

Potentie PCM in glastuinbouw

Worldwide Expertise for Food & Flowers

Stijn Jochems¹, Liesanne Wieleman²

1 Delphy Improvement Centre
2 Thermeleon

Bleiswijk, september 2022

Projectnummer Stichting Kennis in je Kas (Kijk): E22002

Dit project / onderzoek is tot stand gekomen in het kader van programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland en mede gefinancierd door de Stichting Kennis in je Kas



Stichting
Kennis in je Kas



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit

Disclaimer

© 2022 Delphy Improvement Centre, Violierenweg 3, 2665 MV Bleiswijk, Tel. 010- 522 1771

Dit document is auteursrechtelijk beschermd.

Delphy is niet aansprakelijk voor eventuele schade als gevolg van gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen

Inhoudsopgave

| | |
|---|----|
| Samenvatting | 4 |
| 1. Inleiding | 5 |
| 1.1. Achtergrond | 5 |
| 1.2. Doelstellingen | 6 |
| Onderzoeksvragen | 6 |
| 2. Aanpak | 7 |
| 2.1. Data verzameling..... | 7 |
| 2.2. Data simulatie | 7 |
| 2.3. Interviews | 7 |
| 3. Resultaten en discussie..... | 8 |
| 3.1. Werking technologie: Phase Change Material (PCM) | 8 |
| Eerder onderzoek PCM-toepassing in kassen | 8 |
| 3.2. Beschrijvingen temperatuurprofielen per teelt | 9 |
| 3.2.1. Aardbei..... | 9 |
| 3.2.2. Tomaat..... | 9 |
| 3.2.3. Komkommer | 10 |
| 3.2.4. Paprika | 10 |
| 3.2.5. Chrysant & Lisianthus..... | 10 |
| 3.2.6. Orchidee (Phalaenopsis) | 11 |
| 3.2.7. Anthurium..... | 11 |
| 3.3. Effect van PCM-technologie | 12 |
| Voor- en nadelen van PCM-technologie..... | 12 |
| 3.4. Risicoanalyse PCM-technologie in kasomgeving | 12 |
| 3.5. Bepaling potentie & doelgroepen | 13 |
| 3.6. Business case PCM-technologie | 14 |
| 4. Conclusie | 14 |

Samenvatting

De glastuinbouwsector heeft te maken met energieoverschotten en – tekorten. Om de warmtevraag in te vullen wordt nog vaak energie vanuit fossiele bronnen gebruikt. Om te voldoen aan de gestelde klimaatdoelen in 2040 moet de warmte efficiënter benut worden, en zijn alternatieve bronnen van energie nodig om de kassen op te warmen. PCM (Phase Change Material, faseovergangsmateriaal) is een voor de glastuinbouw nieuwe techniek die aansluit bij de transitie naar fossielvrije teelten. In de overgang van fases wordt energie opgeslagen en afgegeven, en doordat er uit verschillende productinstallaties gekozen kan worden (denk aan bijvoorbeeld het type PCM en het kasintegratie ontwerp), kan voor meerdere gewassen en teeltsystemen een optimum in energie-efficiëntie en productie gevonden worden.

De werking van PCM in een kasomgeving is te vergelijken met een Chinese zonnemuur waarbij energie overdag wordt opgeslagen (waarbij de lucht wordt gekoeld) die in de nacht weer wordt afgegeven (waarbij de lucht opwarmt); met een lager verschil tussen dag- en nachttemperatuur (DIF) tot gevolg. Dit leidt tot minder ventilatie overdag mits het vocht beheersbaar blijft, waarmee het verlies van CO₂ wordt beperkt, en minder energieverbruik in de nacht om de kas op temperatuur te houden. Daarbij moet per type gewas een passend kasintegratie ontwerp ontwikkeld worden, zodat het binnenklimaat niet nadelig wordt beïnvloed.

De potentie van PCM hangt dus onder andere af van de gewenste dag- en nachttemperaturen. Teelten met een lagere DIF worden geteeld bij een temperatuurregime dat goed aansluit bij de eigenschappen van PCM en bieden de meeste potentie. Daarbij zijn teelten met een relatief hoge nachttemperatuur ook erg interessant, omdat de kastemperatuur op dat moment afhankelijk is van de input van energie. Zeker in kassen waar intensief geschermd wordt om energie binnen te houden kan PCM het gasverbruik uitstellen. Bovendien kan het toegepaste verwarmingssysteem efficiënter in verbruik worden toegepast door de PCM-integratie. Daarbij biedt het mogelijkheden voor een betere uniformiteit van het kasklimaat. Hierdoor is koudeval en hittestress significant te reduceren met als gevolg een hogere productie en/of plantkwaliteit.

In kwalitatieve interviews met telers, adviseurs en experts, werd voor meerdere gewassen besproken welke invloed het PCM zou hebben op het klimaat, gewas, en teeltresultaat. De gewassen die hiervoor zijn vergeleken zijn: tomaat (belicht/onbelicht), paprika, komkommer, anthurium, chrysant, aardbei, phalaenopsis (opkweek-, koel-, bloeifase). Al snel werd duidelijk dat een teelt met een hoge gewenste DIF zoals aardbei niet goed aansluit omdat de hogere nachttemperaturen het uitgroeien van de vruchten zou versnellen en de vruchtkwaliteit zou verlagen. Vruchtgroenten (tomaat, paprika, komkommer, aubergine) hebben een grotere warmtebehoefte in de nacht waardoor zich daar een betere aansluiting vindt. Daarnaast zijn in deze hogedraadteelten veel verschillende opties voor de integratie van PCM. In de onderste twee meter van de stengel onderscheppen de bladeren weinig licht, waardoor het PCM geïntegreerd kan worden zonder nadelig effect op de plant. In het geval van sierteelt wordt bij een aantal gewassen ook met hogere nachttemperaturen geteeld, te denken aan bijvoorbeeld chrysant, lisianthus, phalaenopsis en anthurium. In deze teelten is er ook veel potentie om met PCM het gasverbruik te verlagen, door overdag het beschikbare overschot aan warmte langer in de kas vast te houden zonder temperatuurstijging gedurende de dag. Bij chrysant en lisianthus is de lichtbehoefte echter groot en worden de planten vaak zonder grote tussenruimten in de grond geteeld. Voor dit type teelt wordt de installatie beperkt door het belang zo min licht te onderscheppen. Een grotere installatie is mogelijk mits de belichtingstrategie hierin wordt meegenomen en eventueel aangepast. Teelten met een lagere lichtbehoefte zoals phalaenopsis en anthurium hebben meerdere mogelijkheden wat betreft installatie.

PCM-technologie in de kas heeft de hoogste potentie in vruchtgroenten en sierteelten met een relatief lage lichtbehoefte, maar voordat grootschalige toepassing plaats kan vinden is het nodig om in pilots en kasproeven het effect op kasklimaat kwalitatief te onderzoeken, bijvoorbeeld op de flexibiliteit van de temperatuurstrategieën voor vruchtgroenten, en het opdrogen van de potten in potteelten. Voor sierteelt, met als voorbeeld een onbelichte Anthurium, is een substantiële reductie tot 30% te realiseren zonder verdere teeltoptimalisaties om de reductie verder te verhogen. Om de energie-efficiëntie te optimaliseren dient per teelt een teeltstrategie gemaakt te worden waarin wordt meegenomen: type PCM, het gewenste effect op het binnenklimaat en energiebehoefte voor koeling

en verwarming, type installatie en ontwerp. Met het beschikbare warmteoverschot van zowel vruchtgroenten en sierteelten is zo een reductie van potentieel 30% te realiseren door PCM-technologie.

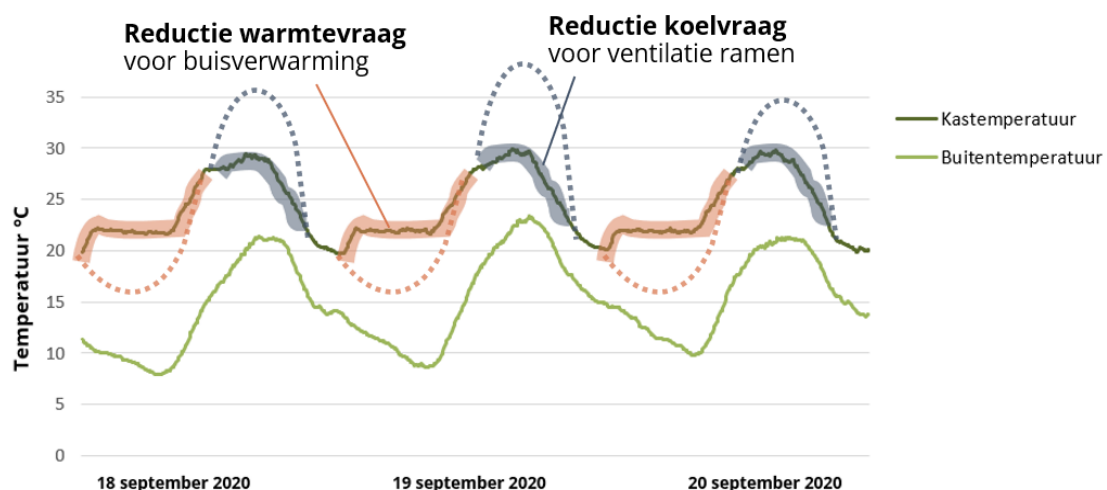
1. Inleiding

1.1. Achtergrond

Vanuit de markt is er behoefte naar een betaalbaar (duurzaam) alternatief om de totaal energievraag voor zowel koelen als verwarmen te reduceren en de bijbehorende energiekosten te verlagen. Alles wat niet verbruikt wordt hoeft immers niet te vervangen met hernieuwbare energiebronnen. Ondertussen genereert een kas jaarrond meer warmte dan de huidige (nu vooral met fossiele brandstof aangeleverde) warmtevraag. Er is echter een timingprobleem: overdag wordt natuurlijk extra warmte gegenereerd, maar 's nachts is er vraag naar (Figuur 1). Daarbij gaat de overtollige warmte via de ramen verloren samen met de CO₂ – benodigd voor optimale plantengroei –, resulterend in extra CO₂-uitstoot. Op dit moment wordt echter nog zo'n 85% van de energie in kassen opgewekt door verbranding van fossiele brandstoffen, voornamelijk aardgas. Van het totale aardgasverbruik in Nederland wordt 9% gebruikt door de glastuinbouw sector. Tegelijkertijd piekten de gasprijzen tot >800% van de oorspronkelijke prijs van 2021, welke inmiddels weer stabiliseren. Een kas heeft over het algemeen een warmteoverschot gemiddeld tussen maart en oktober. Dit warmteoverschot biedt kansen voor PCM-technologie om strategisch gebruik te maken van het warmteoverschot, waarbij het timingverschil in warmte- en koelvraag tussen de dag en nacht deels wordt opgelost. De potentiële reductie van PCM-technologie kan gerealiseerd worden door per teelt een juiste installatie te kiezen.

De stijgende behoefte voor energie-efficiëntie veroorzaakt twee trends vanuit de markt:

1. Behoefte voor duurzame en betaalbare verwarming (met name gedurende de nacht en winterperiode). Door de totale energievraag te reduceren is de teler minder afhankelijk van instabiele aardgasprijzen en is de CO₂-uitstoot te verlagen.
2. Stijgende behoefte voor koeling, onder andere om de geïnjecteerde CO₂ langer in de kas te houden voor hogere productievermogen per oppervlakte en hittestress te voorkomen.



Figuur 1. Temperatuurprofiel inclusief demping door PCM-technologie en resulterende reductie energievraag.

1.2. Doelstellingen

Het doel van het onderzoek is om te bepalen in welke teelt en welk teeltsysteem PCM het beste aansluit, en welke rol het kan spelen in de fossielvrije glastuinbouw. Daarvoor wordt gefocust op de volgende onderdelen:

- Het in kaart brengen van de recente ontwikkelingen van PCM-technologie inclusief de kansen die het kan bieden voor de glastuinbouw sector.
- Het in kaart brengen van de voor- en nadelen per teelt en teeltsysteem en de potentiële risico's door de PCM-technologie
- Selectie voor welke teelt de PCM-technologie de meeste waarde kan bieden

Onderzoeksvragen

1. Welke ontwikkelingen zijn er over de afgelopen jaren geweest op gebied van PCM-technologie?
2. Welke kansen en risico's kan PCM-technologie bieden voor de glastuinbouw?
3. Voor welke gewassen is een gedempte temperatuurcurve (lagere DIF) geschikt? En welke momenten van de dag zijn kritisch – en waarom? Met name de timing van de verwarming en koeling spelen hier een belangrijke rol.
4. Zijn er bepaalde knelpunten in bestaande teelten waar PCM een voordeel kan bieden?
5. Welke gewassen maken gebruik van welk type scherming, belichting, verwarmings- en koelingsinstallaties?

2. Aanpak

2.1. Data verzameling

PCM toepassen in de glastuinbouw zal een direct effect hebben op de temperatuur en luchtvochtigheid. Om het effect van het PCM op kasklimaat te kunnen simuleren is het gebruik van nauwkeurige en realistische data gewenst. Hierom is gefocust op data met 5-minuten interval van in ieder geval de temperatuur, luchtvochtigheid, en het CO₂ gehalte dat indirect beïnvloed wordt door het veranderende temperatuur- en relatieve luchtvochtigheidsprofiel van de kas.

2.2. Data-simulatie

De potentiële prestatie van PCM-technologie is gebaseerd op het beschikbare warmteoverschot per teelt op jaarbasis. Hiervoor wordt de algemene capaciteit van PCM-technologie bepaald op basis van de gemiddelde werking van een PCM. De data zal resultaten leveren voor de potentiële energiereductie voor verwarming en koeling, in combinatie met de 5-minuten data van het kasklimaat. Per seizoen worden verschillende periodes met elkaar vergeleken inclusief de impact van PCM-technologie, welke een basis zal vormen voor de interviews om zo toe te werken richting een SWOT-analyse om de kansen en risico's van PCM-technologie te bepalen. Voor de data-simulaties is de data van anthuriumteelt gebruikt voor een grondige analyse van de werking van het PCM op het kasklimaat. Daarnaast is per gewastype een data-analyse uitgevoerd in Python op basis van de 5-minuten data van het kasklimaat om de verschillen per gewas te analyseren.

2.3. Interviews

Interviews zijn gepland met telers en teeltadviseurs voor de meeste gewassen. Interviews werden gestart met een algemene toelichting over PCM en de verwachte gevolgen van het toepassen van PCM in de teelten; een koelere dagtemperatuur, een hogere nachttemperatuur, en daarmee een lagere DIF. Daarna werd gediscussieerd over het effect van PCM op het klimaat, en werd gevraagd naar het effect van het klimaat op het gewas en teeltresultaat.

In deze kwalitatieve interviews werd bepaald welke grenzen op dit moment worden aangehouden in de teelt van het gewas op het gebied van temperatuur. Daarbij moet gerealiseerd worden dat de kennis over deze grenzen vaak opgebouwd is uit jarenlange ervaring. Het toepassen van PCM of een nieuwe teeltstrategie die niet zou aansluiten op de huidige manier hoeft, tenzij bewezen, daardoor niet per definitie afgestoten te worden. Zo zou bijvoorbeeld ook de teelt(-strategie) aangepast kunnen worden aan het gebruik van PCM, door te kiezen voor een andere klimaatstrategie, ander ras, ander planttype, andere plantdichtheid, etc.

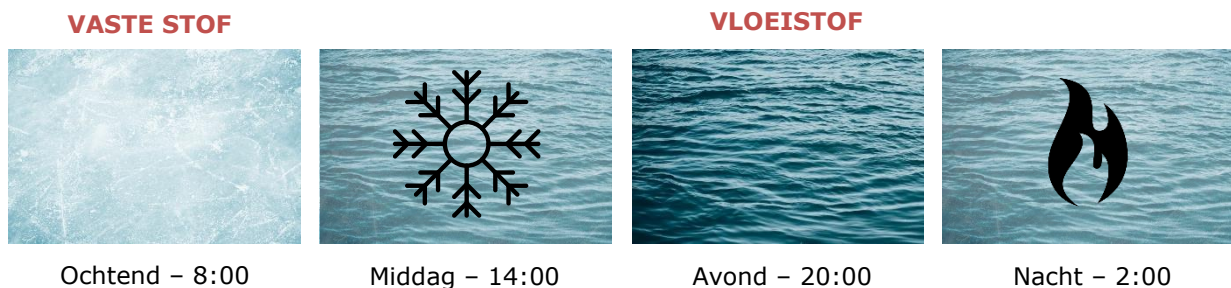
Daarnaast is in deze interviews gevraagd om een inschatting van de inrichting van een gemiddeld bedrijf per teelt op het gebied van belichting, verwarming, koeling, en schermen.

3. Resultaten en discussie

3.1. Werking technologie: Phase Change Material (PCM)

PCM-technologie is een potentiële technologie om de behoeftes voor energie-efficiëntie te vervullen door strategisch gebruik te maken van de overtollige warmte die al aanwezig is in de kas en zowel duurzame koeling als verwarming te leveren, waardoor de kas als geheel energie-efficiënter gemaakt wordt, de energiekosten met potentieel 10-30% worden gereduceerd, en de extreme temperatuurpieken van het binnenklimaat worden gedempt voor een optimale plantengroei.

Efficiënte warmteopslag is essentieel om in de glastuinbouw klimaatneutraal te kunnen gaan telen door de totale energievraag te verlagen. PCM-technologie is met name voor de toepassing als etmaalbuffer erg geschikt. Door de korte duur van een cyclus kan het PCM veelvoudig in fase veranderen per jaar en daardoor een grote capaciteit leveren op jaarbasis. Het PCM slaat overdag de warmte op, koelt de kas, en laat het 's nachts weer vrij waarbij de kas opwarmt, zie Figuur 2.



Figuur 2. Werking PCM-technologie gedurende de dag-nachtcyclus.

De unieke eigenschap van het PCM om tijdens de faseovergang (van vaste stof tot vloeistof en vice versa) een grote hoeveelheid latente warmte te bufferen, maakt het mogelijk op een specifiek temperatuurbereik een grote warmtecapaciteit te leveren. PCM biedt de waarde van verwarming, koeling, vermindert de CO₂-uitstoot en voorkomt hittestress. Door PCM toe te passen is het mogelijk om met een zeer klein volume een significante thermische capaciteit te realiseren. Elk type PCM heeft hierbij een wisselende prestatie en dus variabele thermische capaciteit.

Eerder onderzoek PCM-toepassing in kassen

PCM-technologie wordt in verschillende sectoren al succesvol toegepast, waaronder voor koeltransport, datacenters, en woningbouw. Zo is eerder ook de toepassing van PCM in de glastuinbouw onderzocht. Hieruit is te concluderen dat de prestatie en effect op het binnenklimaat sterk afhankelijk is van het PCM type, de totale thermische capaciteit, en het type installatie.

PCM-technologie is erg complex om in een kas te integreren door de vele variabelen die invloed hebben op de werking. Zo zijn er veel PCM-classes (organisch, anorganisch, eutectisch) met ieder specifieke voor- en nadelen. Veelal worden paraffine (organisch) en zouthydraten (anorganisch) toegepast in de genoemde sectoren. Paraffine hebben als voordeel een hoge stabiliteit (geen supercooling) en ruime keuze in smelttemperaturen, maar als nadeel brandbaarheid. Zouthydraten hebben als voordeel een grote latente warmteopslag, maar als nadeel corrosiviteit en instabiliteit (veroorzaakt door het effect supercooling). Bij het toepassen van een PCM-technologie dient niet alleen de juiste smelttemperatuur geselecteerd te worden, maar ook de materiaaleigenschappen meegenomen te worden.

Eerdere studies naar PCM-technologie in de sector bevestigen zowel de potentie voor energie-efficiëntie als de complexiteit betreft kasintegratie. Daarbij stimuleert de hoge energieprijis veel energie reducerende technieken en maatregelen doordat de businesscase hiervoor makkelijker rond te rekenen is dan in het verleden. In 2004 werd zo een computerstudie, een haalbaarheidsstudie, naar PCM uitgevoerd (WUR 2004), waarbij de energiereductie op basis van de simulatie beperkt is gebleken. Hierbij werd het PCM omhuld in zwarte buizen in de kas met een uiteindelijke reductie van 0,4-0,7 m³ aardgas / m² kas. Terwijl in andere studies een temperatuurverschil van 6-12 °C

(Berroug 2011) is aangetoond. Deze onderzoeken maakten gebruik van een ander PCM type, thermische capaciteit, en ontwerp voor de installatie, waardoor het effect significant verschilt.

Elke teelt en locatie heeft een wisselende voorkeur voor temperatuurprofiel, welke moeilijk is om rond te rekenen en te specialiseren voor een geschikt kasklimaat. Grondige praktijktesten zijn hiervoor nodig om het gewenste temperatuurprofiel te realiseren en de plant optimaal te laten groeien.

3.2. Beschrijvingen temperatuurprofielen per teelt

3.2.1. Aardbei

De aardbeienteelt in Nederland kent een verschuiving naar bedekte teelten onder plastic of glas. Met name het areaal onder glas kende de afgelopen jaren een sterke toename. De doorteelt met junidragende aardbeien zoals Elsanta en Sonata is nog steeds de meest voorkomende teelt. Deze teelt wordt over het algemeen gekenmerkt door een grote DIF. Gewenste nachttemperaturen liggen rond de 8 °C, en de maximumtemperatuur kan stijgen tot wel 25 °C. Gedurende grote tijd in de gehele teeltperiode is de verwarming van PCM in de avond ronduit ongewenst. Een koele nachttemperatuur wordt aangehouden om de uitgroeisnelheid te beperken en de vruchtkwaliteit te verhogen. Bij een hogere nachttemperatuur wordt de maximale uitgroeiduur en kwaliteit niet gerealiseerd, en blijven de vruchten kleiner en van mindere kwaliteit. Daarnaast worden bij een doorteelt de planten in de winter in rust gezet en is het doel om temperaturen van 0-5 in de kas te houden. Ook hierbij is het juist belangrijk de koelte van de nacht te benutten en kent verwarming geen goede aansluiting.

De laatste jaren wordt meer gefocust op het gebruik van doordragende aardbeien, en in nog recentere jaren ook het gebruik van low-chill planten. Daar ligt het temperatuurprofiel anders. Deze planten kunnen over het algemeen met een lagere DIF geteeld worden; hier zijn de optimale nachttemperaturen 10-12 °C met op de dag een maximum temperatuur van 25 die bereikt mag worden. Belangrijke kanttekening hierbij is dat met deze teelten minder ervaring is opgedaan dan de welbekende doorteelt, en optima van temperaturen zijn hier flexibeler dan bij de doorteelt. Zo kan de optimale dag- en nachttemperatuur en DIF anders zijn dan hier beschreven staat. In de teelt van doordragers is het gebruik van PCM interessant om een koelere dagtemperatuur in de zomer te realiseren. Het verwarmen is echter van minder waarde.

3.2.2. Tomaat

Tomaat wordt met relatief warme temperaturen geteeld en kent een behoorlijk gasverbruik, in een onbelichte teelt wordt een gemiddelde etmaaltemperatuur van 19.5 °C met een jaarlijks gasverbruik van 30 m³/m² gerealiseerd. Al moet hierbij de kanttekening gemaakt worden dat wegens de hoge energieprijzen ook positieve ervaringen op zijn gedaan met 25 m³/m². In belichte teelten ligt de etmaaltemperatuur op een gelijk niveau met een gasverbruik van 35-40 m³/m².

PCM heeft hier veel potentie omdat de nachttemperatuur doorgaans boven 16 °C ligt, waardoor de verwarmingsbehoefte hoog is. Om aan deze warmtevraag te voldoen wordt vaak buiswarmte gebruikt en wordt een energiescherm, verduisterscherm (in belichte teelten), of beiden gesloten. Het toepassen van PCM zou in deze situatie een gedeelte van de warmtevraag in de nacht (bij onbelichte teelten) of onbelichte nacht (bij belichte teelten) in kunnen vullen. In belichte teelten is er op etmaalbasis in de winter ook sprake van een warmteoverschot als intensief geschermd wordt. PCM past goed in dit teeltconcept, dat gezien wordt als toekomstbestendig en waar veel onderzoek naar wordt gedaan. Een koelingsvraag overdag is er vanuit plantfysiologisch oogpunt niet direct zoals dat bij aardbei het geval is. Het langer kunnen uitstellen van ventileren leidt echter wel tot een efficiëntere CO₂ benutting.

Als de installatie licht wegneemt in de onderste delen van de plant, heeft dat een relatief klein effect op de totale gewasfotosynthese, aangezien het meeste licht in de bovenste twee meter van de plant wordt opgevangen. Bij het ontwerpen van de installatie dient een inschatting gemaakt te worden in hoeverre de mate lichtonderbreking opweegt tegen de gereduceerde productie

tegenover de bespaarde energiekosten. PCM zou in een lichtere omgeving als Spanje beter tot zijn recht kunnen komen, maar daar is de 'pijn' van hogere energieprijzen minder groot.

3.2.3. Komkommer

In dit project is gefocust op de onbelichte komkommerteelt vanwege het kleine areaal belichte komkommer op het moment van het uitvoeren van dit project. De dagtemperatuur is gemiddeld 21 °C, de nachttemperatuur ligt rond de 18 °C met een minimumtemperatuur van 16 °C. Enkele telers passen nog het gebruik van een voornacht toe om de gewasbalans te beïnvloeden. Daarnaast wordt er, net zoals bij aubergine, gesproken over het risico van te snel opwarmen overdag. De kans bestaat dat de vruchten dan namelijk natslaan, hetgeen schimmelinfecties kan veroorzaken. Naar beide fenomenen is onderzoek gedaan en met de juiste informatie (data) kan energie bespaard worden door beter geïnformeerde beslissingen te maken op het juiste moment.

Daar waar het licht al is onderschept, is plaats voor installeren van PCM. Bij de tomaat is dat een relatief groot gedeelte. Als PCM licht wegneemt bovenin de plant, is dat nadelig. Krijten wordt in principe alleen gedaan als het warm is in de beginfase, en licht wegnemen in de zomer kan ook met het enkel energiescherm dat veel tuinders hebben, dat ook nog eens flexibel in gebruik is. Een voordeel van deze teelt is, net als bij andere vruchtgroenten, dat eventuele lichtonderschepping onderaan de stengel geen nadelige rol speelt. In deze teelten moet dan wel de vruchttemperatuur in de gaten gehouden worden.

3.2.4. Paprika

Paprika's worden in Nederland op het moment van schrijven uitsluitend onbelicht geteeld. Voor deze teelt wordt 35 m³/m² gas verstoekt, al is dit in de laatste jaren (enigszins gedwongen door de energiecrisis) verlaagd naar 20-25 m³/m². Dat is met name gedaan door bijvoorbeeld de maximumbuis van 60 naar 45 °C te verlagen. Door hogere luchtvochtigheden waren er relatief veel problemen met schimmels als fusarium.

PCM vindt een tamelijk goede aansluiting omdat er een relatief grote warmtebehoefte is gedurende het hele jaar, de zomer uitgezonderd. Een koelvraag is er minder omdat in lichte omstandigheden nog geteeld wordt in kassen met 29 °C luchttemperatuur. Wel valt er een voordeel te halen door minder te luchten, vocht en CO₂ blijven binnen en er werd opgemerkt dat er ook minder ziekten en plagen naar binnen zullen komen. Hogedrukverneveling wordt op dit moment nog bijna niet gebruikt. Om scherpe instraling tegen te gaan wordt de kas in de zomermaanden gekrijt.

Over het algemeen wordt geteeld met een dagtemperatuur van 21 °C en een nachttemperatuur van 17-19 °C. Deze DIF is gewenst om een goede vruchtzetting te realiseren. Volgens teeltveraring neemt bij warmere nachten het vruchtgewicht tot wel 20-30% af en wordt de plantbalans verstoord. Net als bij tomaat en komkommer is er een potentie in het verlagen van het energieverbruik. Het zou het krijten in de zomer deels kunnen vervangen, en bij een focus op extra verwarming en koeling bij de gevels, is de verwachting dat het kasklimaat homogener wordt.

3.2.5. Chrysant & Lisianthus

Chrysanten worden over het algemeen geteeld in de grond en belicht met in toenemende mate LED-belichting. De meeste kassen zijn uitgerust met een verduisteringsscherm en energiescherm, daarbij hebben sommigen een zomerscherm of extra energiescherm. Chrysanten kunnen veel licht hebben, maar het grootste deel van de ongeveer tien weken durende teeltcyclus worden ze geteeld onder korte-dag omstandigheden. Er wordt geteeld met een lage DIF, met een stooktemperatuur van 18-19 °C overdag met een verhoging op licht, en 18-19 °C in de nacht. Daarmee is de koelvraag overdag niet groot, maar de warmtevraag in de nacht is wel interessant om in te vullen met PCM. Gezien de lage DIF, en weinig risico op het gewas bij het integreren van PCM, lijkt het een goede aansluiting. Ook minder ventileren en een hogere CO₂ efficiëntie is interessant. De integratie is wel lastiger. Omdat het in de grond geteeld wordt is er geen ruimte onder het gewas om PCM te integreren op laag niveau. Hierdoor is er een minder grote installatie mogelijk. Dezelfde uitdaging doet zich voor in de lisianthusteelt, waar doorgaans met (veel) hogere temperaturen en lichtintensiteiten wordt geteeld, naast dat er ook daglengtes aangehouden worden van 22 uur, wat bijna geen ruimte geeft voor PCM om warmte af te staan. Chrysant kan dus interessant zijn mits goed over de integratie

wordt nagedacht, bij lisianthus zal de PCM-technologie met name klimaatgelijkheid/constantheid en dus efficiëntie van het verwarmingsbeleid realiseren in tegenstelling tot energiereductie.

3.2.6. Orchidee (Phalaenopsis)

Vanwege het energievraagstuk staat de Phalaenopsis-sector onder druk. Het blijft vermoedelijk wel de grootste sector in de potplanten, en vanwege de hoge energievraag wordt al jaren geïnvesteerd in nieuwe technieken en zijn de bedrijven uitermate gespecialiseerd. De energievraag is groter dan van andere teelten, met een gasverbruik van 60-100 m³/m² op jaarbasis. Vrijwel elke teler heeft een WKK en gebruikt het ook om elektriciteit op te wekken, dat wordt gebruikt in belichting of bij gunstige prijzen aan het net wordt verkocht. De daadwerkelijke gasbehoefte voor de teelt is daardoor in werkelijkheid lager, maar nog steeds fors. Dat komt voornamelijk door de temperaturen die worden aangehouden in de teelt. De Phalaenopsisteelt kan in drie periodes worden samengevat, elk met een eigen gewenst klimaatbeleid. De precieze temperatuur en duur van de fases zijn afhankelijk per ras.

| Periode | Duur | Gewenste etmaaltemp. |
|----------------|-------------|-----------------------------|
| Opkweek | 25 weken | 28-28.5 °C |
| Koelfase | 8 weken | 19 °C |
| Bloei | 10 weken | 21 °C |

In de opkweek wordt vlak geteeld op 28 °C. Maximumtemperaturen op de dag mogen oplopen naar 29 °C, in de nacht wordt niet koeler geteeld dan 27 °C. Hier ontleent zich een goede aansluiting met PCM. Er wordt al geteeld met een minimaal verschil tussen dag- en nachttemperatuur, waardoor er geen negatieve effecten zullen ontstaan bij een lagere DIF. Ondanks de relatief hoge temperaturen kan hittestress een probleem vormen, het is een kleine plant met een klein koelvermogen. Met name in de zomer zou PCM de koelvraag gedeeltelijk in kunnen vullen. Zo zijn er veel opties voor installatie, waarin gekozen kan worden te focussen op een verbetering van het klimaat boven of onder het gewas en/of bij de gevel. Bij de laatstgenoemde focus zou het de uniformiteit verbeteren door extreme temperatuurverschillen te dempen. Voor optimale plantkwaliteit moet rekening gehouden worden geen licht boven het gewas te onderscheppen. Als alternatief, kan eventueel lichtverlies gecompenseerd worden met een hogere belichtingsintensiteit, waarbij nog wel gebruik gemaakt kan worden van de warmteafgifte van PCM. Als de focus ligt op het koelen en verwarmen van het gebied onder het gewas, moet er gemonitord worden hoe het klimaat rond de planten beïnvloed wordt. Met name het drogen van de potten.

3.2.7. Anthurium

De anthuriumteelt kan in tweeën worden gesplitst; de teelt van snijanthurium en potanthurium. De snijanthurium is een meerjarige teelt waar gewoonlijk 7 jaar van een gewas gesneden wordt. De potanthurium wordt over een periode van 35 weken geteeld. Beide teelten zijn jaarrond, enkele telers belichten hun gewas maar dat gebeurt niet standaard. Naar schatting belicht 10-20% van de telers. Zowel de snij- als potanthurium heeft een minder grote lichtbehoefte dan bijvoorbeeld vruchtgroenten. Van de periode maart tot november wordt licht ook weggeschermd en vanaf eind april krijgen de meeste telers hun kas. Mede dankzij het vele schermen wordt veel temperatuur vastgehouden, en in de zomer is daarbij ook te spreken van een warmteoverschot. Vanaf pakweg augustus is in de nacht warmtevraag.

De gewenste etmaaltemperatuur ligt rond de 20 °C; 19 °C in de winter en 23 °C in de zomer. Er wordt gewerkt met een lage DIF (ongeveer 2 °C), omdat een grotere DIF voor meer strekking zorgt en een compact gewas gewenst is. De afgelopen jaren wordt ook onderzocht (en geëxperimenteerd) met een lagere temperatuur vanwege de hogere energieprijzen. Ondanks het intensieve schermen wordt er nog niet standaard gewerkt met luchtbehandeling om de kas te koelen. Ontvochtiging met bijvoorbeeld DryGairs wordt wel al toegepast. Qua klimaatprofiel past PCM goed bij de teelt van anthurium, in het geval van lichtonderschepping is dat gedurende een groot deel van

het jaar geen probleem, en een lagere DIF met koeling overdag en verwarming 's avonds sluit goed aan.

3.3. Effect van PCM-technologie

PCM-technologie in de kas heeft de hoogste potentie in vruchtgroenten en sierteelten met een relatief lage lichtbehoefte. Er blijkt een minimale energiereductie van 10-15%, zonder aanpassing van klimaatinstellingen.

Uit metingen en kassimulaties is gebleken dat in de lente en herfst een grote winst te behalen is. Naarmate de natuurlijke bron van energie, de zon, de kas langer verwarmt stijgt de prestatie van PCM-technologie aanzienlijk. Daarbij heeft de techniek altijd een positief effect op de energiereductie – ook in de winter – waardoor het mogelijk is dat de aanwezige warmte langer in de kas gehouden kan worden en zo wordt voorkomen dat deze via raamventilatie verloren gaat.

In de wintermaanden is een hogere energie-efficiëntie te realiseren door het teeltsysteem te optimaliseren voor de PCM-toepassing. Hierdoor wordt het verwarmingssysteem over het algemeen efficiënter, dus ook in de overige maanden en is een aanvullende 10-15% energiebesparing te realiseren door simpelweg constanter te stoken. Deze optimalisatie dient eerst als kastest in detail onderzocht te worden.

Naast de reductie voor de verwarmingsvraag biedt de PCM-technologie ook de mogelijkheid tot koeling. De koelcapaciteit van PCM-technologie biedt met name kansen voor de sierteelt. Voor glasgroenten is het dankzij de extra koelcapaciteit mogelijk om raamventilatie te beperken en CO₂ langer in de kas te houden, mits de relatieve luchtvochtigheid binnen de gewenste grens blijft.

Voor- en nadelen van PCM-technologie

- Setpoints van klimaatsystemen zijn van belang om optimaal functioneren van PCM-technologie te garanderen.
- Koeling biedt kans om CO₂-verliezen te reduceren door minder raamventilatie.
- In de zomermaanden mei tot september biedt PCM-technologie de kans om door middel van koeling hittestress te voorkomen.
- In de herfst is er kans op hogere RV en dus een hoger risico op condens en verminderde verdamping (waardoor de ramen vaker worden geopend).
- Voor de teelt zijn de maanden tussen november tot februari kritisch in hoeveelheid energiegebruik. Door minder restwarmte in de kas is de prestatie minder hoog dan in de lente en herfst, maar ook in deze maanden is er positief effect op de energiereductie.
- Sierteelt heeft over het algemeen een vlak klimaat, waardoor PCM-technologie makkelijker geïntegreerd kan worden.
- Sommige telers gaven aan dat een specifiek temperatuurprofiel gewenst is, met name om te sturen in plantbalans en grofheid van vruchten in de vruchtgroenteteelt. PCM-technologie zal de verandering in temperatuur vertragen, wat de kasintegratie complexer maakt. Dieper wegzakken in de nacht biedt wel kansen voor hogere energiereductie – mits de setpoints goed zijn ingesteld.

In het kort, de PCM-technologie biedt potentieel een grote energiereductie voor zowel verwarming en koeling. Een makkelijkere kasintegratie is te realiseren bij sierteelt en een hogere energiereductie bij glasgroenten. Met het beschikbare warmteoverschot van zowel vruchtgroenten en sierteelten is een reductie van potentieel 10-30% te realiseren door PCM-technologie.

3.4. Risicoanalyse PCM-technologie in kasomgeving

| KANSEN | BEDREIGINGEN |
|--|--|
| Door de geleverde koelcapaciteit is het mogelijk de kas langer gesloten te houden om zo CO ₂ -ventilatieverliezen te reduceren. | Nieuw systeem vereist opnieuw instellen van setpoints van huidige klimaatsysteem om de PCM-technologie optimaal te doen functioneren |

| | |
|---|---|
| Grote impact bij extreme klimaten, waardoor extreme schommelingen opgevangen kunnen worden en een stabiel klimaat realiseren. | Demping op het temperatuurprofiel, met als ongewenst effect een vertraging van opwarming of koeling. |
| Voorkomen van hittestress in de zomer door hoge koelcapaciteit. | Condensatie direct op het omhulsel. |
| Grote beschikbaarheid van warmteoverschot van maart tot oktober biedt veel mogelijkheden voor PCM-technologie | Stabiliteit is sterk afhankelijk van het type PCM (organisch of anorganisch) en het ontwerp van het omhulsel. |
| Minder hoge ziekten- en plagendruk door minder invlieging bij beperkte ventilatie | Lagere prestatie in van november tot februari door gebrek aan warmteoverschot in de kas. |
| STERKTE | ZWAKTE |
| Potentiële energiereductie te realiseren van 10-30% voor het reduceren van de warmtevraag | Brandbaarheid (organisch PCM) of corrosief effect (anorganisch PCM) |
| Potentiële koelcapaciteit van een aantal °C te realiseren, afhankelijk per gewas en seizoen. | Prestatie is sterk afhankelijk van de het type installatie en de kasintegratie. |
| Veel toepassingsmogelijkheden zowel direct in de kas als in combinatie met bestaande kasinstallaties. | Voor toepassing als seizoensbuffer impact op jaarbasis niet significant door kleine opslagcapaciteit |
| Met name geschikt als etmaalbuffer. Hierdoor met klein volume veel cycli te doorlopen voor een hoge prestatie als warmteopslag. | Bij langere sluiting van ramen kans op te hoge luchtvochtigheid, afhankelijk van gewas, seizoen en de weersomstandigheden |
| Lange levensduur onder goede omstandigheden. | PCM niet aanpasbaar na installatie |
| Constant temperatuurprofiel door extreme schommelingen op te vangen. | |

3.5. Bepaling potentie & doelgroepen

PCM sluit aan bij teelten met een lage DIF en/of een relatief hoge nachttemperatuur. In de teelt van vruchtgroenten, snijbloemen en potplanten vindt PCM daardoor de beste aansluiting. In teelten met een hoge DIF en/of lage nachttemperatuur, zoals aardbei, is ongeschikt (**Error! Reference source not found.**).

Wat betreft de keuze van focus van verwarmen en koelen, is met name de focus op het klimaat aan de gevels voor vrijwel elk gewas interessant, zelfs aardbei. Daar zijn standaard namelijk de extreemste klimaatomstandigheden; daar is het afhankelijk van de buitenomstandigheden het warmst of het koudst met scherpe instraling. In de praktijk wordt daarom vaak gewerkt met dubbel glas, of andere vormen van isolatie. Als bijkomend voordeel met deze focus, kan het PCM de kans op koudeschade en hittestress op deze plekken reduceren.

Tabel 1. Waardematrix PCM in glastuinbouw

| | VERWARMING (warmtevraag) | KOELING (koelvraag) | CO2 (ventilatie) | RV (ventilatie) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <i>Tomaat (belicht)</i> | + | + | + | +/- |
| <i>Tomaat (onbelicht)</i> | + | + | + | +/- |
| <i>Paprika</i> | + | + | + | +/- |
| <i>Komkommer</i> | + | + | + | +/- |
| <i>Anthurium</i> | + | + | + | + |
| <i>Chrysant</i> | + | + | + | +/- |
| <i>Aardbei</i> | - | + | + | + |
| <i>Phalaenopsis (opkweekfase)</i> | + | +/- | +/- | +/- |
| <i>Phalaenopsis (koelfase)</i> | +/- | + | +/- | +/- |
| <i>Phalaenopsis (bloEIFase)</i> | + | +/- | +/- | +/- |

LEGENDA

| | |
|----------------|-------|
| Ongeschikt | - |
| Geringe waarde | + / - |
| Waarde | + |

3.6. Businesscase PCM-technologie

Vanuit de markt is er behoefte naar een betaalbaar (duurzaam) alternatief om de totaal energievraag te voorzien. Dit betekent dat naast de fit met het gewastype ook de business case en terugverdientijd een rol spelen in het besluit of PCM-technologie past bij de teelt.

De businesscase van PCM-technologie wordt per teler bepaald op basis van de waarde van het reduceren van de warmtevraag (aardgas) en koelvraag (elektriciteit), welke beiden gekoppeld zijn aan een energieprijs. In Tabel 2 is het bereik aangegeven voor de potentiële reductie. De waarde voor actief koelen versterkt de business case aanzienlijk. Met als resultaat dat voor teelten waar dit een grote meerwaarde kan bieden voor een gunstige businesscase in combinatie met de reductie voor verwarming. Voor de berekening van de business case zijn voor zowel verwarming als koeling twee varianten voor energiereductie geselecteerd om de potentiële jaarlijkse energiekostenbesparing te weergeven.

Tabel 2. Jaarlijkse waarde per m² per energieprijzen scenario

| | VERWARMING (aardgas) [€ / m ² kas / jaar] | | KOELING (kWh elektriciteit) [€ / m ² kas / jaar] | | COP = 3 |
|--|--|--|---|---|-------------------------------------|
| | 3 m ³ / m ² kas / jaar | 9 m ³ / m ² kas / jaar | 5 kWhe / m ² kas / jaar | 15 kWhe / m ² kas / jaar | |
| Potentiële waarde verwarming | | | | | Potentiële waarde verwarming |
| 30 ct per bespaarde m³ | €0,90 | €2,70 | €0,40 | €1,20 | 8 ct per bespaarde kWhe |
| 40 ct per bespaarde m³ | €1,20 | €3,60 | €0,50 | €1,50 | 10 ct per bespaarde kWhe |
| 60 ct per bespaarde m³ | €1,80 | €5,40 | €0,70 | €2,10 | 14 ct per bespaarde kWhe |
| | Gecombineerde waarde: tot €7,50 (max) / m ² kas / jaar | | | | |

4. Conclusie

PCM heeft een grote potentiële bijdrage aan energiebesparing in de glastuinbouw. Doordat het warmteoverschot overdag en de warmtevraag in de nacht worden beperkt zijn met name warme kasteelten met een lage DIF interessant. De bijpassende teelten zijn vruchtgroenten (tomaat, paprika, komkommer, aubergine) en warme sierteelt (chrysant, anthurium, phalaenopsis). Focuspunt van koeling en verwarming rond de gevels is voor vrijwel elk gewas interessant, zelfs aardbei. Aan de randen van de kas zijn standaard namelijk de extreemste klimaatomstandigheden, waardoor als bijkomend voordeel hittestress en koudeschade kan worden voorkomen. PCM heeft als voordeel dat het ook warmte opslaat en afgeeft 's nachts. Voor een hogere energiebesparing van PCM is een aanzienlijke installatie nodig voor een hoge energiereductie. Voor de meeste teelten met hoge lichtbehoefte dient de installatie hierop afgestemd te worden, zodat de plant optimaal kan groeien zonder ongewenst lichtverlies.

Voornamelijk bij chrysant en lisianthus vermoedelijk dit de opties. Het gewas is laag, staat in de grond, en heeft een hoge lichtbehoefte. Het vergroten van de installatie gaat (te) snel ten koste van het licht. Bij vruchtgroenten zijn er veel opties om het PCM te integreren omdat de bladeren aan het onderste deel van de plantstengel nauwelijks of geen licht krijgen voor de fotosynthese. Dat maakt dat hoewel de DIF groter is dan bij bijvoorbeeld chrysant, toch met een grotere installatie een

relatief hogere besparing te realiseren is. Er dient dan wel onderzocht te worden wat het effect van de installatie is op de temperatuur en uitgroei van vruchten, de assimilatenverdeling en nutriëntenopname.

Een andere hoge potentie is te halen in phalaenopsis of anthurium. Daar wordt ook geteeld met een relatief lage DIF, hoge nachttemperatuur, en door een relatief lage lichtbehoefte zijn er ook meerdere manieren om PCM te integreren.

Na deze kwalitatieve analyse dient het gebruik en de besparing van PCM nog wel geverifieerd te worden in een kasttest, en wordt aanbevolen de invloed van PCM op het kasklimaat te monitoren en vergelijken met een conventionele teelt zonder PCM. Als pilotgewas is komkommer interessant vanwege de potentie en relatief snelle teeltduur, waarbij het effect ook in meerdere seizoenen onderzocht kan worden. Daarnaast is anthurium een interessante teelt met een korte teeltduur (vergeleken met de phalaenopsis).

PCM biedt veel potentie voor de glastuinbouw in het voorjaar, de zomer, en de herfst. Waar in het voor- en najaar vaak een warmtevraag is, is er in de zomer een koelvraag waarbij PCM kan zorgen voor een betere CO₂-benutting. Ook in belichte teelten heeft het potentie, daar is ook vaker op etmaalbasis een warmteoverschot (in de belichte nacht en overdag bij veel intensief schermen) vergeleken met een onbelichte teelt. Het is een interessant systeem dat ervoor zorgt dat er minder energie nodig is, waarbij de teler minder last heeft van prijsschommelingen van gas en elektriciteit.