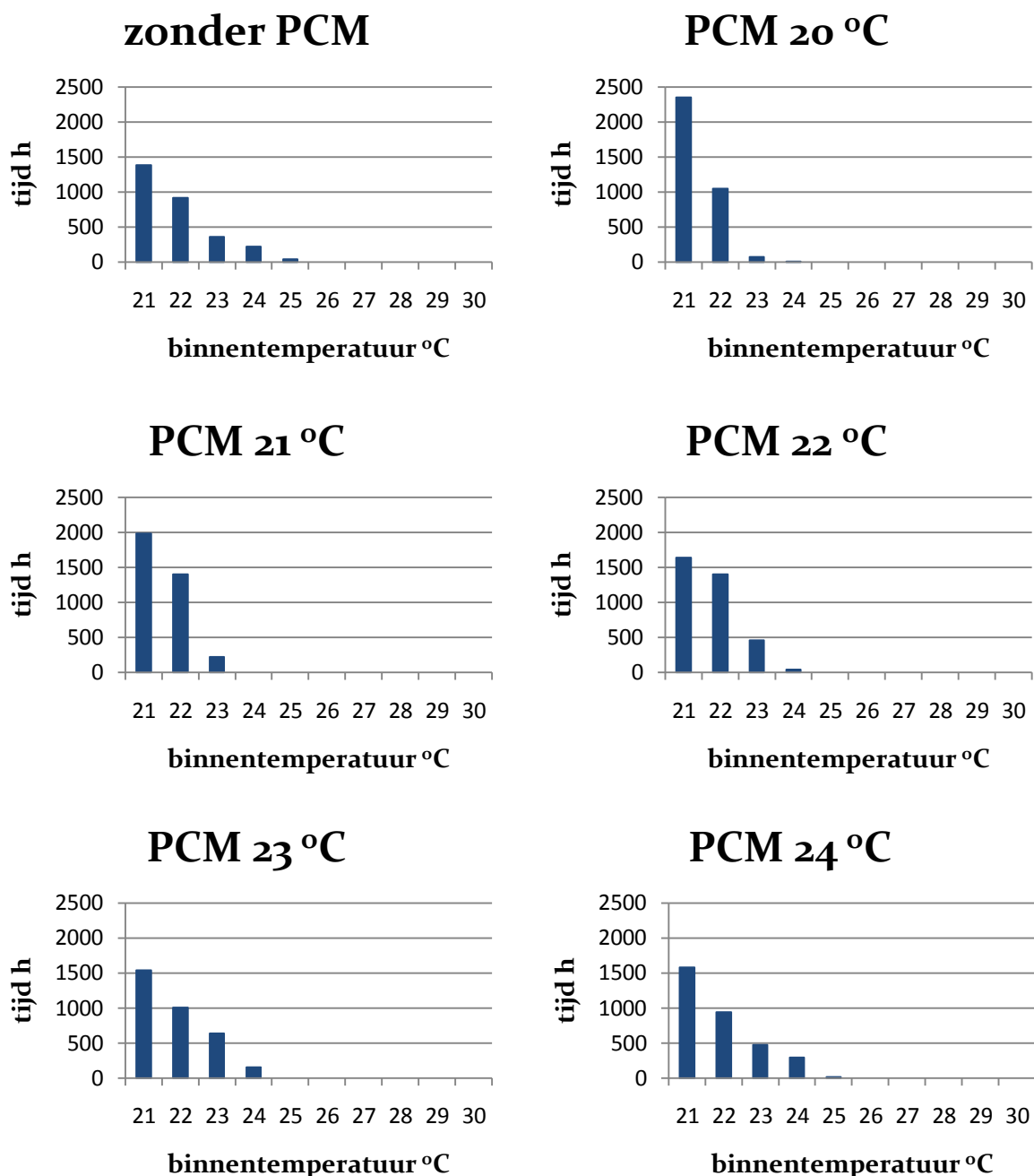
In tabel 10.3 is de gunstigste smelttemperatuur te zien voor verschillende variabelen. Ook is de grens aangegeven waaraan de variabele minimaal moet voldoen.

Variabele	Grens	Smelttemperatuur
Minimaal aantal GTO-uren	<250 h	19 - 24 °C
Zo laag mogelijke maximale binnentemperatuur	<30 °C	21 °C
Zo min mogelijk conventioneel verwarmingsvermogen	<referentie	21 °C
Maximale energie uitwisseling van het PCM	>0 kWh	15 °C
Minimaal aantal uren boven de 25,5 °C	<150 h	19 - 24 °C
Maximaal aantal vollastcycli	>0 stuks	15 °C

Tabel 10.3: Gunstigste smelttemperatuur voor een bepaalde variabele uit de simulatie

Grafieken uitvoer simulatie

In figuur 10.3 zijn het aantal uren aangegeven dat de ruimte een bepaalde temperatuur heeft. Op de horizontale as is de binnentemperatuur in °C gegeven en op de verticale as het aantal uren dat dit voorkomt per jaar.



Figuur 10.3: Uren dat een bepaalde binnentemperatuur heerst per jaar afhankelijk van de smelttemperatuur van het PCM.

10.4 Kosten-batenanalyse

Voor het bepalen van de meer- of minderinvestering en de variabele kosten wordt gekeken naar de complete werktuigbouwkundige installatie. Ten eerste wordt de investering berekend met een installatie zoals het referentiekantoor heeft, met een bron in combinatie met warmtepomp. Daarna wordt de investering berekend voor een eenvoudiger concept met een koelmachine in combinatie met een ketel. Vervolgens worden de eventuele opbrengsten berekend in 15 jaar met tussenstappen van vijf jaar. De rekensheet is te zien in **bijlage J**.

PCM in combinatie met een bron/warmtepomp installatie

In tabel 10.4 is een overzicht te zien van de investeringskosten onderverdeeld per kostengroep.

Kostengroep	Toelichting	Met PCM	Zonder PCM	Vershil
Ventilatie	inductie-units	€ 11.900,00	€ 5.950,00	€ 5.950,00
Koeling	opwekking	€ 2.040,00	€ 5.700,00	-€ 3.660,00
Koeling	distributie	€ 0,00	€ 4.070,00	-€ 4.070,00

Tabel 10.4: Extra investeringskosten PCM i.c.m. bron

Dit resulteert in een minderinvestering van **€ 1780,-** bij het toepassen van het PCM inductie-unit.

Variabele kosten

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor verwarmen staan in tabel 10.5 voor beide concepten.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
14.410 kWh	14.960 kWh	550 kWh
3.600 kWh(e)	3.740 kWh(e)	140 kWh(e)
€972,-	€1010,-	€38,-

Tabel 10.5: Kosten verwarmen bij gelijkblijvende energieprijzen

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor koelen staan in tabel 10.6 voor beide concepten.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
1.950 kWh	3.150 kWh	200 kWh
20 kWh(e)	30 kWh(e)	10 kWh(e)
€ 5,-	€8,-	€3,-

Tabel 10.6: Kosten koelen bij gelijkblijvende energieprijzen

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijzen voor ventilatie staan in tabel 10.7 voor beide concepten.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
570 kWh	410 kWh	160 kWh
570 kWh(e)	410 kWh(e)	160 kWh(e)
€ 154,-	€111,-	€43,-

Tabel 10.7: Kosten ventilatie bij gelijkblijvende energieprijzen

Terugverdientijd

Aangezien het om een minderinvestering gaat die ook in energieverbruik goedkoper is, is er geen terugverdientijd van toepassing.

Opbrengst

In tabel 10.8 zijn de opbrengsten van het concept met PCM tegenover het concept zonder PCM weergegeven zonder energieprijsstijging.

Na 0 jaar	€1.780,-
Na 5 jaar	€1.770,-
Na 10 jaar	€1.760,-
Na 15 jaar	€1.750,-

Tabel 10.8: Opbrengst met PCM t.o.v. zonder PCM met huidige energieprijzen

De opbrengst van het concept met PCM tegenover het concept zonder PCM zijn weergegeven in tabel 10.9 waarbij een energieprijsstijging van 6 % is meegenomen.

Na 0 jaar	€1.780,-
Na 5 jaar	€1.770,-
Na 10 jaar	€1.750,-
Na 15 jaar	€1.730,-

Tabel 10.9: Opbrengst met PCM t.o.v. zonder PCM met energieprijsstijging van 6 % per jaar

PCM in combinatie met een koelmachine/ketel installatie

In tabel 10.10 is een overzicht te zien van de investeringskosten onderverdeeld per kostengroep.

Kostengroep	Toelichting	Met PCM	Zonder PCM	Vershil
Ventilatie	inductie-units	€ 11.900,00	€ 5.950,00	€ 5.950,00
Koeling	opwekking	€1.450,00	€ 3.350,00	-€ 1.900,00
Koeling	distributie	€ 0,00	€ 4.070,00	-€ 4.070,00

Tabel 10.10: Extra investeringskosten PCM i.c.m. koelmachine

Dit resulteert in een minderinvestering van € 20,- bij het toepassen van het PCM inductie-unit.

Variabele kosten

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijs voor verwarmen zijn voor beide concepten weergegeven in tabel 10.11.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
14.410 kWh	14.960 kWh	550 kWh
1638 m ³	1700 m ³	62 m ³
€1245,-	€1292,-	€47,-

Tabel 10.11: Kosten verwarmen bij gelijkblijvende energieprijs

In tabel 10.12 zijn voor beide concepten de kosten per jaar voor koelen weergegeven bij een gelijk blijvende energieprijs.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
1.950 kWh	3.150 kWh	200 kWh
488 kWh(e)	788 kWh(e)	300 kWh(e)
€ 132,-	€213,-	€81,-

Tabel 10.12: Kosten koelen bij gelijkblijvende energieprijs

De kosten per jaar bij gelijk blijvende energieprijs voor ventilatie staan voor beide concepten in tabel 10.13.

Met PCM	Zonder PCM	Vershil
570 kWh	410 kWh	160 kWh
570 kWh(e)	410 kWh(e)	160 kWh(e)
€ 154,-	€111,-	€43,-

Tabel 10.13: Kosten ventilatie bij gelijkblijvende energieprijs

Terugverdientijd

Aangezien het om een minderinvestering gaat die ook in energieverbruik goedkoper is, is er geen terugverdientijd.

Opbrengst

In tabel 10.14 is de opbrengst van het concept met PCM tegenover het concept zonder PCM weergegeven waarbij geen energieprijsstijging is meegenomen.

Na 0 jaar	€20,-
Na 5 jaar	€445,-
Na 10 jaar	€870,-
Na 15 jaar	€1.295,-

Tabel 10.14: Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met huidige energieprijs

De opbrengst van het concept met PCM tegenover het concept zonder PCM waarbij een energieprijsstijging van 6 % is meegenomen staat in tabel 10.15.

Na 0 jaar	€20,-
Na 5 jaar	€499,-
Na 10 jaar	€1.140,-
Na 15 jaar	€1.998,-

Tabel 10.15: Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met energieprijsstijging van 6 % per jaar

10.5 Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van de PCM inductie-unit zijn weergegeven in tabel 10.16.

Voordelen	Nadelen
Vermogensreductie koeling Het opwekkingsvermogen dat opgesteld dient te worden wordt teruggebracht met 21 %.	Minder bedrijfszekerheid Doordat de PCM 100 % kunnen smelten en niet meer functioneren.
Energieverbruikreductie Gecombineerd wordt het energieverbruik voor koeling en verwarming teruggebracht met 4 %.	Minder comfort Er is met PCM inductie-unit een minder hoog comfort niveau te halen dan met een conventionele installatie.
Minder onderhoud Doordat de installatie kleiner wordt neemt het onderhoud af.	Niet beïnvloedbaar De PCM inductie-unit zijn niet te regelen naar een bepaald vermogen en temperatuur.
Vereenvoudigde installatie De installatie bevat minder onderdelen zoals leidingwerk, regelkleppen etc.	
Cradle 2 Cradle Het is mogelijk om het PCM inductie-unit C2C uit te voeren.	
Investeringskosten De investering is kostenneutraal of een beperkte minder-investering.	
Terugverdientijd Geen terugverdientijd.	

Tabel 10.16: Voor- en nadelen van de PCM inductie-unit

10.6 Conclusie PCM inductie-unit

In relatie tot de hoofdvraag kan geconcludeerd worden dat het concept PCM inductie-unit rendabel is zowel in combinatie met een bron als met een koelmachine.

Uit de theoretische berekeningen blijkt dat het mogelijk is een ruimte te koelen met een PCM inductie-unit als de koellast wordt beperkt. Daarnaast is een bijkomend effect dat er 's nachts gedeeltelijk mee verwarmd wordt.

Voor de koeling wordt de PCM inductie-unit bepaald volgens de koellastberekening NEN 5066. Voor verwarmen moet het vermogen dat het PCM inductie-unit levert niet meegenomen worden aangezien deze dit niet met zekerheid altijd kan leveren.

Uit de simulatie blijkt bij een te lage smelttemperatuur (18°C of lager) de GTO-uren niet meer optimaal zijn, maar nog ruim binnen de gestelde grenzen vallen, doordat het PCM niet meer gestold raakt 's nachts en het PCM overdag te snel smelt. Ook bij een te hoge smelttemperatuur (25°C of hoger) zijn de GTO-uren niet meer optimaal omdat het PCM pas gaat smelten bij een te hoge binnentemperatuur. Qua maximale binnentemperatuur ligt het optimum bij een smelttemperatuur van 21°C . Dit met dezelfde oorzaak als in relatie tot de GTO-uren. Bij een lagere smelttemperatuur is het PCM actiever. Dit wordt echter beperkt tot een minimum smelttemperatuur van 19°C , er is dan extra verwarmingsvermogen nodig.

De investeringskosten anno 2010 liggen nagenoeg gelijk aan een conventioneel concept. De besparing op de energiekosten voor koeling bedraagt 38 % en voor verwarming 4 % tegenover een conventioneel concept. De totale besparing voor koelen en verwarmen met de extra ventilatie meegerekend komt neer op 0 % in combinatie met een bron/warmtepomp en 5 % in combinatie met een koelmachine/ketel. Er is geen terugverdientijd in combinatie met een bron/warmtepomp omdat de investering lager ligt en de variabele kosten gelijk aan een conventioneel concept. Er is geen terugverdientijd in combinatie met een koelmachine/ketel omdat de investering gelijk is en de variabele kosten lager liggen dan een conventioneel concept. De opbrengsten na tien jaar bedragen een kleine tweeduizend euro als gebruik wordt gemaakt van een bron/warmtepomp en een kleine duizend euro met een koelmachine/ketel.

Literatuurlijst

Internet

1	www.wikipedia.nl : alkaan	19 april 2010
2	www.wikipedia.nl : koolstofketen	1 april 2010
3	www.rubitherm.de	18 maart 2010
4	www.teappcm.com	18 maart 2010
5	www.phasediagrams.dk	3 maart 2010
6	www.pcm-ral.de	17 februari 2010
7	www.wikipedia.nl : pH	25 februari 2010
8	www.wikipedia.nl : branddriehoek	25 februari 2010
9	www.ghs-helpdesk.nl	12 april 2010
10	www.cbs.nl	8 maart 2010
11	www.milieuloket.nl	9 maart 2010
12	www.lap2.nl	22 februari 2010
13	www.renewable-energy-now.org	17 februari 2010
14	www.senternovem.nl	10 mei 2010
15	www.agentschapnl.nl	22 februari 2010

Literatuur

1	Rapportagetechniek, Rien Elling, Bas Anderweg, Jaap de Jong en Christine Swankhuisen, ISBN: 90-012-9138-4
2	Hogeschool Utrecht afstudeerhandleiding, 2009, Peter Bardoel
3	Toegepaste energietechniek deel 2, ir. J. ouwehand, ir. T.J.G. Papa, dr. W. Gilijamse, drs. J. de Geus, 2005 1 ^e druk, ISBN: 90-395-2305-3
4	Capzo informatiepakket
5	Heat and cold storage with PCM, an up to date introduction into basics and applications, H. Mehling, L. F. Cabeza, 2008, ISBN: 978-3-540-68556-2
6	ISSO Handboek Installatietechniek, 2002, Stichting ISSO ISBN: 90-5044-094-0
7	Presentatie: PCM in the built environment, combining comfort and sustainability, Deerns consulting engineers, I .M. Bouwman Msc.
8	Revisie referentiekantoor Kuijpers Installaties Utrecht B.V. te De Meern

9	Verkort referentiejaar 1964/1965
10	Vuistregels voor installatiekosten, Olst. K. van, ISBN: 90-8015-316-8
11	ISSO publicatie 48
12	ISSO publicatie 81
13	Autarkis informatiepakket

Mondeling

1	Autarkis B.V. te Almere
2	Capzo International B.V. te Ootmarsum

Figuur- en tabellijst

Figuur 2.0:	Overzicht mogelijkheden voor thermische energieopslag
Figuur 2.1:	Opgeslagen voelbare energie
Figuur 2.2:	Aggregatietoestanden
Figuur 2.3:	Afkoelkromme
Figuur 3.0:	Overzicht Phase Change Materials
Figuur 3.1:	Structuur alkaan
Figuur 3.2:	Verband smelttemperatuur en aantal koolstofatomen bij paraffine
Figuur 3.3:	Smeltdiagram $\text{CaCl}_2 \cdot X \text{H}_2\text{O}$
Figuur 4.0:	Fasediagram
Figuur 4.1:	Opslagcapaciteit Thermusol HD28CCE
Figuur 4.2:	Warmtecapaciteit per kg
Figuur 4.3:	Warmtecapaciteit per dm^3
Figuur 4.4:	Subcooling met nucleatie
Figuur 4.5:	Subcooling zonder nucleatie
Figuur 4.6:	Branddriehoek
Figuur 4.7:	Prijzontwikkeling PCM
Figuur 4.8:	Voorspelling prijsontwikkeling
Figuur 5.0:	Van huidige naar beoogde situatie met PCM zoals geclaimd door producten en leveranciers
Figuur 5.1:	Energieverbruik Nederland
Figuur 5.2:	Afvalproductie en de wijze van verwerking
Figuur 5.3:	Trias Energetica
Figuur 5.4:	Binnentemperatuur verloop met en zonder PCM
Figuur 8.0:	Effect koelbatterij
Figuur 8.1:	Effect koelbatterij i.c.m. PCM
Figuur 8.2:	Effect PCM
Figuur 8.3:	Regenereren van PCM door koelbatterij
Figuur 9.0:	Schematische weergave van de energiestromen naar het PCM klimaatplafond tijdens koelen
Figuur 9.1:	Schematische weergave van de energiestromen van het PCM klimaatplafond tijdens verwarmen
Figuur 9.2:	Energiebalans kantoor
Figuur 9.3:	Uren dat een bepaalde binnentemperatuur heerst per jaar afhankelijk van de smelttemperatuur van het PCM
Figuur 10.0:	Schematische weergave van de energiestromen naar de PCM inductie-unit tijdens koelen
Figuur 10.1:	Schematische weergave van de energiestromen van de PCM inductie-unit tijdens verwarmen
Figuur 10.2:	Energiebalans kantoor
Figuur 10.3:	Uren dat een bepaalde binnentemperatuur heerst per jaar afhankelijk van de smelttemperatuur van het PCM
Tabel 2.0:	Warmtecapaciteiten verschillende materialen
Tabel 4.0:	Ontwerpfactoren
Tabel 4.1:	Overzicht smelttemperatuur verschillende PCM's
Tabel 4.2:	Klassen PCM's
Tabel 4.3:	Ontwerpfactoren
Tabel 4.4:	Vergelijking kritische ontwerpfactoren
Tabel 6.0:	Gegevens Kuijpers m.b.t. de klimaatinstallatie
Tabel 8.0:	Uitvoer berekening

Tabel 8.1:	Gunstigste smelttemperatuur voor een bepaalde variabele in de simulatie
Tabel 8.2:	Opbrengsten van PCM i.c.m. bron
Tabel 8.3:	Opbrengsten van PCM i.c.m. koelmachine
Tabel 8.4:	Voor- en nadelen van de PCM koelbatterij
Tabel 9.0:	Koelvermogen van het PCM klimaatplafond bij een bepaald temperatuurverschil
Tabel 9.1:	Verwarmingsvermogen van het PCM klimaatplafond bij een bepaald temperatuurverschil
Tabel 9.2:	Maximum binnentemperatuur en aantal uur boven 25,5 °C bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM
Tabel 9.3:	Conventionele verwarmingsenergie en de uitgewisselde energie per m ² bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM
Tabel 9.4:	Aantal GTO-uren en cycli bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM
Tabel 9.5:	Gunstigste smelttemperatuur voor een bepaalde variabele in de simulatie
Tabel 9.6:	Investeringskosten PCM i.c.m. bron
Tabel 9.7:	Kosten verwarmen bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 9.8:	Kosten koelen bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 9.9:	Kosten ventilatie bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 9.10:	Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met huidige energieprijis
Tabel 9.11:	Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met energieprijisstijging van 6 % per jaar
Tabel 9.12:	Investeringskosten PCM i.c.m. koelmachine
Tabel 9.13:	Kosten verwarmen bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 9.14:	Kosten koelen bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 9.15:	Kosten ventilatie bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 9.16:	Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met huidige energieprijis
Tabel 9.17:	Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met energieprijisstijging van 6 % per jaar
Tabel 9.18:	Voor- en nadelen van het PCM klimaatplafond
Tabel 10.0:	Maximum binnentemperatuur en aantal uur boven 25,5 °C bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM
Tabel 10.1:	Conventionele verwarmingsenergie en de uitgewisselde energie per m ² bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM
Tabel 10.2:	Aantal GTO-uren en cycli bij een bepaalde smelttemperatuur van het PCM
Tabel 10.3:	Gunstigste smelttemperatuur voor een bepaalde variabele uit de simulatie
Tabel 10.4:	Extra investeringskosten PCM i.c.m. bron
Tabel 10.5:	Kosten verwarmen bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 10.6:	Kosten koelen bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 10.7:	Kosten ventilatie bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 10.8:	Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met huidige energieprijis
Tabel 10.9:	Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met energieprijisstijging van 6 % per jaar
Tabel 10.10:	Extra investeringskosten PCM i.c.m. koelmachine
Tabel 10.11:	Kosten verwarmen bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 10.12:	Kosten koelen bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 10.13:	Kosten ventilatie bij gelijkblijvende energieprijis
Tabel 10.14:	Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met huidige energieprijis
Tabel 10.15:	Opbrengst met PCM tegenover zonder PCM met energieprijisstijging van 6 % per jaar
Tabel 10.16:	Voor- en nadelen van de PCM inductie-unit

Bijlagen

A	Organische PCM's van Rubitherm
B	Anorganische PCM's van PCM Energy
C	RAL gütezeichen
D	Overzicht emissiecoëfficiënten
E	Overzicht warmtegeleidingcoëfficiënten
F	pH-overzicht
G	Energieprijzen
H	Klimaatplafond
I	Inductie-unit
J	Terugverdientijd rekensheet
K	Simulatie PCM klimaatplafond rekensheet
L	Simulatie PCM inductie-unit rekensheet
M	Simulatie PCM koelbatterij rekensheet