

Haalbaarheidstudie naar gebruik van faseovergangsmateriaal (PCM) in de kas

Auteur(s) : ir A. de Gelder - PPO
G.L.A.M Swinkels – A&F

© 2004 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

PPO Publicatienr. 41616062



Projectnummer: 41616062

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Glastuinbouw

Adres : Kruisbroekweg 5, Naaldwijk
: Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk
Tel. : 0317 - 47 83 00
Fax : 0317 - 47 83 01
E-mail : info.glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	5
1 INLEIDING	6
2 ACHTERGROND PCM	7
2.1 Schadelijkheid en risico.....	7
2.2 Toepassing in de kas	8
3 SIMULATIE STUDIES	10
4 RESULTATEN	11
4.1 Chrysant	11
4.2 Tomaat	15
5 DISCUSSIE EN CONCLUSIE	18
6 LITERATUUR EN VERWIJZINGEN.....	20
BIJLAGE 1 PCM DATA SHEET.	21
BIJLAGE 2: UITGANGSPUNTEN GEWASSEN VOOR KASPRO	23
BIJLAGE 3: UITGANGSPUNTEN PCM	25

Samenvatting

PCM = Faseovergangsmateriaal heeft de eigenschap om per m³ materiaal een grote hoeveelheid energie te kunnen opslaan. In de woningbouw wordt dit toegepast in huizen om een aangenaam klimaat te combineren met energiebesparing.

In deze studie is nagegaan wat de energiebesparing kan zijn bij Chrysant en tomaat als PCM in de kas wordt toegepast.

Voor beide teelten is het perspectief van PCM slecht. In het gunstigste geval (tomaat) wordt ruim 0.7 m³/m² aan gas bespaard. De maximale gasafname wordt door het gebruik van PCM niet verlaagd. Dit komt omdat piekverbruiken ontstaan in de koudste periode van het jaar waarbij overdag geen of te weinig zonnewarmte benut kan worden om de piek in de nacht of 's morgens te verlagen. De verandering van het kasklimaat en de gewasproductie zijn zeer klein.

Bij chrysant werkt de hogere nachttemperatuur (neg. dif.) negatief door. Dit komt omdat de stollingstemperatuur voor PCM boven de nachttemperatuur moet liggen om 's nachts de overdag opgespaarde warmte te kunnen vrijgeven. De smelttemperatuur ligt daardoor nog hoger, zodat pas bij een stijging van de dagtemperatuur ten opzichte van de nachttemperatuur energie kan worden bespaard. Dit betekent dat de kasluchttemperatuur overdag boven de 21.5 °C moet komen terwijl de ingestelde temperatuur 18.5 °C is.

De veranderingen in temperatuur en CO₂ niveau zijn gering. PCM heeft geen negatieve effecten, maar de positieve effecten zijn klein.

Het onderzoek laat wel zien dat vergroting van de warmtecapaciteit van een kas door meer massa, gewas en dergelijke gunstig is voor het energiegebruik.

Voor een betere toepassing met de warmteoverdracht van kaslucht naar PCM en omgekeerd worden verbeterd.

Een fors temperatuurverschil tussen dag en nacht is gunstig voor de toepassing van PCM.

PCM geeft wel een besparing, maar er is geen realistische verwachting dat de investering en de aanpassing in de teelt worden terugverdiend.

1 Inleiding

Warmteopslag in buffers wordt in de glastuinbouw veel toegepast. Kassen hebben weinig capaciteit om warmte in het constructiemateriaal op te nemen. In de woning- en utiliteitsbouw zijn technieken ontwikkeld om de warmtecapaciteit van de constructie bij een temperatuurtraject van 18 tot 25 °C sterk te vergroten. Hiervoor wordt faseovergangsmateriaal (PCM) toegepast. Afhankelijk van de eigenschappen stolt PCM als de temperatuur onder de ca 22 °C zakt. Bij dit stollingsproces komt veel warmte vrij. Als de temperatuur oploopt tot boven de smelttemperatuur, ca 24 °C, neemt de PCM weer warmte op. Er zijn PCM's voor verschillende temperatuur niveaus.

Om energiebesparing door PCM te krijgen moet de temperatuur van de PCM overdag onder invloed van de kastemperatuur die oploopt door de zonnewarmte stijgen tot boven de temperatuur waarbij warmte wordt opgenomen. Bij afkoeling in de nacht komt de warmte weer vrij. Dit heeft gevolgen voor de teelt. De aanwezigheid van PCM in de kas kan leiden tot een verandering in het verloop van de temperatuur in de kas.

Een haalbaarheidsstudie is nodig om te kijken naar de mogelijkheid van toepassing van PCM in de kas. Daarbij zijn een aantal vragen van belang:

- op welke wijze kan de PCM het beste in de kas worden aangebracht, plaats, hoeveelheid, wijze van inkapseling.
- wat is het gewenste temperatuurtraject voor de PCM in relatie tot het gewas
- hoe verloopt de kastemperatuur bij aanwezigheid van PCM
- heeft een verandering van het verloop van de kastemperatuur tot gevolg dat er minder wordt gelucht, zodat door een betere CO₂ benutting een hogere productie wordt bereikt
- ontstaan door de aanwezigheid van PCM problemen met de vochthuishouding van de kas
- wat zijn de risico's van PCM
- welke energiebesparing is met PCM te realiseren
- wat is de bedrijfseconomische haalbaarheid

In deze haalbaarheidsstudie over PCM toepassing in de kas wordt op bovenstaande vragen een antwoord gezocht. Ook worden de technische mogelijkheden in het algemeen, en de gevolgen voor het kasklimaat bij chrysant in het bijzonder, volgens modelsimulaties beschreven.

2 Achtergrond PCM

Voor de utiliteitsbouw ontwikkelen verschillende bedrijven toepassingen van faseovergangsmaterialen, bijvoorbeeld in het “drei liter haus” (<http://www.rheinneckarweb.de/basf/erleben/3literhaus/>).

Aandacht voor energiebesparing door warmteopslag is er over de gehele wereld (<http://www.eere.energy.gov/consumerinfo/factsheets/db3.html>).

De toepassing van faseovergangsmateriaal is eerst ontwikkeld voor warmteopslagsystemen (Smeding en Bach, 1997). Een onderzoek naar deze toepassing voor de glastuinbouw wordt uitgevoerd door TNO (<http://www.tuinbouw.nl/default.htm>). Het temperatuurtraject voor warmteopslagsystemen is rond de 50 tot 60 °C. Voor de toepassing in woningen zijn faseovergangsmaterialen ontwikkeld met een temperatuurtraject rond de 20 - 25 °C.

Twee belangrijke producenten van PCM's zijn TEAP (<http://www.teappcm.com/>), die werkt met gehydrateerde zouten, en Rubitherm (<http://www.rubitherm.de/>), die vooral paraffine toepast. Beide leveranciers beschikken over een PCM die past binnen het temperatuurtraject voor een kas, TH-25 van TEAP en RT-20 van Rubitherm (Bijlage 1)

De TH-25 is de basis voor de door Delta-PCM op de markt te brengen Delta-Cool 24. Hierin is door DELTA-PCM/ Doerken de technologie van verpakking gecombineerd met de eigenschappen van de PCM.

Naast deze twee bestaande PCM's zijn er ontwikkelingen om in nog lagere temperatuurtrajecten te kunnen werken.

Voor Delta-Cool 24 kan berekend worden wat de warmteopslagcapaciteit theoretisch zou kunnen zijn.

Tabel 1

Berekening PCM hoeveelheid om 2.5 m ³ aardgas per m ² te besparen op basis van TH-25		
smelt warmte	0.158	mJ/kg
dichtheid	1.5	kg/L
enthalpy aardgas	35.17	mJ/m ³
cycli smelten/stollen	100	
gewenste besparing	2.5	m ³ /m ²
hoeveelheid stof in kilogram	5.56	kg
hoeveelheid stof in liter	3.71	liter

In een jaar moet 5,6 kilogram PCM 100 keer de cyclus van smelten bij een kastemperatuur boven 24 °C en stollen bij een kastemperatuur onder 22 °C doorlopen om 2.5 m³/m² aan aardgas te kunnen besparen. Bij de nieuwste PCM's is het temperatuurtraject voor smelten en stollen iets lager, tussen 22 - 20 °C en 20 - 18 °C.

2.1 Schadelijkheid en risico.

Van de TH-25 is bekend dat deze niet brandbaar, maar wel corrosief is en verder onschadelijk voor het milieu. Een lekkage naar de bodem zou plaatselijk door ophoping van het zout tijdelijk tot verminderde groei kunnen leiden.

In verband met de uitzetting van het materiaal bij stolling moet de verpakking flexibel zijn. De verhouding tussen inhoud en omvang moet vanwege de mogelijke uitzetting ook laag gehouden worden.

Van de RT-20 zijn in bijlage 1 gegevens over schadelijkheid voor het milieu en risico's opgenomen.

2.2 Toepassing in de kas

Voor toepassing in de kas moet de PCM worden ingekapseld, omdat de PCM zowel in vloeibare als in vaste toestand moet kunnen voorkomen op de gewenste plaats. Delta-PCM heeft goede ervaring met het verpakken in polypropyleen (PP). Polypropyleen is in allerlei vormen te verkrijgen.

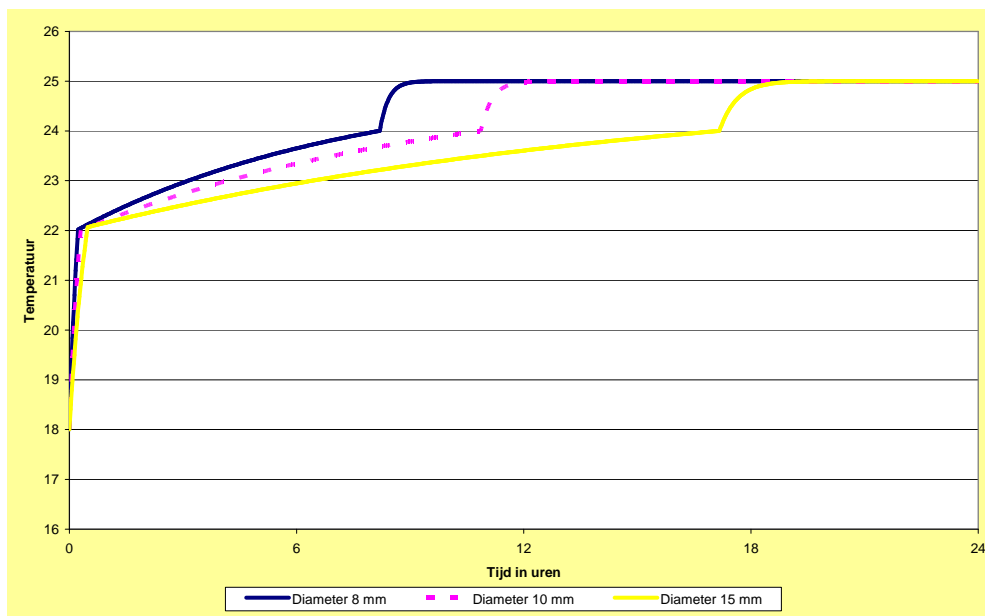
Voor toepassing in de kas zijn als uitgangspunten geformuleerd dat de PCM geen licht mag onderscheppen, en dat er geen extra luchtbeweging door middel van ventilatoren behoeft te worden gecreëerd. De PCM moet daarbij zonder veel moeite in een kas kunnen worden aangebracht en tijdens teeltwisselingen kunnen worden verwijderd. De PCM mag niet vrijkomen.

Om aan deze eisen te kunnen voldoen is een omhulling met zwart PP in buisvorm een logische keuze. Zwart wordt gekozen omdat dit de meeste warmtestraling absorbeert. Wit zou meer reflectie geven, wat gunstig is voor de groei, maar dit is minder gunstig voor de warmteopname. De buizen kunnen eventueel door een vlechtwerk tot een matvorm worden verwerkt. Matten van gewenste afmeting met voldoende afstand tussen de buizen kunnen op het gaassysteem bij chrysant worden toegepast. Ze kunnen ook als mat onder tomaat en paprika en roos worden gebruikt en in tabletbodems van potplanten worden geplaatst.

Andere uitvoeringsvormen zijn zakken met PCM of dubbelwandige platen waarvan de holtes gevuld worden met PCM. Deze zijn voor toepassing in de kas minder geschikt.

Naast losse elementen met PCM zou PCM in polypropyleen ook kunnen worden ingepast in onderdelen van de constructie. Een dergelijke inpassing vraagt om een aangepast productie proces. Het heeft wel als voordeel dat warmtestraling door de PCM in de constructie kan worden opgenomen.

Belangrijk voor de toepassing is de verhouding tussen het oppervlak dat in contact staat met de lucht en de inhoud aan PCM. De omtrek van een buis neemt lineair met de straal toe, terwijl de inhoud kwadratisch toeneemt. In figuur 1 is voor verschillende buisdiameters de opwarming van een met PCM gevulde polypropyleen buis met een wanddikte van 1 mm gegeven. Uitgangspunten zijn een PCM die stolt bij 22 °C en smelt bij 24 °C, de begintemperatuur van de buis met PCM is 18 °C en de ruimtetemperatuur is 25 °C. De warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen buis en lucht is op 7 W/m².K gesteld.



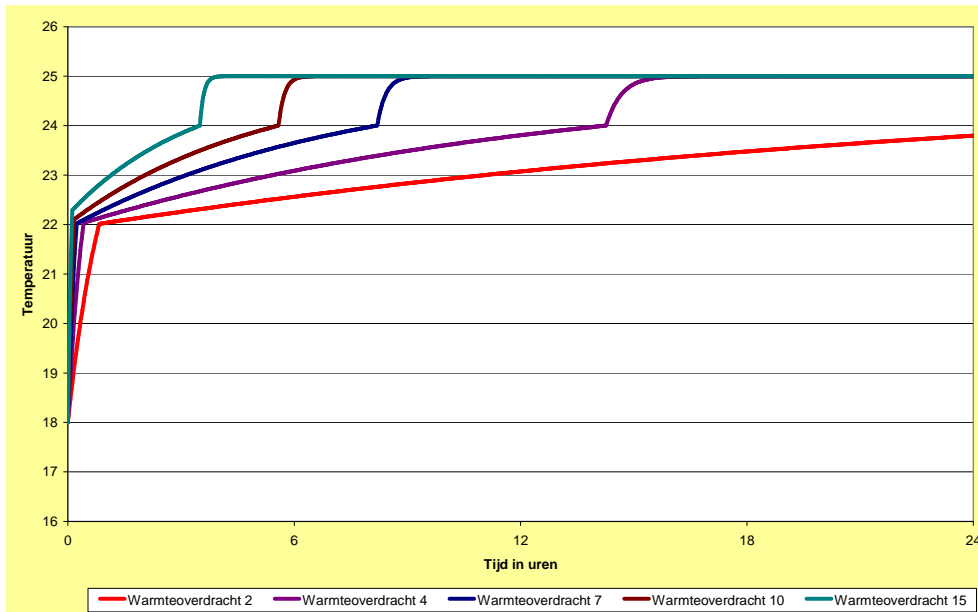
Figuur 1 De invloed van de buisdiameter op de snelheid van opwarmen van een met PCM gevulde polypropyleen buis.

Voor de warmteoverdracht is de warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen lucht en verpakking van

doorslaggevende betekenis. In Figuur 2 is de invloed van de warmteoverdrachtscoëfficiënt weergegeven bij een buisdiameter van 8 mm. De invloed van de luchtsnelheid op deze coëfficiënt is te berekenen volgens de formule

$$\alpha = 2 + 10 \cdot \sqrt{\nu}$$

Waarin α is de warmteoverdrachtscoëfficiënt en ν is de luchtsnelheid in m/s.



Figuur 2 De invloed van de warmteoverdrachtscoëfficiënt op de opwarming van een met PCM gevulde polypropyleen buis van 8 mm.

In een kas is een geringe luchtbeweging. Als de PCM wordt toegepast tussen een gewas zal de luchtbeweging vrijwel nihil zijn. Bij de simulaties voor het kasklimaat is uitgegaan van geen luchtbeweging.

Uit figuur 2 is voor de werking van de PCM in de kas af te leiden dat het smelt-stol traject van de PCM en dus het temperatuurtraject in de kas, van groot belang is voor de goede werking van de PCM. Een traject van 18-20 °C is gunstiger dan het huidige haalbare traject van 21-23 °C.

Een gewas waarbij de dagtemperatuur redelijk mag oplopen, bijvoorbeeld 25 °C, en de nachttemperatuur mag dalen tot 15-16 °C biedt meer perspectief voor toepassing van PCM dan een gewas met een vrij nauw temperatuur traject.

Een hogere warmteoverdrachtscoëfficiënt is gunstig voor de snelheid waarmee de warmte van lucht aan de PCM wordt over gedragen en omgekeerd. Zeker in het traject van geen luchtbeweging naar enige luchtbeweging is er een redelijke versnelling van de warmteoverdracht.

Naast effecten op de temperatuur mag de PCM geen effect hebben op de luchtvochtigheid en lichttoetreding.

3 Simulatie studies

Voor KASPRO is een module met een vereenvoudigd model voor de aanwezigheid van een PCM gemaakt en getest. De effecten van PCM op het kasklimaat en het energiegebruik zijn ter oriëntatie voor 1 uitvoeringsvorm (kleine ronde buizen) jaarrond voor een chrysantenteelt en tomatenteelt berekend.

Verschillen met de standaardteelt worden weergegeven in grafieken van gemiddelde etmaaltemperaturen en CO₂-concentraties en fotosynthesesom over het jaar en frequentieverdelingen van de uurgemiddelde RV. Aangegeven wordt hoe de verhouding is tussen PCM in vaste toestand en in gesmolten toestand in de loop van de dag.

De gevolgen van het gebruik van PCM op het gasverbruik voor het gehele jaar in tabelvorm gegeven. De energieresultaten van LD en KD berekeningen worden in de verhouding 1:3 in de eindresultaten verwerkt. Er wordt apart aandacht besteed aan het effect op piekvraag voor het gasverbruik.

De uitgangspunten voor de gewassen zijn beschreven in bijlage 2. De uitgangspunten voor de PCM toepassing staan in bijlage 3.

Als uitgangspunt voor de hoeveelheid toe te passen PCM is gekozen voor 2.6 liter PCM per m² kas (ruim 4 kg/m²) in de vorm van ronde buizen van massief PCM met als materiaal DELTA-COOL 24.

Om de warmteoverdracht zo hoog mogelijk te maken moet de verhouding oppervlak / inhoud zo hoog mogelijk zijn, wat neerkomt op veel buizen met kleine diameter. Als kleinste realistische diameter is 8 mm gekozen waarbij 210 buizen per 4 m kapbreedte nodig zijn voor 2.6 liter PCM per m². Dit is een praktisch niet realistische hoeveelheid omdat dan 40 % van het oppervlak is bedekt.

De meest gunstige plaatsing van PCM zou boven het gewas zijn zodat de opwarming van het PCM, naast het temperatuurverschil, ook door zonnestraling zou plaatsvinden. De opgenomen hoeveelheid stralingswarmte is echter evenredig met het lichtonderscheppende oppervlak. Volgens de regel van 1% lichtverlies = 1% productieverlies is het zeer onrealistisch om uit te gaan van plaatsing boven het gewas zodat in dit rapport uitgegaan wordt van PCM dat tussen het gewas is geplaatst. Hierdoor is er nauwelijks sprake van opwarming door zonnestraling. Deze warmteflux is daarom niet meegenomen in de berekeningen.

De moeilijkheid van een praktische toepassing van een groot aantal buizen is geen beperkende factor voor de simulaties.

4 Resultaten

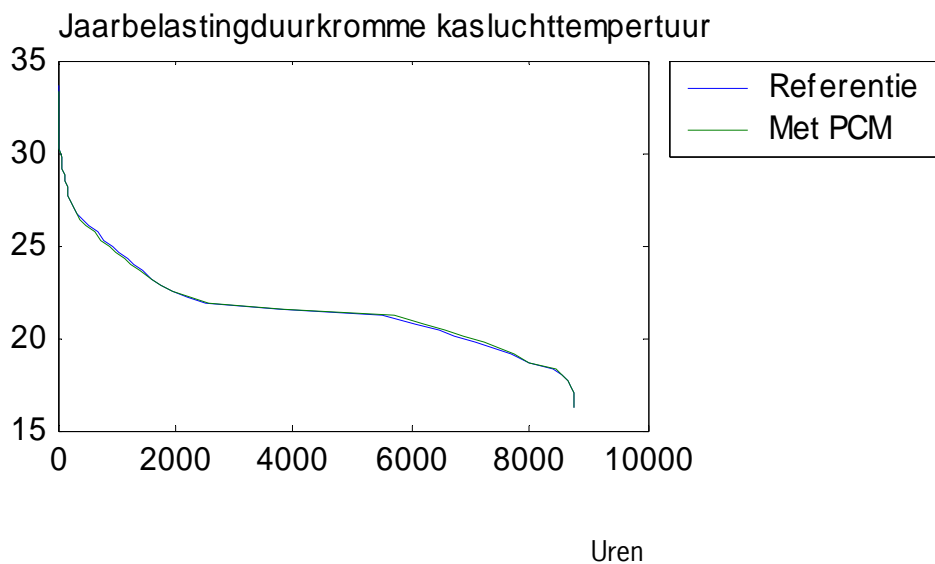
4.1 Chrysant

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de chrysant in LD en KD.

In onderstaande grafieken zijn telkens de resultaten voor de situatie zonder PCM (referentie) en met PCM weergegeven. In de meeste gevallen liggen de lijnen vrijwel op elkaar wat aangeeft dat de verschillen zeer klein zijn.

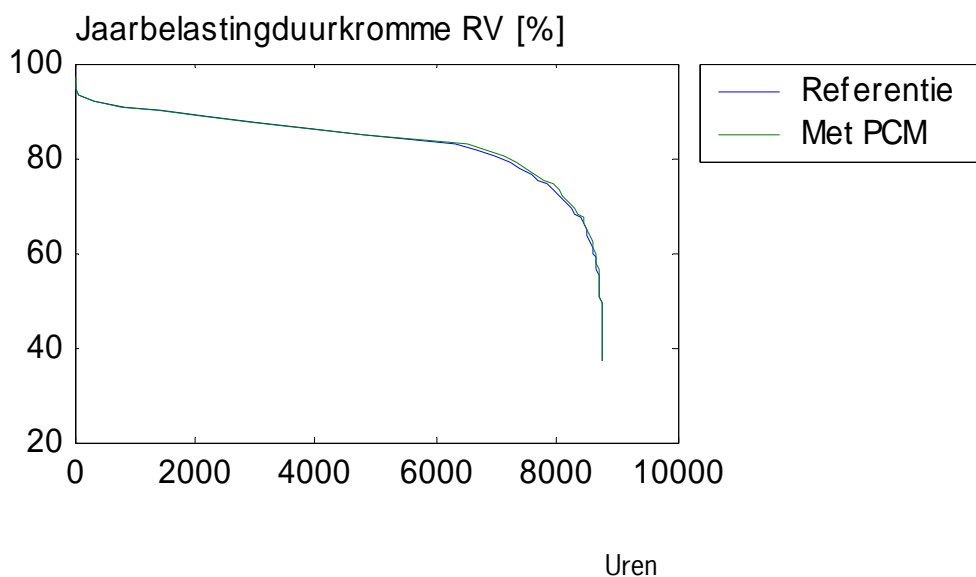
Onderstaande grafieken gelden voor de korte dag. De berekende jaartotalen van gasverbruik zijn een gewogen gemiddelde van LD en KD in de verhouding 1:3.

Temperatuur



Figuur 3 Jaarbelastingduurkromme (JBDK) van de kasluchttemperatuur voor de situatie zonder (referentie) en met PCM.

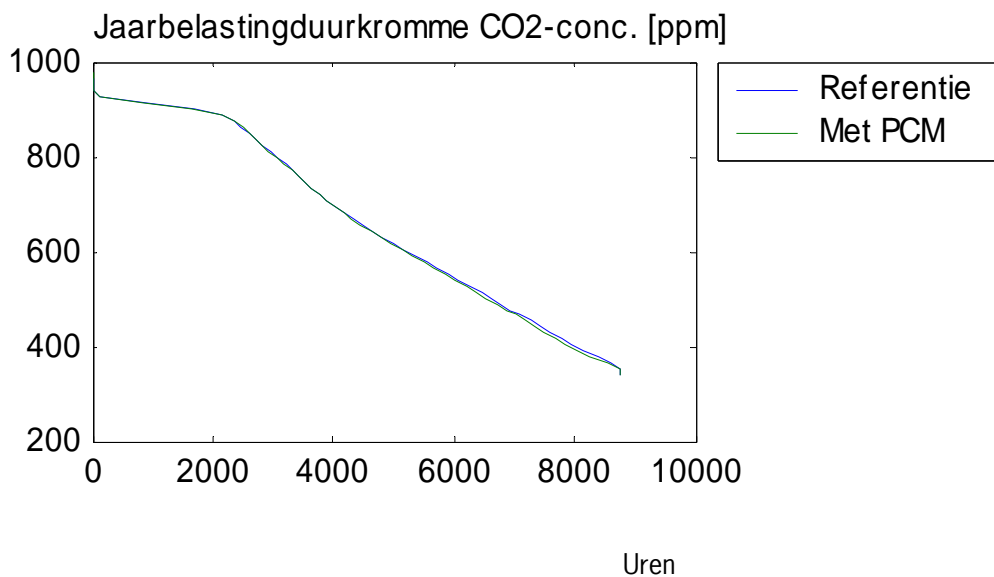
Percentage



Figuur 4 JBDK van de RV voor de situatie zonder (referentie) en met PCM.

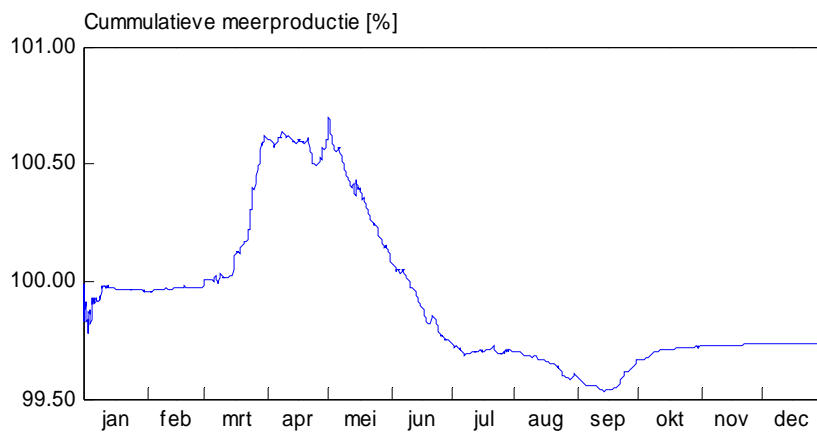
Uit de Figuur 4 blijkt dat de RV in de kritische gebieden (>85%) niet verandert t.g.v. PCM.

Concentratie in ppm



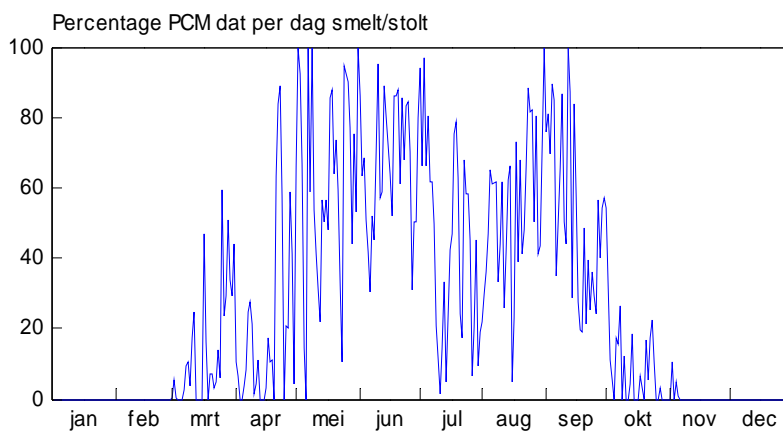
Figuur 5 JBDK van de CO₂-concentratie voor de situatie zonder (referentie) en met PCM.

Het aantal uren waarbij de concentratie CO₂ lager is dan ± 500 ppm is een fractie lager als gevolg van de PCM om dat de kas iets minder ventileert.



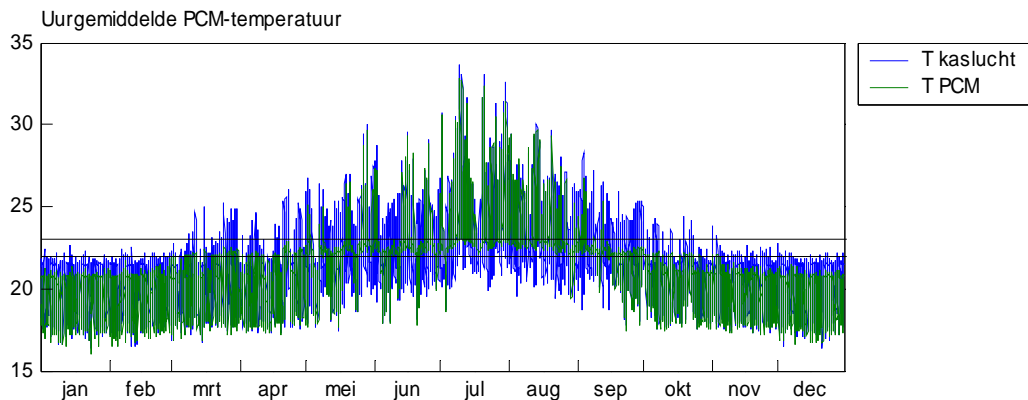
Figuur 6 Procentuele cumulatieve productie ten gevolge van het gebruik van PCM.

Ondanks dat de productie in de maanden april en mei wat hoger ligt blijft de productie op jaarbasis vrijwel gelijk. De productie stijgt in april, mei iets door dat de kas minder wordt gelucht en er daardoor meer CO₂ beschikbaar is voor groei.



Figuur 7 Percentage van het totale PCM-volume dat per dag van fase verandert.

In de koude maanden is de faseverandering van PCM nihil.



Figuur 8 Uurgemiddelde PCM-temperatuur in verhouding met de kasluchttemperatuur

Uit Figuur 8 blijkt dat de kasluchttemperatuur overdag in de maanden november tot en met februari niet of nauwelijks boven de stooktemperatuur uitkomt. Hierdoor smelt het PCM in deze energetisch belangrijke periode niet en is er geen energiebuffering. Naast de warmteoverdrachtscoëfficiënt blijkt de afstemming van de stolling/smelttemperatuur van de PCM op de kastemperatuur van wezenlijk belang op de mogelijkheid om energie te besparen.

In onderstaande tabel zijn de jaartotalen voor het gasverbruik als mede de besparing en piekverbruik weergegeven.

Tabel 2 Gasverbruik chrysant m³/m²

	Referentie (m ³ /m ²)	PCM (m ³ /m ²)	Besparing (m ³ /m ²)
LD	50.68	50.35	0.34
KD	47.54	47.10	0.44
Totaal (1:3)	48.33	47.91	0.42
Piekverbruik	200 m ³ /ha/u	200 m ³ /ha/u	Geen

Aantal keren (gedeeltelijk) stollen: 1890

Totale warmteafgifte: 80 MJ/m² (2.6 m³/m²)

Geconcludeerd kan worden dat het toepassen van PCM in de chrysantenteelt, in de meest gunstige situatie maximaal 0.42 m³/m² gas bespaart waarbij het kasklimaat en gewasproductie niet noemenswaardig afwijken van de situatie zonder het gebruik van PCM. Bij de simulaties is een temperatuurtraject van de PCM gekozen dat beter bij het kasklimaat zou moeten passen, dan het werkelijke traject van Delta-Cool 24. Theoretisch is met 5.5 kg PCM per m² met 100 volledige cycli een besparing van ruim 2.5 m³ aardgas per m² mogelijk. In de berekeningen is echter een besparing van 0.42 m³ aardgas per m² gehaald. Dit komt zoals eerder al is aangegeven door de geringe warmteoverdrachtscoëfficiënt in combinatie met een gering temperatuurverschil.

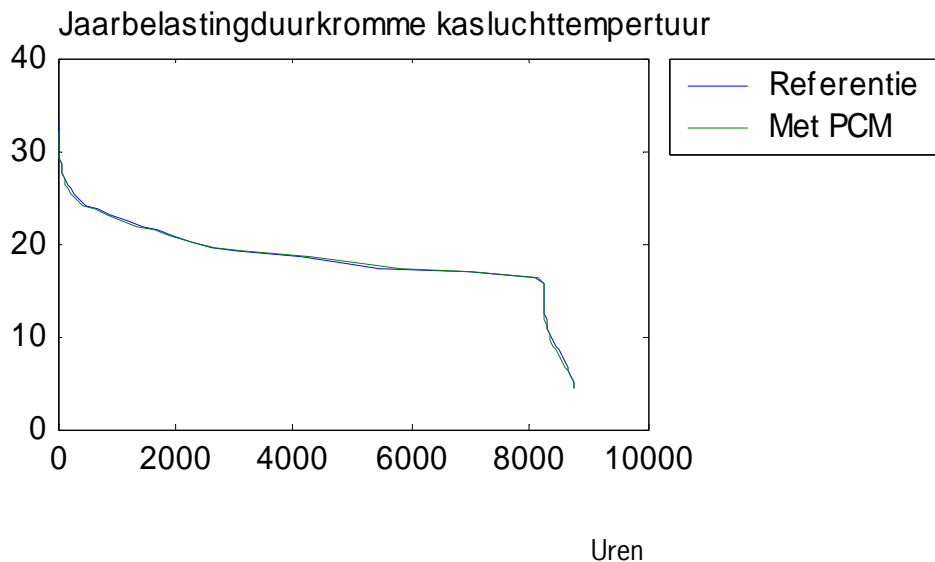
Het blijkt dat in de loop van een dag een aantal malen het temperatuur verschil tussen PCM en kaslucht kan wijzigen van positief naar negatief en omgekeerd, waardoor het aantal malen gedeeltelijk stollen en smelten hoger komt dan 365 dagen per jaar.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt en de fluctuaties in de gerealiseerde kastemperaturen zijn de beperkende technische factoren voor toepassing van PCM. In passing van PCM vraagt om een forse mate van temperatuur fluctuatie tussen nacht en dagtemperatuur. Dit is voor Chrysant met een scherm en negatieve DIF niet realistisch. Bij tomaat zou dit vanuit de plant gezien wel kunnen.

4.2 Tomaat

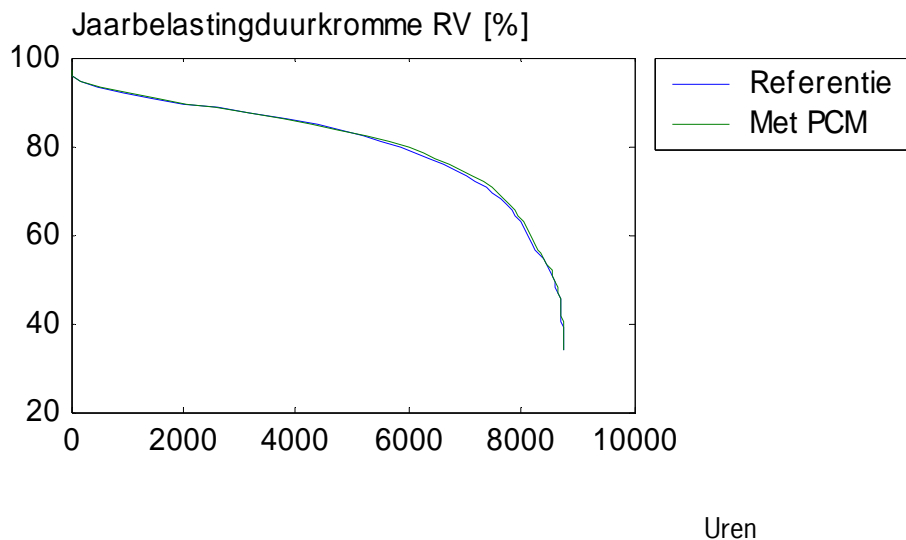
In onderstaande grafieken zijn de resultaten voor de situatie zonder PCM (referentie) en met PCM weergegeven. De effecten van PCM op het kasklimaat zijn groter dan bij chrysant maar blijven zeer klein. Ook hier liggen de lijnen vrijwel op elkaar.

Temperatuur in °C

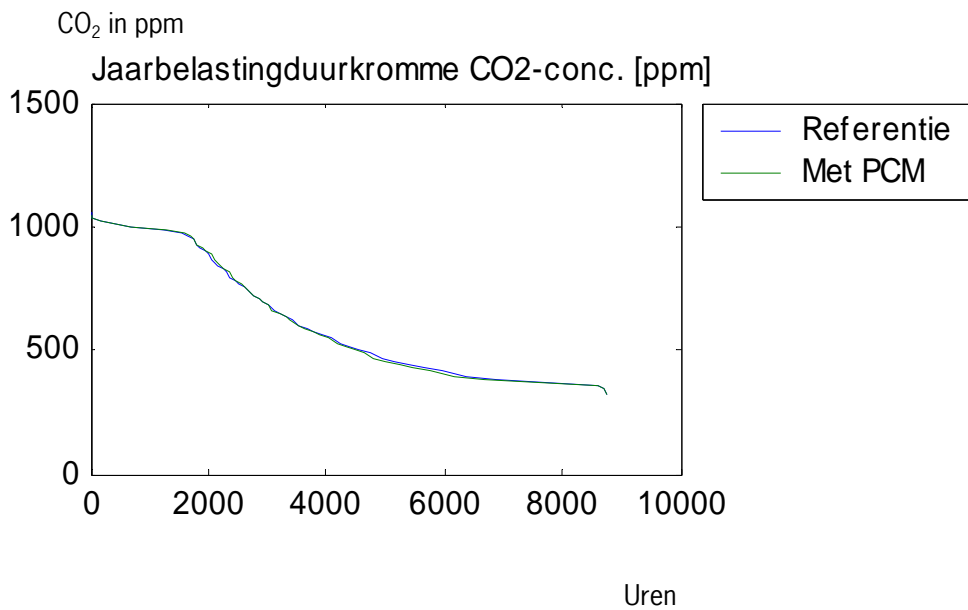


Figuur 9 JBDK van de kasluchttemperatuur voor de situatie zonder (referentie) en met PCM.

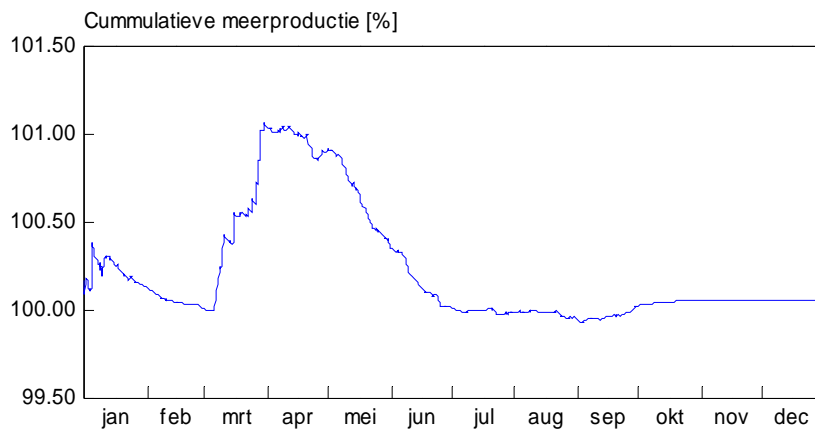
Luchtvochtigheid in %



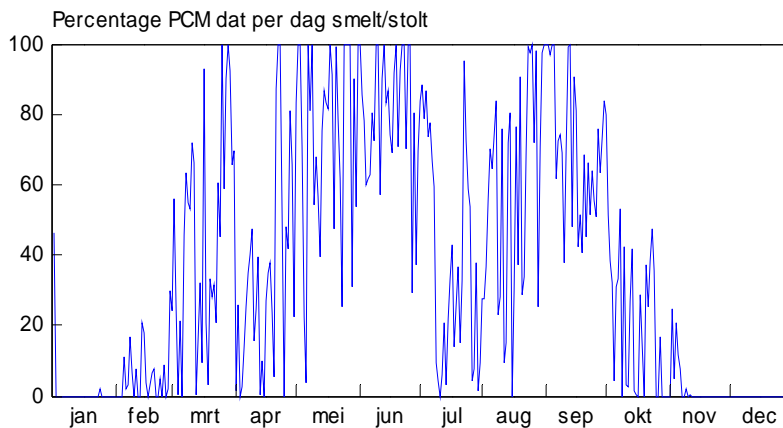
Figuur 10 JBDK van de RV voor de situatie zonder (referentie) en met PCM.



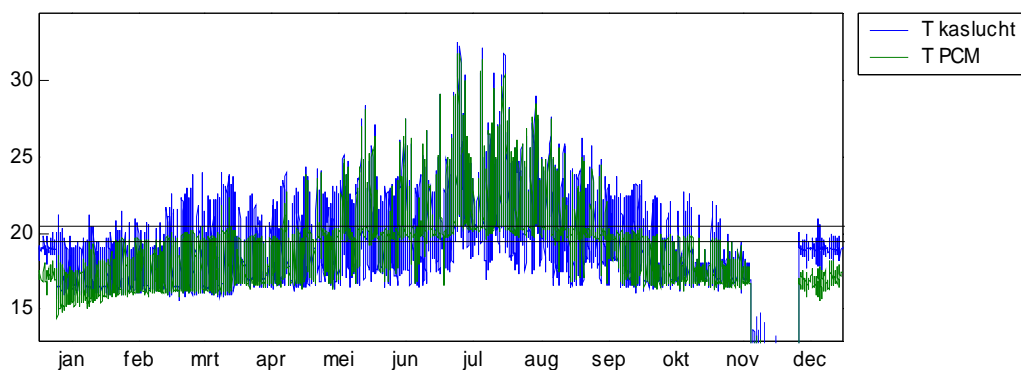
Figuur 11 JBDK van de CO₂-concentratie voor de situatie zonder (referentie) en met PCM.



Figuur 12 Procentuele cumulatieve productie ten gevolge van het gebruik van PCM.



Figuur 13 Percentage van het totale PCM-volume dat per dag van fase verandert.



Figuur 14 Uurgemiddelde PCM-temperatuur in verhouding met de kasluchttemperatuur.

In onderstaande tabel zijn de jaartotalen voor het gasverbruik evenals de besparing en piekverbruik weergegeven.

Tabel 3 Gasverbruik tomaat

	Referentie	PCM	Besparing
Jaarverbruik	43.80 m ³ /m ²	43.05 m ³ /m ²	0.74 m ³ /m ²
Piekverbruik	200 m ³ /ha/u	200 m ³ /ha/u	Geen

Aantal keren (gedeeltelijk) stollen: 1810

Totale warmteafgifte: 99 MJ/m² (3.2 m³/m²)

De conclusie voor tomaat is vrijwel gelijk aan die voor chrysant, met het verschil dat er iets meer gas bespaard wordt. Het toepassen van PCM in de tomatenteelt bespaart in de meest gunstige situatie maximaal 0.74 m³/m² gas op jaarbasis. Hierbij veranderen het kasklimaat en gewasproductie niet noemenswaardig ten opzichte van de referentiesituatie.

Piekverbruiken ontstaan in de koudste periodes van het jaar waarbij overdag geen of te weinig zonnewarmte benut kan worden om het piekverbruik in de nacht of 's morgens te verlagen.

5 Discussie en conclusie

In dit rapport is de toepassing van PCM in de glastuinbouw onderzocht voor de gewassen chrysant (met negatieve dif) en tomaat. Hierbij is uitgegaan de meest gunstige omstandigheden voor PCM wat betreft de hoeveelheid materiaal, stollingstraject en warmteoverdracht waarbij PCM in een moderne kas in principe toegepast zou kunnen worden zonder de bedrijfsvoering ten nadele te beïnvloeden. Dit houdt in: het PCM is tussen het gewas geplaatst waardoor geen stralingswarmte van de zon geabsorbeerd wordt.

Voor beide teelten is het perspectief van PCM slecht. In het gunstigste geval (tomaat) wordt ruim $0.7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ aan gas bespaard. De maximale gasafname wordt door het gebruik van PCM niet verlaagd. Dit komt omdat piekverbruiken ontstaan in de koudste periode van het jaar waarbij overdag geen of te weinig zonnewarmte benut kan worden om de piek in de nacht of 's morgens te verlagen. De verandering van het kasklimaat en de gewasproductie zijn zeer klein.

Bij chrysant werkt de hogere nachttemperatuur (neg. dif.) negatief door. Dit komt omdat de stollingstemperatuur voor PCM boven de nachttemperatuur moet liggen om 's nachts de overdag opgespaarde warmte te kunnen vrijgeven. De smelttemperatuur ligt daardoor nog hoger, zodat pas bij een stijging van de dagtemperatuur ten opzichte van de nachttemperatuur energie kan worden bespaard. Dit betekent dat de kasluchttemperatuur overdag boven de $21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ moet komen terwijl de ingestelde temperatuur van $18.5 \text{ }^\circ\text{C}$ is.

De belangrijkste oorzaken voor de lage energiebesparing is de lage warmteoverdracht van de kaslucht naar het PCM en het feit dat de kasluchttemperatuur in de koude periodes niet zo vaak boven de smelttemperatuur uitkomt. De lage warmteoverdracht is te wijten aan de minimale temperatuurverschillen tussen de kaslucht en het PCM en de lage warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen de buis en stilstaande lucht. Hierdoor verandert in de koude periodes slechts een klein percentage van het PCM van fase, dit ondanks de geringe buisdiameter.

De potentiële besparing met PCM kan hoger zijn als de zonnewarmte direct door het materiaal wordt opgenomen. Bij plaatsing tussen het gewas kan dit een bijdrage leveren, maar deze is in de studie bewust verwaarloosd, omdat het effect op productie door lichtonderschepping op nul is gesteld. Een tweede optie is het verhogen van de warmteoverdrachtscoëfficiënt door lucht geforceerd door een dubbelwandige buis met PCM te geleiden. Dit maakt het systeem echter duurder en de noodzakelijke hoeveelheid te besparen energie groter. Hieraan is niet gerekend.

De berekende energiebesparingen zijn zo klein dat overleg met telers over mogelijke toepassingen niet opportuun was. Er zijn ook geen prototypes gemaakt om de simulaties te testen op juistheid in de praktijk. Een bedrijfseconomische doorrekening is met de kleine energiebesparing niet zinvol. Invoering in de praktijk is niet realistisch.

Het onderzoek laat wel zien dat vergroting van de warmtecapaciteit van een kas door meer massa, gewas en dergelijke gunstig is voor het energiegebruik.

In de inleiding zijn de volgende vragen geformuleerd en in deze studie van een antwoord voorzien hieronder volgt een korte samenvatting van de vragen en antwoorden.

- op welke wijze kan de PCM het beste in de kas worden aangebracht, plaats, hoeveelheid, wijze van inkapseling.

Een optimale inpassing is gebruik van kleine buisjes om de warmteoverdracht tussen PCM en kaslucht zo groot mogelijk te maken. Een hoge verhouding tussen oppervlak en inhoud is belangrijk.

- wat is het gewenste temperatuurtraject voor de PCM in relatie tot het gewas

Het temperatuurtraject moet liggen tussen de stooktemperatuur in de nacht en stooktemperatuur van de dag. In de teelt is dit traject niet constant. Hierdoor neemt het effect van PCM af. Een negatieve dif, zoals bij chrysant, verlaagd het rendement van een PCM.

Op dit moment is een leverbaar temperatuur traject 21-23 °C. Dit is te hoog. Een temperatuurtraject van 18-20 °C zal beter zijn. Dit is op termijn wel realiseerbaar.

- hoe verloopt de kastemperatuur bij aanwezigheid van PCM

Er is weinig directe invloed op de kastemperatuur.

- heeft een verandering van het verloop van de kastemperatuur tot gevolg dat er minder wordt gelucht, zodat door een betere CO₂ benutting een hogere productie wordt bereikt

Er is een vrijwel geen invloed op productie.

- ontstaan door de aanwezigheid van PCM problemen met de vochthuishouding van de kas

Er ontstaan geen extra problemen met de vochthuishouding.

- wat zijn de risico's van PCM

De risico's van PCM zijn zeer gering.

- welke energiebesparing is met PCM te realiseren

De energiebesparing is bij gebruik van ruim 2 kg PCM per m² tussen de 0.4 en 0.7 m³/m²

- wat is de bedrijfseconomische haalbaarheid

Er is niet uitvoerig gerekend aan de economische haalbaarheid omdat de energiebesparing te gering is.

De haalbaarheid is negatief.

6 Literatuur en verwijzingen

Smeding, S.F. en P.W. Bach, 1997

Compacte thermische energieopslag bij kantoorgebouwen. ECN 97—C-039

Drie liter haus: <http://www.rheinneckarweb.de/basf/erleben/3literhaus/>

Website Productschaptuinbouw <http://www.tuinbouw.nl/default.htm>

<http://www.eere.energy.gov/consumerinfo/factsheets/db3.html>

TEAP: <http://www.teappcm.com/>

Rubitherm: <http://www.rubitherm.de/>

Bijlage 1 PCM data sheet.

RUBITHERM GmbH · A MEMBER OF THE SASOL WAX GROUP

Worthdamm 13 – 27 · D-20457 Hamburg · Phone (+49 40) 78 11 5-721-722 · Telefax (+4940) 78 11 5-544

HSH Nordbank (BLZ 200 500 00) Kto. 116 962 000

Managing Directors: Claus Dobrowolski, Harald Kuhlei

Form088e VAT-No. DE 172862574

EEC-Safety data sheet page 1/2

PHASE CHANGE MATERIAL

Version: 1 Date: 2004.02.05 Revision: 2002.08.13

1. Identification of the substance and company

RUBITHERM® RT 20

Manufacturer/supplier:

RUBITHERM GmbH

Worthdamm 13 - 27, D-20457 Hamburg

Tel.: +49-40-7 81 15 - 0, Fax: +49-40-7 81 15 - 414

Emergency telephone:

Safety engineer, Tel.: +49-40-7 81 15 -254 (24-hr-service)

2. Composition/information on ingredients

Chemical characterisation:

Liquid saturated hydrocarbons,

molecular formula C_nH_{2n+2}

CAS-number: 64771-72-8

EINECS-number: 265-233-4

3. Hazards identification

EEC-labelling: Xn, harmful

Potential dangers to health and environment:

May cause damage to lung if swallowed.

Repeated exposure may cause skin dryness or cracking.

Prolonged or repeated skincontact can cause dermatitis.

Danger of fire and explosion:

Slight risk. Product creates only ignitable mixtures or

burns, if temperature exceeds flash point.

4. First-aid measures

Inhalation:

The patient is to be removed immediately from premises and made to rest in a well ventilated area. Consult a doctor.

Eye contact:

Wash immediately with water. If irritation persists seek medical advice.

Skin contact:

Wash with plenty of water and soap. Change contaminated cloths.

If swallowed:

Do not under any circumstances induce vomiting. Keep patient calm and consult a doctor.

5. Fire-fighting measures

Suitable extinguishing media:

Carbon dioxide, foam, dry powder, sand, water mist

Extinguishing media that must not be used for safety reasons:

Water

Special exposure hazards arising from the substance, its combustion products or from resulting gases:

In the case of fire, combustion gases are formed: Carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), smoke

Special protective equipment for firefighting:

Use self-contained breathing apparatus

Additional information:

RUBITHERM GmbH · A MEMBER OF THE SASOL WAX GROUP

Worthdamm 13 – 27 · D-20457 Hamburg · Phone (+49 40) 78 11 5-721-722 · Telefax (+4940) 78 11 5-544

HSH Nordbank (BLZ 200 500 00) Kto. 116 962 000

Managing Directors: Claus Dobrowolski, Harald Kuhlei

Form088e VAT-No. DE 172862574

Cool endangered containers externally with water

Fire class according to DIN-EN 2: **B**

6. Accidental release measures

Personal precautions:

Remove persons to safe place.

Use gloves and protective clothing.

Environmental precautions:

Try to stop leakage.

Solid/liquid:

Do not allow to enter drains/surface waters/groundwater.

In case of the leakage of a large amount inform the responsible authorities

Methods for cleaning up:

Remove mechanically.

Use spill absorbent material.

7. Handling and storage

Handling

Hints on safe handling:

No special measures necessary if used correctly.

Hints for protection against fire and explosion:

Product vapours can form explosive mixture with air.

Storage

Requirements for storage rooms and containers:

Be careful when open container.

Do not store product close to open fire, heat or ignition sources. Material could electrostatic charge and eventually discharge. Thus take precautions (grounding and bonding) against electrostatic charge and prevent ignition sources.

8. Exposure controls / personal protection

Exposure limits:

Technical measures/Ventilation:

Assure appropriate ventilation if product is used at elevated

temperatures in closed rooms.

Occupational exposure limit (Germany):

n-paraffins C5-C20 from petroleum:

MAK = 200 ppm (1000 mg/m³)

Group 1, TRGS 900/901 (1997)

Personal Protective Equipment:

Respiratory protection:

When exceeding occupational exposure limits (maximum workplace concentration; MAK-value) for aerosols use appropriate breathing apparatus.

Hand protection:

Wear suitable protective gloves

Eye protection:

Wear safety goggles

Body protection:

Protective clothing

EEC-Safety data sheet page: 2/2

RUBITHERM® RT 20

9. Physical and chemical properties

Physical state: Liquid.

Colour: White/whitish

Odour: odourless

pH-value: not applicable

Melting point: 20 - 22 °C

Boiling range: > 250 °C

Flash point (PMCC): > 100 °C

Ignition temperature: 220 °C

Lower explosion limit:

40 g/m³

Upper explosion limit:

6,5 Vol.%

Vapour pressure at 20°C: < 1 hPa

Density at 25°C (DIN 51 757): 773 kg/m³

Relative density (101.3 kPa/air = 1): > 1,0

Solubility at 20°C

- in water: < 0,10 mg/l

Viscosity at 40°C (DIN 51 562): 3,58 mm²/s

10. Stability / reactivity

Conditions to avoid:

Under normal conditions no hazardous reactions likely

Material to avoid: Strong oxidising agents

Decomposition products: None

11. Toxicological information

Acute toxicity:

Oral LD50: > 2000 mg/kg (rat)

Dermal LD50: > 2000 mg/kg (rabbit)

Inhalativ LC50/4h: > 20 mg/L (rat)

Primary skinirritation: not irritating

Primary eyeirritation: not irritating

Sensibilisation. No data available

Mutagenicity: not mutagen

Carcinogenic effects: not carcinogen

Reproduction toxicity: not reprotoxic

12. Ecological information

Do not release product into environment.

Degradability:

product is readily biodegradable (OECD 301 F).

Aquatic toxicity:

LC50 / Fish (2 days):no effect (saturated solution)

EC50 / Daphnia ((2 days):no effect (saturated solution)

EC50 / Algae (3 days):no effect (saturated solution)

13. Disposal considerations

Product:

After re-conditioning the product may be used again or

thermally employed.

Can be disposed off after consultation with the responsible

authorities according to the following waste disposal codes

(European Waste Catalogue):

EWC-Code Description

07 01 04 organic solvents, washing liquids, and mother liquors.

07 01 99 Wastes not otherwise specified

14. Transport information

(ADR/RID; BinSchV/ADNR/ADN; IMDG/GGVSee; ICAO-TI und IATA-DGR):

Products like this one are not hazardous goods at temperatures < 100°C.

15. Regulatory information

Labelling in accordance with EC-regulations:

Xn harmful

Product is labelled and classified in accordance to 67/548/EEC (Dangerous Substances Directive) as amended.

Dangerous substance:

Paraffins (petroleum), normal

Risk-phase, R-phase:

R65 Harmful. May cause lung damage if swallowed.

R66 Repeated exposure may cause skin dryness or cracking.

Safety advice, S-phase:

S23 Do not inhale gas/smoke/vapour/aerosol

S24 Avoid contact with skin

S62 If swallowed: Do not induce vomiting!

Seek medical advice and show this packaging and label.

National regulations

Germany:

Classification according to VbF: Not applicable

TA Luft:

Substance class 3.1.7. III

Water hazard class (WGK): 1

StörfallVO: Not applicable

Swiss:

BAG-T-Nr. 610200; Poison class: 0

16. Other information

None.

This safety data sheet describes a product group. It contains only safety related information. For specific data see product data sheet.

Although the information contained herein is presented in good faith and to the best of RUBITHERM's knowledge and experience, it is made without any warranty or guarantee whatsoever.

In case any questions should arise please call the number given in point 1.

RUBITHERM GmbH

Bijlage 2: Uitgangspunten Gewassen voor KASPRO

Chrysant

Chrysanten worden jaarrond geteeld waarbij 1/4 deel van het kasoppervlak zich in een korte-dag stadium bevindt en 3/4 in het lange-dag stadium (1:3). Om dit mogelijk te maken wordt gebruik gemaakt van belichting en een verduisteringsscherm.

Verder gelden onderstaand bedrijfsuitrusting en teeltconcept.

Afmetingen & bedrijfsuitrusting

Kasoppervlak:	2 ha
Dekmateriaal:	enkel glas
Kapbreedte:	4 m
Goothoogte:	4.5 m
Ondernet:	5 × 35 mm per 4 m (secundair)
Bovennet:	2.5 × 51 mm per 4 m (primair)
Buffer:	120 m ³ /ha
Gasaansluiting:	200 m ³ /ha/u

Verduisteren & belichten

Er wordt een scherm gebruikt dat typisch is voor de chrysantenteelt en bestaat uit een energiescherm met daarop een 100% aluminium laag. Het scherm gaat open bij een globale straling groter dan 5 W/m² instraling. Als de kasluchttemperatuur hoger is dan 1.5 °C boven de kiertemperatuur dan wordt het scherm op een kier getrokken. Er wordt tevens een vochtkierregeling toegepast.

Er is een beweegbaar gevelscherm gemonteerd dat meeloopt met het verduisteringsscherm.

Er wordt van 01-10 tot 01-04 belicht met 3500 lux.

Klimaatsetpoints

Stooktemperatuur van 18.5 °C overdag en 21.5 °C 's nachts.

Setpoint RV: 85 %

Setpoint CO₂: 900 ppm

Minimum buis ondernet: 25-30 °C, afgebouwd tussen de 100-200 W/m², afhankelijk van de periode van het jaar

Minimum buis bovennet: 35-50 °C, afgebouwd tussen de 200-300 W/m², afhankelijk van de periode van het jaar

Instellingen Chrysant lange dag (LD)

De belichting wordt uitgeschakeld boven de 400 W/m² of een dagsom van 1500 J/cm² instraling.

De belichting is geblokkeerd van 20:00 u tot 24:00 u.

Instellingen Chrysant korte dag (KD)

Er wordt verduisterd van 18:00 tot 7:00 u.

De belichting wordt uitgeschakeld boven de dagsom van 1500 J/cm² instraling.

De belichting is geblokkeerd van 18:00 u tot 07:00 u.

Tomaat

De tomaten worden op 11/12 geplant en op 20/11 geruimd. In de braakliggende periode wordt niet gestookt.

Verder gelden onderstaande bedrijfsuitrusting en teeltconcept.

Afmetingen & bedrijfsuitrusting

Kasoppervlak:	2 ha
Dekmateriaal:	enkel glas
Kapbreedte:	4 m
Goothoogte:	4.5 m
Ondernet:	5 × 51 mm per 4 m (primair)
Bovennet:	2.5 × 28 mm per 4 m (secundair)
Buffer:	120 m ³ /ha
Gasaansluiting:	200 m ³ /ha/u

Er wordt van 15/09 tot 01/05 een LS10 UltraPlus energiescherm gebruikt. Het scherm gaat open bij een globale straling groter dan 50 W/m² instraling en een buitentemperatuur van 7 °C tot half februari en 5 °C de rest van het jaar. Als de kasluchttemperatuur hoger is dan 1.5 °C boven de kiertemperatuur dan wordt het scherm op een kier getrokken. Er wordt tevens een vochtkierregeling toegepast.

Er is een beweegbaar gevelscherm gemonteerd dan meeloopt met het verduisteringsscherm.

Klimaatsetpoints

Stooktemperatuur:

11/12 - 10/01	dag en nacht 19 °C
10/01 - 31/03	overdag 19 en 's nachts 16.5 °C
31/03 – 20/11	overdag 18 en 's nachts 17 °C

Setpoint RV: 85 %

Setpoint CO₂: 1000 ppm maximum

Minimum buis ondernet: continu 35, tijdens opstoken 40 °C, afgebouwd tussen de 100-250 W/m². Geen minimum buis bovennet

Bijlage 3: Uitgangspunten PCM

Warmteoverdracht

In onderstaande tabel zijn de warmtegeleidingscoëfficiënten van de diverse componenten van een buis met DELTA-COOL 24 weergegeven.

Tabel 1 Warmtegeleiding van de verschillende onderdelen van een 8 mm dikke buis met DELTA-COOL 24 met een 1 mm dikke rand van polypropyleen.

	Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/m K)	Warmteoverdrachtscoëfficiënt (W/m ² K)
Polypropyleen	0.22	220
DELTA-COOL 24, vast	1.12	373
DELTA-COOL 24, vloeibaar	0.56	187
Convectieve warmteoverdracht kaslucht - buis	-	2

Uit bovenstaande tabel blijkt de beperkende factor de warmteoverdracht tussen kaslucht en buis is. Om van de meest gunstige omstandigheden uit te gaan wordt de warmteoverdracht door het polypropyleen omhullingmateriaal en in het DELTA-COOL 24 materiaal zelf als oneindig groot beschouwd. Dit betekent dat de warmtegeleiding in werkelijkheid zeker lager zal liggen. Hierdoor zal de werkelijke besparing lager uitkomen dan in de simulaties is berekend.

Temperatuurtraject

PCM stolt als de temperatuur onder een bepaalde temperatuur zakt. Bij dit stollingsproces komt veel warmte vrij. Als de temperatuur oploopt tot boven de smelttemperatuur neemt de PCM weer warmte op. Er zijn PCM's voor verschillende temperatuurniveaus.

De Chrysantenteelt heeft een stooktemperatuur van 18.5 °C overdag en 21.5 °C 's nachts. Uitgangspunt van het toepassen van PCM is het overdag benutten van gratis zonnewarmte als de kasluchttemperatuur boven de stooktemperatuur uitkomt om die vervolgens 's nachts vrij te geven wanneer er wel gestookt moet worden. Voor chrysant betekent dit dat het PCM ('s nachts) pas de volledige stollingswarmte kan afgeven als de stollingstemperatuur boven de nachttemperatuur van 21.5 °C ligt. Het stol/smelt-traject is daarom het meest perspectiefvolle traject gekozen van 22 tot 23 °C met een delta T van 1 °C die laag gehouden is om het temperatuursverschil met de kaslucht zo hoog mogelijk te maken (zie Tabel 2). Voor tomaat, met een stooktemperatuur van 19 °C overdag en 19 °C 's nachts in de koudste maanden, is een stol/smelttraject van 19.5 tot 20.5 °C gekozen.

In onderstaande tabel is per gewas het temperatuurtraject weergegeven waarin het PCM van fase verandert. Dit temperatuurtraject is, ongeacht de verkrijgbaarheid [van PCM in dit traject, zo gunstig mogelijk gekozen. De stollingswarmte van 158 kJ/kg wordt als soortelijke warmte bij de gegeven gemiddelde soortelijke warmte van 2.5 kJ/kg.K opgeteld over een ΔT van 1 °C. Op dit moment is een PCM verkrijgbaar met een traject van 22-24°C. Experimenteel zijn er PCM's die onder de 20 °C kunnen komen.

Tabel 2 Temperatuurtraject en soortelijke warmte van PCM

Temperatuurtraject (°C)		Soortelijke warmte (kJ/kg.K)
<i>Chrysant</i>	<i>Tomaat</i>	
< 22	< 19.5	2.7
22 tot 23	19.5 tot 20.5	160.5
> 23	> 20.5	2.3