



ISBN = 594169

Ontwerp van klimaat- beheersingsapparatuur voor gesloten kassysteem

Rapportage van de eerste fase van het
onderzoek

*Design of an air conditioner for conditioning
closed greenhouses*

Dr. Ir. T. de Jong (projectleider, auteur)

Ir. N.J. van de Braak

Ing. J.J.G. Breuer

Ing. P. Knies

Ir. H.J.M. Vollebregt

imag-dlo



CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

De Jong, T.

Ontwerp van klimaatbeheersingsapparatuur voor gesloten kassysteem (rapportage van de eerste fase van het onderzoek) / T de Jong . . [et al.]. – Wageningen : IMAG-DLO. – III. (Rapport / Dienst Landbouwkundig Onderzoek, Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen ; 93-20)

Met lit. opg. – Met samenvatting in het Engels.

ISBN 90-5406-069-7 geb.

NUGI 849

Trefw.: klimaatregeling ; kassen.

© 1993

IMAG-DLO

Postbus 43 – 6700 AA Wageningen

Telefoon 08370-76300

Telefax 08370-25670

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

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Abstract

Closed greenhouse production systems with less or no ventilation will reduce the emissions which are hazardous to the environment. A closed greenhouse will have benefits additional to a reduction of pollutants which could lead to a higher production. However, when the air exchange is strongly reduced, air conditioning becomes necessary.

In the present report, the most important results of the research project 'Ontwerp van klimaatbeheersingsapparatuur voor gesloten kassystemen' ('Design of an air conditioner for conditioning closed greenhouses') are discussed. The project research aimed at developing and testing an air conditioner for closed greenhouses. In addition, the feasibility of a fully closed greenhouse is studied. The report gives reference to the main work performed in the framework of the above-mentioned project. Future fields of research are discussed.

Voorwoord

In de sector glastuinbouw wordt gezocht naar produktiemethoden en technologie die het milieu minder vervuilen. In een gesloten produktiesysteem kan, door de sterke beperking van de ventilatie, de emissie van schadelijke stoffen naar het milieu verminderen. Bovendien zijn er een aantal voordelen verbonden aan de teelt in gesloten kassen, zoals de mogelijkheid om een hoog CO₂- en lichtniveau in de kas te realiseren, die kunnen leiden tot een hogere produktie.

Omdat de ventilatie in een gesloten kas vrijwel wegvalt, is luchtbehandeling van de kaslucht noodzakelijk. Om tot een verbetering van de energie-efficiency (eenheid energie per eenheid produkt) te komen, mag het energieverbruik voor de luchtbehandeling niet te hoog zijn. De haalbaarheid van een gesloten kassysteem zal onder andere afhangen van de beschikbaarheid van economisch werkende luchtbehandelingsapparatuur.

Dit rapport geeft een overzicht van de stand van het onderzoek na de eerste fase van het project 'Ontwerp van klimaatbeheersingsapparatuur voor gesloten kassystemen', dat zich richtte op de ontwikkeling en toetsing van geschikte luchtbehandelingsapparatuur voor gesloten kassen. De haalbaarheid van een bovengronds volledig gesloten kassysteem is betrokken in het onderzoek.

Een verwijzing naar de publikaties over belangrijke deelaspecten van het project is opgenomen.

De eerste fase van het project is medegefinancierd door de Nederlandse maatschappij voor energie en milieu bv. (Novem) en het fonds 'Gesloten bedrijfssystemen' van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij (LNV).

Ir. A.A. Jongebreur
directeur

Inhoud

Samenvatting	6
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond van het project	7
1.2 Werkzaamheden	8
1.3 Rapportage	8
2 Ontwerpcriteria	10
2.1 Inleiding	10
2.2 Ventilatie in kassen	10
2.3 Ontwerpcriteria	11
3 Principe-ontwerp en simulatiemodel van de indirecte verdampingskoeler	13
3.1 Inleiding	13
3.2 Conclusies	14
4 Experimenten	15
4.1 De experimentele opstelling	15
4.2 De indirecte verdampingskoeler (IVK)	15
4.3 Resultaten	16
5 Kasklimaatssimulaties	18
5.1 Inleiding	18
5.2 Resultaten kasklimaatssimulaties	18
5.3 Gebruik van grondbuizen	20
5.4 Discussie	21
5.5 Conclusies	21
6 Kostenaspecten en perspectief van de gesloten kas	23
6.1 Kostenaspecten	23
6.2 Perspectief	24
6.2.1 Korte termijn	24
6.2.2 Lange termijn	25
7 Conclusies	28
Summary	29

Samenvatting

In een gesloten kassysteem is, door beperking van de ventilatie in de kas, een reductie van de emissie van schadelijke stoffen naar de omgeving mogelijk. Daarnaast heeft een gesloten kas voordelen, zoals de mogelijkheid om een hoog CO₂- en lichtniveau in de kas te realiseren, die kunnen leiden tot een hogere produktie. In een gesloten kas is luchtbehandeling echter noodzakelijk.

In dit rapport worden de belangrijkste bevindingen van het project 'Ontwerp van klimaat-beheersingsapparatuur voor gesloten kassystemen' weergegeven. Het project richtte zich op de ontwikkeling en toetsing van geschikte luchtbehandelingsapparatuur voor gesloten kassen. Verwijzingen naar publikaties over belangrijke deelaspecten van het project zijn opgenomen.

De ontwerpcriteria voor de klimaatbeheersingsapparatuur zijn zo geformuleerd dat de apparatuur ongeveer 200 W/m² voelbare en 400 W/m² latente warmte uit de kas zal moeten kunnen afvoeren bij buitenluchtcondities van 28 °C en 60% relatieve vochtigheid (RV) en kasluchtcondities van 30 °C en 90% RV.

Als koelprincipe is de indirecte verdampingskoeling (IVK) gekozen, omdat het een relatief goedkope manier van koelen is met een relatief hoog rendement. De kaslucht en buitenlucht kunnen bovendien volledig gescheiden blijven.

Uit de metingen aan een prototype koeler blijkt dat er in principe voldoende warmte afgevoerd kan worden onder ontwerpcondities. Bij hoge debieten door de koeler wordt de hoeveelheid afgevoerde warmte relatief kleiner ten opzichte van de hoeveelheid voelbare warmte.

Uit simulaties blijkt dat het kasklimaat bij toepassing van IVK vochtiger wordt. De temperatuur lijkt beter in de hand te houden. De resultaten zijn afhankelijk van de prestatie van de koeler. Wanneer grondbuizen worden gebruikt, kan met een kleinere koeler worden volstaan.

De vaste kosten voor een IVK-installatie (in een uitvoering van een platenwarmtewisselaar) worden op f 10,- per m² kas per jaar geschat. De variabele kosten (bij een temperatuur- en vochtregeling) zijn ongeveer f 15,- per m² per jaar. De kosten zijn afhankelijk van de uitvoering van het koelprincipe.

Het onderzoek kent als voornaamste conclusie dat het gekozen koelprincipe (de indirecte verdampingskoeling) technisch gezien kan dienen voor het klimatiseren van gesloten kassen. Bij de huidige stand van de techniek zijn er echter te veel economische obstakels om tot een volledig gesloten kassysteem over te gaan.

De beschikbaarheid van geschikte klimatiseringsapparatuur maakt een optimale toepassing van goed isolerende kasdekmaterialen mogelijk. Potentieel zijn er bij toepassing van beter isolerende dekmaterialen grote energiebesparingen mogelijk. Bovendien kan door de beschikbaarheid van de klimatiseringsapparatuur de ventilatie sterk beperkt worden; de kas kan in een meer gesloten vorm worden uitgevoerd.

De combinatie van beter isolerende kasdekken (met een hoge lichttransmissie) en geschikte klimatiseringsapparatuur maakt de ontwikkeling van energiezuinige kassystemen mogelijk.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond van het project

De agrarische sector streeft er naar in de bedrijfsvoering, en dus ook in de keuze van het gebouwstelsel, de emissie van milieubelastende stoffen naar bodem, water en lucht zo klein mogelijk te houden. Deze ontwikkeling zal in de toekomst nog belangrijker worden door de steeds stringenter milieuwetgeving.

In de tuinbouwsector wordt in dit kader onder andere onderzoek verricht naar de ontwikkeling van een bedrijfssysteem met een gereduceerde emissie naar het milieu van stoffen, zoals gewas-beschermingsmiddelen, nutriënten en CO₂. Om dit te bereiken zal het beoogde produktiesysteem zowel boven- als ondergronds zoveel mogelijk gesloten moeten worden uitgevoerd, dat wil zeggen dat er geen directe uitwisseling met de omgeving plaatsvindt.

Een gesloten kasconstructie kan de emissie van schadelijke stoffen, zoals bestrijdingsmiddelen, vanuit het bovengrondse deel van het kassysteem naar de omgeving voorkomen. Naast de emissiebeperking zijn er nog een aantal andere voordelen te verwachten van een gesloten uitvoering van de kas, zoals de mogelijkheid om een hoog CO₂-gehalte in de kas te handhaven en de verbetering van de biologische bestrijding. Het verdwijnen van de luchtramen biedt bovendien de mogelijkheid om de kasconstructie te vereenvoudigen en andere kasomhullings-materialen toe te passen, die een hoge lichttransmissie (onder andere door minder constructieve delen) paren aan een betere thermische isolatie. Kortom, een verschuiving naar een meer gesloten kassysteem biedt kansen op het gebied van de produktie en de reductie van de milieubelasting en het energieverbruik.

Tegenover deze voordelen staat dat de natuurlijke ventilatie als stuurmechanisme van het binnenklimaat wegvalt. De koeling en/of ontvochtiging van de lucht zal door middel van een luchtbehandelingsinstallatie gerealiseerd moeten worden. De energie die hiervoor nodig is, mag een verbetering van de energie-efficiency niet in de weg staan. De haalbaarheid en het succes van gesloten (of beter geïsoleerde) kassystemen zal derhalve afhangen van de ontwikkeling van economisch werkende luchtbehandelingsapparatuur.

Tegen deze achtergrond heeft IMAG-DLO in het eerste kwartaal van 1991 een project gestart (medegefinancierd door de Nederlandse maatschappij voor energie en milieu bv. (Novem) en het fonds 'Gesloten bedrijfssystemen' van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij (LNV)) met als doel geschikte luchtbehandelingsapparatuur voor gesloten kassen te ontwikkelen en deze te toetsen op laboratoriumschaal en in een kleinschalige praktijksituatie. Daarnaast is de haalbaarheid van een volledig gesloten kas, bij de huidige stand van het onderzoek, aan de orde gekomen.

1.2 Werkzaamheden

De werkzaamheden van het project vallen uiteen in twee fasen. Aan het eind van de eerste fase (laatste kwartaal 1992) is er een beslispoint over de voortzetting van het project.

Werkzaamheden eerste fase:

1. bepaling van de ontwerpcriteria voor de luchtbehandelingsapparatuur in gesloten kassen;
2. principe-ontwerp en simulatieberekeningen van de te ontwikkelen luchtbehandelingsapparatuur;
3. bouw prototype luchtbehandelingsapparaat (indirecte verdampingskoeler);
4. metingen aan luchtbehandelingsapparaat op laboratoriumschaal;
5. bestuderen van de effecten van verkoeling met grondbuizen en de benutting van de warmtecapaciteit van de bodem op de benodigde koelcapaciteit;
6. met behulp van het simulatiemodel (DESSIM90) onderzoeken hoe het kasklimaat beïnvloed wordt door de ontwikkelde luchtbehandelingsapparatuur.

Geplande werkzaamheden tweede fase na 1992:

1. ontwerp van klimaatinstallatie op basis van de verkregen resultaten uit fase 1;
2. inbouw van prototype van klimaatinstallatie in kleinschalige gesloten kas;
3. bepaling van karakteristieken onder praktijkomstandigheden;
4. bepaling van de werking m.b.v. modelsimulatie onder variërende en extreme omstandigheden.

1.3 Rapportage

Het huidige rapport behelst het overzicht van de eerste fase van het onderzoekproject. De hoofdstukindeling van het rapport is als volgt (met tussen haakjes de nummering van de activiteiten van de eerste fase, zoals die hierboven zijn genoemd):

Hoofdstuk 1 Inleiding

2 Ontwerpcriteria (1)

3 Principe-ontwerp en simulatiemodel van de indirecte verdampingskoeler (2)

4 Experimenten (3, 4)

5 Kasklimaat simulaties (5, 6)

6 Kostenaspecten en perspectief van de gesloten kas

7 Conclusies

De hoofdstukindeling van dit rapport valt geheel of gedeeltelijk samen met publikaties die tijdens de eerste fase van het project gerealiseerd zijn. Dit wordt per hoofdstuk duidelijk aangegeven. Dit rapport draagt het karakter van een 'covernotitie'. Voor zover de publikaties verschenen zijn, worden in dit rapport alleen de kaders en de belangrijkste conclusies op een rij gezet. Daarnaast worden noodzakelijk geachte aanvullingen gegeven.

Dit rapport kan, samen met de (verschenen of nog te verschijnen) publikaties, beschouwd worden als de eindrapportage van de eerste fase van het project 'Ontwerp van klimaat-beheersings-apparatuur voor gesloten kassystemen'.

zie ook:

P. Knies,

'Toekomstige kas: meer deklagen, geen luchtramen' Vakblad voor de bloemisterij 1
(1992), p. 44-45

2 Ontwerpcriteria

2.1 Inleiding

Kennis van de ventilatie en de daarbij behorende energiebehoefte van kassen is nodig voor de ontwikkeling en dimensionering van klimaatbeheerssystemen. Daarom is als onderdeel van de werkzaamheden binnen dit project met behulp van modelstudies nagegaan hoeveel ventilatie in kassen wordt vereist. Daarbij is gelet op de invloed van de methode van klimaatregeling, van het gebruik van mechanische ventilatie of luchtingsramen en van het gebruik van een minimumbuis temperatuur. Daarnaast is een analyse gemaakt van de consequenties van de verschillende invloedsfactoren voor het energieverbruik ten behoeve van verwarming.

Naast de ventilatiebehoefte per jaar is het voor het ontwerp van de klimatiseringsinstallatie van belang de maximale koellast van de installatie en de ongunstigste (lucht)condities, waaronder de installatie moet functioneren, te kennen. Deze randvoorwaarden worden de ontwerpcriteria genoemd.

2.2 Ventilatie in kassen

In het IMAG-DLO rapport 91-14 '*Ventilatie in kassen*' wordt een korte beschrijving gegeven van het computermodel (DESSIM90), waarmee de simulatieberekeningen zijn uitgevoerd. Vervolgens worden de resultaten van de verschillende berekeningen gepresenteerd en de onderlinge verschillen besproken. Hierbij wordt tevens een vergelijking met metingen uit de praktijk betrokken. Tenslotte worden enkele conclusies getrokken met betrekking tot de kasventilatie en gerelateerde warmtebehoefte.

De belangrijkste conclusies in het kader van het ontwerp van klimaatinstallaties voor gesloten kassen, die genoemd worden in het IMAG-DLO rapport 91-14, zijn:

1. indien de prestatie van een luchtbehandelingsinstallatie gedurende een beperkt aantal uren mag leiden tot een geringe overschrijding van de maximale kasluchttemperaturen die in de praktijk optreden, dan is een koelend effect dat equivalent is met dat van ventilatie met buitenlucht met een maximumdebiet van ongeveer $120 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ voldoende;
2. indien louter op maximale temperatuur geventileerd en/of gekoeld zou worden, is het aantal draai-uren van de installatie ongeveer 1900 uur per jaar. Bij toepassing van de standaard minimumbuis temperatuur loopt dat op tot ongeveer 3100 uur per jaar en indien verlaging van de RV in de kas noodzakelijk wordt geacht, kan dit oplopen tot ongeveer 5500 à 6000 uur per jaar;
3. de energiebehoefte neemt bij regeling op relatieve vochtigheid ten opzichte van een temperatuurregeling zeer sterk toe. Indien lage relatieve vochtigheden noodzakelijk zijn, kan een alternatieve ontvochtigingsmethode een besparing op de warmtebehoefte opleveren van ongeveer 50% per jaar.

Bovenstaande conclusies laten zien hoe groot de invloed is van minimumbuis (bij temperatuurregeling) en de relatieve vochtigheidsregeling op de ventilatiebehoefte (ventilatie-

uren en ventilatiedebiet) van de kas.

De grote besparing op de warmtebehoefte door een alternatieve wijze van ontvochtigen geeft aan dat er (in energietermen gesproken) een behoorlijke ruimte is om die ontvochtiging te realiseren. Deze ruimte wordt groter indien kasdekken ontwikkeld en toegepast worden met een betere isolatie en hogere lichttransmissie. Dit kan uiteindelijk leiden tot een energiezuiniger produktiesysteem met een hogere opbrengst per oppervlakte-eenheid.

2.3 Ontwerpcriteria

De afmetingen van de koelinstallatie worden bepaald door de maximale koellast in combinatie met de ongunstigste omstandigheden voor de koeling (de ontwerpcondities van de kas- en buitenlucht).

De maximale koellast van de kas wordt bepaald door de maximale globale straling buiten (I). De maximale zonnestraling bedraagt ongeveer 880 W/m^2 in de zomer. Als rekening gehouden wordt met de transmissie door het dek ($\tau \approx 0,75$) en de reflectie van de ingestraalde lichthoeveelheid, zal de maximale koellast ongeveer 600 W/m^2 kasoppervlak bedragen.

De totale hoeveelheid ingestraalde energie in de kas wordt omgezet in een voelbare en (door verdamping) in een latente component. De verhouding van deze twee componenten varieert onder andere onder invloed van de relatieve vochtigheid in de kas. Als vuistregel wordt aangehouden dat $1/3$ van het totaal in voelbare warmte (200 W/m^2) en $2/3$ in latente warmte (400 W/m^2) wordt omgezet. In de koelinstallatie zal de warmte in deze verhouding afgevoerd moeten worden.

De verhouding tussen latente en voelbare warmte kan afwijken van de gebruikte vuistregel. Daarnaast kan de koellast zelf veranderen door veranderingen in het kasdek materiaal (transmissie) en de reflectie van de ingestraalde lichthoeveelheid. De maximale koellast, zoals hierboven aangegeven, is derhalve arbitrair, maar wordt voorlopig als uitgangspunt gehanteerd.

In het volgende hoofdstuk zal het ontwerp van de te ontwikkelen luchtbehandelingsinstallatie ter sprake komen. Het ontwerp is gebaseerd op indirecte verdampingskoeling. De prestatie van de indirecte verdampingskoeler is erg afhankelijk van de condities van de buitenlucht en de kaslucht.

De indirecte verdampingskoeler zal de bovengenoemde 600 W/m^2 moeten kunnen koelen bij de ongunstigste buitenluchtcondities die in de zomer in Nederland kunnen voorkomen (de ontwerpcondities van de buitenlucht). Deze zijn bepaald op een conditie, (psychometrisch) gelijk aan die van een combinatie van de droge- en natteboltemperatuur, van respectievelijk 28°C en 22°C (60% relatieve vochtigheid). Gemiddeld zal slechts enkele uren per jaar de buitenlucht-conditie voor de koeling nog slechter zijn.

Als grenswaarden voor de temperatuur en relatieve vochtigheid (RV) die in de kas mogen optreden, zijn respectievelijk 30°C en 90% RV gekozen (de ontwerpcondities

van de kaslucht).

zie ook:

N.J. van de Braak en J.J.G. Breuer,
'*Ventilatie in kassen*' IMAG-DLO rapport 91-14.

3 Principe-ontwerp en simulatiemodel van de indirecte verdampingskoeler

3.1 Inleiding

Ventilatie beoogt in de meeste gevallen de koeling en/of ontvochtiging van de kaslucht. Het te ontwerpen luchtbehandelingsapparaat voor een kas met volledige recirculatie zal gericht moeten zijn op dezelfde effecten op het binnenklimaat. Als koel- en ontvochtigingstechniek voor de gesloten kas is de indirecte verdampingskoeling gekozen. In het ontwerp is sprake van een platen-warmtewisselaar, waarbij de verdamping plaatsvindt aan het plaatoppervlak. In de publikaties die aan het eind van dit hoofdstuk worden genoemd wordt uitgebreid het principe van de indirecte verdampingskoeling en de uitvoering van de indirecte verdampingskoeler beschreven. De volgende overwegingen liggen aan de keuze van deze koeltechniek en de uitvoeringsvorm van de koeler ten grondslag:

1. de verdampingskoeling is in het algemeen goedkoper (investering, onderhoud en operationeel) dan de mechanische koeling;
2. indirecte verdampingskoeling biedt de mogelijkheid om de kaslucht te koelen zonder dat vocht in de kas wordt gebracht. Dit is van belang omdat de kaslucht ontvochtigd dient te worden;
3. bij indirecte verdampingskoeling kunnen de kasluchtstroom en buitenluchtstroom volledig gescheiden worden gehouden. Dit geeft mogelijkheden voor een recirculatiesysteem voor de kaslucht (een volledig gesloten systeem);
4. de bevochtiging van de buitenlucht vindt plaats aan het plaatoppervlak van de warmtewisselaar. Door de verdamping te laten plaatsvinden op de plaats waar ook de kaslucht gekoeld moet worden (namelijk aan het warmtewisselend oppervlak), kan een rendementswinst geboekt worden ten opzichte van systemen waarbij de warmteoverdracht en de verdamping gescheiden zijn, zoals bij gebruik van een koeltoren;
5. de 'natte' warmtewisselaar heeft (naar verwachting) een grotere warmte-overdracht dan een conventionele 'droge', omdat het warmtewisselend oppervlak kouder zal zijn.

De te ontwikkelen indirecte verdampingskoeler moet zowel grote hoeveelheden voelbare als latente warmte van de kaslucht afvoeren. Dat laatste moet gebeuren door condensatie van de kaslucht aan de platen van de warmtewisselaar. In de praktijk is daar vrijwel geen ervaring mee opgedaan, voornamelijk omdat de indirecte verdampingskoelers niet in zulke extreem vochtige luchtcondities zijn gebruikt.

Om de prestaties van de indirecte verdampingskoeler onder ontwerpcondities van de kas- en de buitenlucht te voorspellen en de ontwerpactiviteiten te ondersteunen, is een simulatiemodel ontwikkeld van de koeler. De ontwikkeling van het simulatiemodel en de belangrijkste resultaten worden gegeven in de publikaties die aan het eind van het hoofdstuk worden vermeld.

3.2 Conclusies

De uitgevoerde simulaties tonen het volgende aan:

1. het voorgestelde principe van een indirecte verdampingskoeler leidt tot een grotere voelbare warmte-overdracht per warmtewisselend oppervlak, vergeleken met de overdracht van een conventionele platenwarmtewisselaar;
2. het afgevoerde vermogen is sterk afhankelijk van het debiet van de kas- en de buitenlucht door de koeler en de bereikte warmte-overdrachtscoëfficiënten. Beide parameters zijn gekoppeld door een empirische relatie tussen het Nusselt-, Reynolds- en Prandtlgetal. Dit betekent dat de prestatie van de koeler in hoge mate bepaald wordt door de uitvoeringsvorm;
3. de indirecte verdampingskoeler heeft de eigenschap om naast de voelbare warmte ook grote hoeveelheden latente warmte af te voeren, ook bij de ontwerpcondities van de kas- en de buitenlucht.

De resultaten van de simulaties geven vertrouwen in de keuze van het koelprincipe (de indirecte verdampingskoeling). Na de experimentele fase, waarin een prototype van de koeler getest wordt in een laboratoriumopstelling, kan het koelprincipe en het simulatiemodel geëvalueerd worden (hoofdstuk 4).

zie ook:

T. de Jong, N.J. van de Braak en G.P.A. Bot,
'*Alternatieve koeler voor gesloten ruimten*' *Klimaatbeheersing* 21, nr. 5 (mei 1992), p. 123-128.

T. de Jong, N.J. van de Braak en G.P.A. Bot,
'*Indirecte verdampingskoeling; een bruikbare techniek voor tuinbouwkassen ?*' *Koudemagazine* 4, nr. 6 (juni 1992), p. 18-23.

T. de Jong, N.J. van de Braak en G.P.A. Bot,
'*A wet plate heat exchanger for the conditioning of closed greenhouses*' *Journal of Agricultural Engineering Research* (1993) 56, p. 25-37.

4 Experimenten

4.1 De experimentele opstelling

De testopstelling heeft ten doel de werking van het ontwikkelde luchtbehandelingsapparaat (de indirecte verdampingskoeler) te testen bij verschillende condities van de kas- en de buitenlucht, waarbij de debieten van de luchtstromen die door de koeler gevoerd worden, gevarieerd kunnen worden.

In het IMAG-DLO rapport 93-13 *'Experimenteel onderzoek aan indirecte verdampingskoeling'* wordt de testopstelling uitvoerig beschreven.

De opstelling bestaat uit twee luchtbehandelingskasten die elk, door middel van verwarming en bevochtiging, de gewenste condities van de kas- en de buitenlucht realiseren. Deze geconditioneerde lucht wordt door ventilatoren door de indirecte verdampingskoeler gevoerd, met een maximaal debiet per luchtstroom van 4000 m³/h. De lucht kan eventueel teruggevoerd worden naar de luchtbehandelingskasten.

Door het meten van de luchtcondities vóór en na de koeler kan berekend worden hoeveel voelbare en latente warmte aan de kaslucht onttrokken wordt (hoeveel de kaslucht respectievelijk gekoeld en ontvochtigd wordt). Metingen kunnen verricht worden aan verschillende prototypes bij verschillende debieten en condities van de kas- en de buitenlucht.

De hele installatie is zo gedimensioneerd dat de ontwerpcondities van de kas- en de buitenlucht (zie hoofdstuk 2) gerealiseerd kunnen worden bij een debiet van maximaal 2000 m³/h.

Tijdens de metingen worden bepaald:

- condities van de binnen- en de buitenlucht (RV en temperatuur) vóór en na de koeler;
- debieten van de luchtstromen;
- plaattemperatuur van de koeler;
- debiet van het water voor de bevochtiging van de koeler;
- ingangs- en uitgangstemperatuur van het water voor bevochtiging;
- drukval over de koeler, voor zowel de kas- als de buitenluchtstroom.

4.2 De indirecte verdampingskoeler (IVK)

Het ontworpen luchtbehandelingsapparaat is gebaseerd op de indirecte verdampingskoeling. Deze techniek combineert de verdampingskoeling en de warmte-overdracht en wordt zo genoemd omdat de te conditioneren lucht niet in contact komt met het water dat gebruikt wordt voor de koeling door verdamping. De argumenten voor de keuze van het koelprincipe en de uitvoeringsvorm van de koeler zijn gegeven in hoofdstuk 3 en in de daarbij genoemde publikaties.

De warmte-overdracht vindt in het prototype van de koeler plaats via een platenwarmte-

wisselaar, waarvan het oppervlak waarlangs de buitenlucht stroomt, bevochtigd wordt. Om een gelijkmatige bevochtiging van het plaatoppervlak te krijgen, is een waterabsorberende (katoen)laag op dit oppervlak bevestigd.

Door de verdamping van het natte (buiten)oppervlak koelt de plaat en daarmee de kaslucht die langs de andere kant van de plaat stroomt. Als de temperatuur van de kaslucht daalt tot onder het dauwpunt, zal aan de plaat ook condensatie plaatsvinden; de kaslucht wordt ontvochtigd en er wordt latente warmte overgedragen. Een gedetailleerde beschrijving van het prototype van de koeler is te vinden in het IMAG-DLO rapport 93-13.

4.3 Resultaten

Een beschrijving van alle metingen en meetresultaten is te vinden in het IMAG-DLO rapport 93-13. In het artikel *'Evaluation of an air conditioner based on indirect evaporative cooling'* worden enkele simulatieberekeningen met de gemeten prestaties van de koeler vergeleken.

De gemeten warmte-overdracht in de koeler is over het algemeen goed in overeenstemming met de theorie. De gevonden stofoverdracht (voor waterdamp) verschilt wel van de theoretische verwachting. Hiervoor worden mogelijke verklaringen aangedragen in het IMAG-DLO rapport 93-13.

De verhouding tussen de afgevoerde latente en voelbare warmte (gemeten bij de ontwerp-condities van de lucht) bleek te veranderen met het door de koeler gevoerde debiet van de luchtstroom. Bij hoge debieten ($> 0,13 \text{ m}^3/\text{s}$) werd de afgevoerde hoeveelheid latente warmte relatief lager ten opzichte van de afgevoerde hoeveelheid voelbare warmte. Dit zou betekenen dat bij deze hoge debieten de IVK niet voldoende vocht uit de lucht onttrekt, met als gevolg dat de relatieve vochtigheid van de kaslucht stijgt.

De uit de gemeten drukval berekende Fanning friction factor komt overeen met de theorie. Het ventilatievermogen neemt sterk toe met het debiet en bedraagt bij een debiet van $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$ voor een IVK van 2 m^2 plaat per m^2 kas ongeveer 11 W/m^2 kasoppervlak. Het waterverbruik zal in bovengenoemd voorbeeld (bij ontwerpcondities) ongeveer $2 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ bedragen, indien de hoeveelheid spoelwater (o.a. tegen verzilting) gelijk genomen wordt aan de hoeveelheid verdampt water.

Door de diverse aannames moeten deze getallen beschouwd worden als pessimistische schattingen van het maximale energie- en waterverbruik. Het prototype van de koeler is vatbaar voor verbeteringen die kunnen leiden tot een hoger rendement, kleiner volume, minder drukval en lager energieverbruik. Suggesties voor verbeteringen worden gegeven in het IMAG-DLO rapport 93-13.

Als belangrijkste resultaat van de experimenten kan genoemd worden dat de koeler in staat was om onder de ontwerpcondities van de kas- en de buitenlucht zowel latente als voelbare warmte af te voeren. Dit betekent dat door middel van het gekozen koelprincipe de kaslucht geconditioneerd kan worden. Om de effecten van de indirecte verdampingskoeling op het klimaat te bestuderen, is de koeling als module ingebouwd in het kasklimaat simulatiemodel DESSIM90. In hoofdstuk 5 wordt daar nader op ingegaan. Er zijn modules gebruikt voor een IVK met een theoretisch rendement en met het rendement van het prototype van de koeler bij twee verschillende verhoudingen tussen plaat-

en kasoppervlakte ($A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}}$). Daarnaast zijn er simulaties gemaakt waarbij er door middel van natuurlijke ventilatie gekoeld en ontvochtigd wordt. Ook in het IMAG-DLO rapport 93-13 worden in het kort de effecten op het kasklimaat beschreven indien het prototype van de koeler wordt gebruikt voor het conditioneren van het kasklimaat.

zie ook:

H.J.M. Vollebregt en T. de Jong,
'*Experimenteel onderzoek aan indirecte verdampingskoeling*' IMAG-DLO rapport 93-13.

T. de Jong and H.J.M. Vollebregt,
'*Evaluation of an air conditioner based on indirect evaporative cooling*' Technical paper (No. 90) for CLIMA 2000, International conference on heating, ventilating and air conditioning, 1-3 november (1993) London, U.K.

5 Kasklimaatsimulaties

5.1 Inleiding

Met behulp van het kasklimaatsimulatiemodel, DESSIM90, zijn de effecten op het klimaat en de energiebehoefte berekend indien indirecte verdampingskoeling wordt toegepast in de kas.

Het gebruikte computermodel DESSIM90 wordt in grote lijnen beschreven in het IMAG-DLO rapport 91-14 *'Ventilatie in kassen'*.

Het inbouwen in het simulatiemodel van de subroutine IEC (indirect evaporative cooler) in DESSIM90 biedt de mogelijkheid de kaslucht in plaats van door natuurlijke ventilatie door indirecte verdampingskoeling te koelen en te ontvochtigen.

Er zijn modules gebruikt voor een indirecte verdampingskoeler (IVK) met een 'theoretische' prestatie (uitgedrukt in een temperatuurrendement η_T) en een IVK met de prestaties van het geteste prototype van de koeler (zie appendix A van het IMAG-DLO rapport 93-13), bij twee verhoudingen van plaatoppervlak/kasoppervlak $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}}$.

In alle simulaties wordt op temperatuur geregeld met behulp van de temperatuurregulemodule. Berekeningen zijn uitgevoerd met weergegevens van het referentiejaar voor de glastuinbouw 'SEL'.

Uitgangspunt voor het bespreken van de resultaten is het gerealiseerde kasklimaat en de bijbehorende energiebehoefte in een simulatie, waarbij er sprake is van natuurlijke ventilatie en geen gebruik van minimumbuis of scherm.

In de simulaties wordt met behulp van de IVK's zoveel mogelijk een gelijke maximumkasluchttemperatuur (T_{airmax}) gerealiseerd als bij de natuurlijk geventileerde kas, zodat een vergelijking mogelijk is. De belangrijkste bevindingen worden in tabelvorm weergegeven.

Naast de kasklimaatsimulaties zijn berekeningen gemaakt om na te gaan wat de voor-koeling met grondbuizen en de benutting van de warmtecapaciteit van de bodem kan betekenen voor de koeling en daarmee voor de afmetingen van de IVK.

5.2 Resultaten klimaatsimulaties

Zoals vermeld in 5.1 is getracht in de simulaties met de IVK dezelfde T_{airmax} te bereiken als bij de simulatie met natuurlijke ventilatie. Dat kon voor de simulatie met de IVK ($\eta_T = 0,75$) bereikt worden bij een maximum-ventilatie-debiet van $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, terwijl voor de simulatie met het prototype IVK $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ nodig was bij de verhouding $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}} = 3,24$.

Dit maximum-debiet van $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ is vastgehouden voor de simulatie met het prototype IVK, waarbij $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}} = 0,5$. Daarmee is het criterium voor het bereiken van dezelfde T_{airmax} in deze simulatie losgelaten.

Tabel 1 Berekende variabelen in de kas met natuurlijke ventilatie of met verschillende IVK's.

Table 1 Calculated variables in the greenhouse with natural ventilation or with application of different indirect evaporative coolers.

	natuurlijke ventilatie		IVK $\eta_T = 0,75$		prototype IVK $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}} = 3,24 \text{ m}^2/\text{m}^2$		prototype IVK $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}} = 0,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
luchttemperatuur °C	17,0	31,8	17,0	31,7	17,0	31,0	17,0	34,2
planttemperatuur °C	16,2	33,9	16,2	34,4	16,2	33,6	16,2	36,6
rel. vochtigheid lucht %	28,0	98,7	63,9	98,6	59,0	99,0	63,9	98,6
ventilatie debiet $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$	0	260	0	40	0	100	0	100
aantal uur lucht temp. > 30 °C	29		31		15		91	
aantal uur rel. vocht. > 90%	2904		3699		3129		3528	
aantal uur max.	-		1230		1010		1420	
ventilatie-debiet IVK			(40 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)		(100 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)		(100 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	

Tabel 2 Energiebehoefte (stookenergie) in kWh/m² per kwartaal en per jaar voor kassen met natuurlijke ventilatie of met IVK (temperatuurregeling).

Table 2 Energy requirement (combustion heat, kWh/m²) quarterly and yearly for greenhouses with natural ventilation or with application of indirect evaporative cooling (temperature control).

	natuurlijke ventilatie	IVK $\eta_T = 0,75$	prototype IVK $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}} = 3,24 \text{ m}^2/\text{m}^2$	prototype IVK $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}} = 0,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$
wk 1 t/m 13	189,1	189,0	189,1	188,9
wk 14 t/m 26	54,8	53,8	54,4	52,3
wk 27 t/m 39	20,3	19,6	20,1	18,4
wk 40 t/m 52	146,1	146,0	146,0	145,9
wk 1 t/m 52	410,2	408,4	409,6	405,5

Tabel 3 Ventilatiebehoefte in aantal ventilatie-uren en gemiddelde ventilatie ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) bij natuurlijke ventilatie of toepassing van IVK (temperatuurregeling).

Table 3 Ventilation requirement in terms of number of ventilation hours and average ventilation flux ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) for natural ventilation or indirect evaporative cooling (temperature control).

	natuurlijke ventilatie	IVK $\eta_T = 0,75$	prototype IVK $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}} = 3,24 \text{ m}^2/\text{m}^2$	prototype IVK $A_{\text{plaat}}/A_{\text{kas}} = 0,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$
ventilatie-uren	1813	2107	2207	2304
gem. ventilatie	64,5	25,4	61,3	70,1

5.3 Gebruik van grondbuizen

In principe kan door het gebruik van een combinatie van grondbuizen en de IVK de koelcapaciteit van de IVK gereduceerd worden. Immers een deel van de koeling komt voor rekening van het warmtebufferend vermogen van de grond.

De koellast wordt bepaald door de globale straling in de kas ($\tau \cdot I$). Voor het referentiejaar voor de glastuinbouw (SEL-jaar) zijn de frequenties voor het produkt ($\tau \cdot I$), met $\tau = 0,75$, gegeven in tabel 4. Ook is de pieklast (de gesommeerde hoeveelheid energie in Wh van de hoogste onderscheiden klassen van de globale straling ($\tau \cdot I$)) berekend. De energie van deze piek kan door middel van de grondbuizen opgeslagen worden in de grond.

Het koeleffect van de buizen zal het grootst zijn indien de grondbuizen een constante (lage) temperatuur houden ten opzichte van de buitenlucht. Dit veronderstelt een warmtecapaciteit van de grond die oneindig is. In werkelijkheid zal de bodem door de warmte-afgifte van de kaslucht opwarmen. De opgeslagen energiehoeveelheid (de grootte van de piek) hangt derhalve af van de warmtecapaciteit van de buffer.

Indien de warmtecapaciteit van de bodem gelijk wordt gesteld aan die van een bufferende grondlaag ($C_p = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$) van 1 meter dikte onder de kas (1 m³ grond per m² kas-oppervlakte), dan is, als het maximale temperatuurverschil van kaslucht en bodem 10 °C bedraagt, de hoeveelheid energie die in de bodem opgeslagen kan worden (per m² kas): $2,5 \cdot 10^6 \cdot 10 = 2,5 \cdot 10^7 \text{ J} = 6944 \text{ Wh}$.

Wanneer ongeveer 7000 Wh van de totale koellast opgeslagen wordt, is het, volgens tabel 4, mogelijk om de koellast (pieklast) af te toppen tot ongeveer 545 W/m² t.o.v. het maximum van ongeveer 665 W/m². Indien de bufferende laag van 1 meter dikte een warmtecapaciteit heeft gelijk aan die van water ($C_p = 4,2 \cdot 10^6$), dan zou de maximale koelcapaciteit van de IVK beperkt kunnen worden tot ongeveer 510 W/m². Dit betekent een reductie van meer dan 150 W/m².

De energie-opslag van de buffer zal erg afhangen van de uitvoering. Het voorbeeld toont echter wel aan dat het benutten van de warmtecapaciteit van de bodem (of een ander medium) een bijdrage kan leveren aan een beperking van de maximaal benodigde koelcapaciteit van de IVK.

Daartegenover staat wel dat er extra kosten zijn voor de investeringen en de energie die nodig is voor de ventilatoren.

Tabel 4 Uurverdeling van de globale straling in de kas voor het SEL-jaar.**Table 4** Hourly distribution of global radiation in the greenhouse (SEL-year).

straling ($\tau \cdot I$) W/m ²	aantal uren h	som uren Σh	pieklast $\Sigma(W/h)$	straling ($\tau \cdot I$) W/m ²	aantal uren h	som uren Σh	pieklast $\Sigma(W/h)$
660-670	1	1	10	500-510	25	190	13060
650-660	5	6	70	490-500	20	210	15160
640-650	6	12	190	480-490	23	233	17490
630-640	14	26	450	470-480	25	258	20070
620-630	13	39	840	460-470	18	276	22830
610-620	3	42	1260	450-460	31	307	25900
600-610	7	49	1750	400-450	111	418	30080
590-600	8	57	2320	350-400	187	605	36130
580-590	10	67	2990	300-350	192	797	44100
570-580	7	74	3730	250-300	232	1029	54390
560-570	8	82	4550	200-250	290	1319	67580
550-560	20	102	5570	150-200	450	1769	85270
540-550	11	113	6700	100-150	505	2274	108010
530-540	21	134	8040	50-100	716	2990	137910
520-530	13	147	9510	0-50	5771	8761	225520
510-520	18	165	11160				

5.4 Discussie

Uit de simulaties blijkt dat het kasklimaat vochtiger wordt indien een indirecte verdampingskoeler wordt toegepast (bij regeling op kasluchttemperatuur). Voor het prototype van de koeler is dit resultaat volgens de verwachtingen (par. 4.3). Het kasklimaat is het vochtigst indien de IVK van 0,5 m² plaat per m² kas wordt gebruikt. Juist bij de hoge debieten, die door de kleinere IVK gevoerd moet worden, is de verhouding tussen afgevoerde hoeveelheid latente en voelbare warmte ongunstig (kleiner dan 2). Er wordt dan bij de regeling op kasluchttemperatuur onvoldoende vocht uit de kaslucht gehaald, zodat de relatieve vochtigheid toeneemt.

De simulaties laten zien dat de kasluchttemperatuur goed te beheersen is met indirecte verdampingskoeling. Hoewel de temperaturen van de kaslucht elkaar wat ontlopen, is het gerealiseerde kasklimaat in grote lijnen hetzelfde bij het gebruik van de verschillende IVK's. Dit verklaart dat er weinig verschil in het energieverbruik van de kas te zien is bij toepassing van natuurlijke ventilatie of van de verschillende IVK's (tabel 2).

Het rekenvoorbeeld (tabel 4) toont aan dat het gebruik van grondbuizen een reductie van de koellast oplevert. De economische aspecten hiervan zijn niet onderzocht.

5.5 Conclusies

De belangrijkste gevonden effecten m.b.t. het conditioneren van het kasklimaat zijn:

- de minimum waarde van de relatieve vochtigheid van de kaslucht in een gesloten kas neemt toe bij gebruik van de IVK;
- het aantal uren dat de relatieve vochtigheid groter is dan 90% stijgt bij gebruik van IVK;

- de energiebehoefte (verwarmingsenergie) blijft in alle simulaties nagenoeg gelijk;
- de ventilatiebehoefte is erg afhankelijk van de prestatie van de IVK;
- koeling door grondbuizen kan bijdragen aan een wezenlijke reductie van de maximale koellast van de IVK.

De relatieve vochtigheid van de kaslucht wordt duidelijk hoger wanneer alleen op temperatuur geregeld wordt. Dit effect is natuurlijk afhankelijk van de verhouding afgevoerde latente en voelbare warmte per m^2 warmtewisselend oppervlak van de IVK. Door een RV-regeling toe te passen in de kas zal de RV lager te houden zijn.

6 Kostenaspecten en perspectief van de gesloten kas

6.1 Kostenaspecten

Er zijn verschillende mogelijkheden om het klimaatbeheersingssysteem te realiseren in de gesloten kas. Voor de klimatisering van gesloten kassystemen zijn de kosten van 4 mogelijke varianten van klimaatbeheersingssystemen, combinaties van centraal/decentraal en mechanische koeling en verdampingskoeling, met behulp van een rekenprogramma (KOEL-SEL) berekend.

De methode, die gebruikt is voor het berekenen van het energieverbruik en de kosten, wordt uitgelegd in het artikel 'Beheersing kasklimaat in gesloten bedrijfssystemen'. De vaste kosten zijn geschat op basis van een prijsopgave van de firma Holland Heating. De uitvoeringsvorm van de koeler is een platenwarmtewisselaar.

De goedkoopste variant blijkt de verdampingskoeling met een decentrale opstelling te zijn. Voor deze variant zijn het energieverbruik en de kosten weergegeven in tabel 5 (temperatuurregeling). Aan de hand van de berekende ventilatie-uren voor de gecombineerde temperatuur- en vochtregeling (85% RV) in het IMAG-DLO rapport 91-14 'Ventilatie in kassen' is ook een schatting gemaakt voor de kosten voor deze regeling (tabel 5).

Tabel 5 Berekend energieverbruik (elektrisch) en kosten per jaar *) bij verschillende regelingen (platenwarmtewisselaar).

Table 5 Calculated energy consumption (electric) and costs per year *) for different control strategies (plate-type heat exchanger).

	ventilatie-uren	kWh/(m ² ·jaar) voor koelen	kosten variabel/(m ² ·jaar)	kosten vast/(m ² ·jaar)
temperatuur-regeling	≈ 1900	30	f 7,50	f 10,50
temperatuur- en vochtregeling	≈ 3800	60	f 15,-	f 10,50

*) ventilatie-uren berekend in: 'Ventilatie in kassen' IMAG-DLO rapport 91-14
*) number of ventilation hours calculated in: 'Ventilatie in kassen' IMAG-DLO rapport 91-14

De totale extra kosten per jaar liggen volgens de berekeningen per m² kas rond de f 18,- per jaar voor een temperatuurregeling. Voor een gecombineerde temperatuur- en vochtregeling zijn de kosten ongeveer f 25,50 / (m²·jaar). Natuurlijk hangt dit sterk af van de uitvoering en optimalisatie (rendement) van de koeler.

Een alternatieve uitvoeringsvorm van de indirecte verdampingskoeler is de 'con-

vectorput'-uitvoering, waarbij het warmtewisselend oppervlak verzonken is in de kasbodem. Het achterliggende idee om de wisselaar in deze vorm uit te voeren is om de warmte-overdracht van de kaslucht (grotendeels) plaats te laten vinden door vrije convectie aan het warmtewisselend oppervlak.

Door het warmtewisselend oppervlak te verzinken in de bodem wordt bovendien het distributiesysteem van de kaslucht geïntegreerd in de kas. Verwacht wordt dat er bij deze uitvoering slechts een relatief kleine hoeveelheid ventilatorenergie gebruikt hoeft te worden voor het transport en de warmteoverdracht van de kaslucht (tabel 6).

Berekend is dat de warmte-overdracht in de convectorput ongeveer 100 W/m^2 plaatoppervlak bedraagt. Dat betekent dat ongeveer 5 à 6 m^2 plaat per m^2 kas geïnstalleerd zal moeten worden. Het berekende te installeren vermogen van de ventilator per m^2 kas is voor de buitenlucht dan 7 W en voor de binnenlucht 3 W. Er is geen schatting gemaakt van de vaste kosten omdat daarover te veel onzekerheden bestaan.

Tabel 6 Berekend energieverbruik (elektrisch) en kosten per jaar (convectorput) voor verschillende regelingen.

Table 6 Calculated energy consumption (electric) and costs per year (convectorput) for different control strategies.

	ventilatie-uren	kWh _e /(m ² ·jaar)	kosten variabel/(m ² ·jaar)
temperatuur-regeling	≈ 1900	19	f 4,75
temperatuur- en vochtregeling	≈ 3800	38	f 9,50

Er is een duidelijke winst te zien ten opzichte van de operationele kosten voor koelen door middel van de 'conventionele' platenwarmtewisselaar. Niettemin is er sprake van een grote kostenpost die goedgemaakt zal moeten worden door de voordelen die een gesloten productiesysteem biedt.

6.2 Perspectief

6.2.1 Korte termijn

kosten

Tabel 5 toont aan dat de totale extra kosten die nodig zijn voor een klimaatinstallatie tussen de f 15,- à f 20,- per m^2 per jaar bedragen. De kosten zijn sterk afhankelijk van de uitvoering van de koeler en de regeling. De kosten zullen gecompenseerd moeten worden door een hogere opbrengst. Voor een tomatengewas is er dan een opbrengstverhoging nodig van ongeveer 25%, bij een gelijke prijs voor het produkt.

Tabel 7 Het gemiddelde gasverbruik per sector van de glastuinbouw (1989).
Table 7 The average gas consumption for different horticultural sectors (1989).

energieverbruik (m ³ ·gas/(m ² ·jaar))		
groente	snijbloemen	potplanten
44	38	48

Het absolute energieverbruik in de tuinbouw zal, bij grootschalige introductie van een gesloten produktiesysteem, toenemen. De hoeveelheid elektrische energie die nodig is voor de klimatisering van een gesloten kas met indirecte verdampingskoeling in de convectieputuitvoering ($\approx 40 \text{ kWh}_e/(\text{m}^2 \cdot \text{jaar})$, bij een gecombineerde temperatuur- en vochtregeling), komt overeen met ongeveer $13 \text{ m}^3 \text{ gas}/(\text{m}^2 \cdot \text{jaar})$. Gemiddeld over de sectoren betekent dat een stijging in absoluut energieverbruik van ongeveer 30%.

Een verbetering van de energie-efficiëncy (eenheid energie per eenheid produkt) in een gesloten kas zal alleen bereikt kunnen worden door een flinke opbrengstverhoging. De produktiewinst in een gesloten kas ten opzichte van de huidige Venlo-kassen wordt geschat op ongeveer 20%. Te weinig derhalve voor een verbetering van de energie-efficiëncy.

Gezien de extra kosten voor de tuinder en de stijging van het energieverbruik, nodig voor de klimaatbeheersing, lijkt de economische en maatschappelijke haalbaarheid van een gesloten kas op korte termijn niet waarschijnlijk.

6.2.2 Lange termijn

In de toekomst zal het onderzoek naar energiezuinige kassen niet stilstaan. Centraal staat daarbij de ontwikkeling van kassen met een hoge thermische isolatie en een hoge lichttransmissie.

Berekeningen met het rekenmodel energiebehoefte in kassen 'JBDK90', zoals beschreven in het IMAG-DLO rapport '*Beschrijving van een statisch en een dynamisch simulatiemodel voor kassen*' (1994, in voorbereiding), tonen aan dat grote energiebesparingen mogelijk zijn indien kasdekken ontwikkeld en toegepast kunnen worden met een goede thermische isolatie (een verbetering van de U-waarde met 40 à 50% ten opzichte van de huidige U-waarde van 8) en een goede licht-transmissie (gelijk aan die van enkelglas).

Gekeken is naar de energiebehoefte voor een tomatenteelt bij gebruik van wel (+) of geen (-) minimumbuis en droogstoken. Een uitgebreide beschrijving van de strategie bij minimumbuis hantering en droogstoken kan gevonden worden in het IMAG-DLO rapport 113 '*Energiebehoefte voor kasteelten afhankelijk van de afstand tot de kustlijn; Deelstudie naar de gevolgen van het verleggen van de kustlijn tussen 's-Gravenhage en Hoek van Holland*' (J.J.G. Breuer, 1989). Enkele modelparameters zijn:

- lichttransmissie gelijk aan die van enkelglas;
- lichtafhankelijke verhoging van temperatuur-setpoint;
- geen schermen 's nachts;
- rendement ketel 90% (bovenwaarde).

Tabel 8 Energiebehoefte (stookenergie) voor tomatenteelt voor verschillende U-waarden en stookregimes.

Table 8 *Energy requirement (combustion heat) for a tomato crop for different U-values and heating strategies.*

U-waarde	min. buis	droog-stoken	energiebehoefte kWh/(m ² .jaar)	energiebehoefte m ³ gas/(m ² .jaar)	index per regime	index t.o.v. 69.15
8	+	+	608	69	100	100
4,8	+	+	447	51	74	74
4,0	+	+	416	47	68	68
8	–	+	499	57	100	82
4,8	–	+	295	34	59	49
4,0	–	+	245	28	49	40
8	–	–	479	54	100	79
4,8	–	–	273	31	57	45
4,0	–	–	223	25	47	37

Uit tabel 8 blijkt dat grote energiebesparingen mogelijk zijn bij lage U-waarden van de kas. Zonder gebruik van minimumbuis bedraagt de besparing ongeveer 40 à 50%. Dit komt overeen met 200 à 250 kWh/(m².jaar) en toont aan dat er potentieel ruimte is voor de klimatisering (in energie-technische zin) indien er nieuwe kasdekken beschikbaar komen met een lage U-waarde en hoge lichttransmissie.

De ontwikkeling van een energiezuinige koel- en ontvochtigingsmethode is ook van groot belang voor andere dan gesloten kassystemen. Het maakt in het algemeen de toepassing van goed isolerende dekmaterialen mogelijk. De optredende hoge luchtvochtigheden als gevolg van minder condensatie aan het isolerende dek heeft deze toepassing tot op heden tegengehouden. Dit toont het belang aan van de ontvochtiging door het klimatiseringsapparaat.

Eerdere berekeningen tonen aan dat met name een alternatieve ontvochtigingsmethode de ventilatie zo kan beperken dat dit, in het geval van een RV-regeling, een besparing op de warmtebehoefte kan opleveren tot 400 kWh/(m².jaar) (hoofdstuk 2).

Uit het bovenstaande blijkt dat in de toekomst een reductie van het absolute energieverbruik van de kas tot de mogelijkheden hoort. Belangrijk daarbij is de ontwikkeling van een goed isolerend dek met een hoge lichttransmissie en een energiezuinig klimatiseringsapparaat.

Deze ontwikkelingen zullen in ieder geval leiden tot een kas in een meer gesloten uitvoering. Of de kas bovengronds uiteindelijk helemaal gesloten zal worden, is nog een open vraag.

zie: P. Knies,
'Beheersing kasklimaat in gesloten bedrijfssystemen' Vakblad voor de bloemisterij 2
(1992), p. 44-47.

7 Conclusies

De experimenten tonen aan dat door middel van indirecte verdampingskoeling, bij ontwerpcondities, zowel latente als voelbare warmte uit de kaslucht onttrokken wordt. Simulatieberekeningen laten zien dat de kaslucht (indien op temperatuur geregeld wordt) vochtiger wordt. De kasluchttemperatuur is bij het gebruik van IVK goed te beheersen. Zowel een andere regeling (gericht op handhaving van zowel temperatuur als RV) als een verbetering van het ontwerp van de koeler kunnen de klimaatbeheersing verbeteren.

Op korte termijn is het niet te verwachten dat de volledig gesloten kas in de praktijk toepassing vindt. Daarvoor zijn er te veel economische obstakels. Bovendien zal de productie in gesloten kassen het absolute energieverbruik (en waarschijnlijk ook de energie-efficiency) in negatieve zin beïnvloeden.

Op langere termijn zijn er echter perspectieven voor de productie in een meer gesloten kas. Die hangen nauw samen met een aantal parallelle ontwikkelingen in het onderzoek om tot energie-zuinige kassystemen te komen.

Grote energiebesparingen zijn mogelijk indien nieuwe kasdekken beschikbaar komen die een hoge thermische isolatie paren aan een hoge lichttransmissie. Op deze manier komt er ruimte voor de (energie-)kosten van de klimatisering. Indien er energiezuinige klimatiseringsapparatuur beschikbaar komt, kan de energie-efficiency verbeteren.

Aan de andere kant maakt energiezuinige klimatiseringsapparatuur juist een optimale toepassing van beter geïsoleerde kasdekken mogelijk. Een hoge relatieve vochtigheid in de kas, door de vermindering van de condensatie aan het kasdek, heeft de toepassing van goed geïsoleerde kasdekken tot nu toe in de weg gestaan. Dit onderstreept het belang van ontvochtigen door het klimatiseringsapparaat. Eerder was al geconstateerd dat een alternatieve manier van ontvochtigen grote besparingen kan opleveren op de warmtebehoefte van de kas, door de sterke beperking van de benodigde ventilatie. Indien geschikte klimatiseringsapparatuur beschikbaar is, kan de kas in een meer gesloten uitvoering gebouwd worden.

De voordelen van de productie in een meer gesloten kas zullen met name sterk afhangen van de kosten en het energieverbruik van het klimatiseringssysteem. De ontwikkeling van een energiezuinig klimatiseringssysteem is een belangrijk onderwerp binnen het onderzoek naar kassen met een hoge energie-efficiency, waarbij in het achterhoofd speelt dat een conceptverschuiving van de kas nodig is voor wezenlijke doorbraken op het gebied van de productie in de tuinbouw.

Summary

A fully closed greenhouse (i.e. a greenhouse without ventilators) is accredited with several benefits which could lead to a higher production. These are: a reduction of the emission of pollutants (e.g. pesticides and CO₂), an improvement of thermal insulation and total light transmission due to new cladding materials and construction designs, the possibility of maintaining at lower costs a high concentration of CO₂ in the greenhouse, and an improvement of biological and integrated pest control.

However, for any closed environment, natural ventilation has to be replaced by air conditioning. In the present report the most important results of the research project 'Ontwerp van klimaatbeheersingsapparatuur voor gesloten kassystemen' ('Design of an air conditioner for conditioning closed greenhouses') are discussed. The project research aimed at developing and testing an air conditioner for closed greenhouses. The report gives references to the main work performed in the framework of the above-mentioned project.

The main conclusion from the research project is that the chosen air conditioning principle (i.e. indirect evaporative cooling) is suitable for the conditioning of closed greenhouses.

The test results show that the prototype air conditioner is able to transfer large amounts of latent and sensible heat from the greenhouse air, even under Dutch design conditions. Model simulations demonstrate the effect of the application of indirect evaporative cooling on the greenhouse climate. Results strongly depend on the performance of the cooler and the control strategy chosen. However, it has been concluded that the application of this cooling system in fully closed greenhouses is not yet economic.

Controlled dehumidification would considerably improve greenhouse operations and it could enable the use of new cladding materials with high thermal insulation. If an air conditioning system with low energy input was available, reduced ventilation and new cover materials could lead to large energy savings. Therefore, research on cost-effective air conditioning systems is important to develop new greenhouse production systems with a low energy consumption. Probably this new greenhouse will be more closed than the present ones. Whether it will be a fully closed greenhouse remains a debatable question.

Verschenen rapporten

- 93-1 Huis in 't Veld, J.W.H., Kroodsmā, W. en S. van Westreenen – Vermindering ammoniakemissie uit een ligboxenstal door spoelen van de roosters. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 16 pp., f 25,00
- 93-2 Elzing, A. en D. Swierstra. – Ammoniakemissiemetingen in een modelsysteem van een varkensstal; de invloed van vloerbevuilding en het vloertype. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 24 pp., f 25,00
- 93-3 Elzing, A. en W. Kroodsmā – De relatie tussen ammoniakemissie en stikstofconcentratie in de urine van melkvee. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 22 pp., f 25,00
- 93-5 Dieën, J.H. van – Functional load of the low back. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 150 pp., f 40,00
- 93-6 Boer, W.J. de – Box Jenkins tijdreeksanalyse, toegepast op de resultaten van ammoniakemissiemetingen in een rundveestal. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 32 pp., f 30,00
- 93-7 Hoeksma, P., Scholtens, R. en A.J. van den Berg – Een milieuvriendelijk bedrijfssysteem voor de varkenshouderij. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 26 pp., f 30,00
- 93-8 Smits, M.C.J., Kroodsmā, W., Swierstra, D. en W.J. de Boer – Opzet van het onderzoek inzake beperking van de ammoniakemissie in de Milieu-onderzoekstal. Wageningen, IMAG-DLO-rapport, 32 pp., f 35,00
- 93-9 Drost, H. en D. van der Drift – Vergelijkend arbeidshygiënisch onderzoek in twee huisvestingssystemen voor leghennen. Onderzoek naar omgevingscomponenten en ODTS-symptomen. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 54 pp., f 40,00
- 93-10 Uenk, G.H., Demmers, T.G.M. en M.G. Hissink – Luchtsamenstelling onder de overkapping van mestilo's vóór en na het mixen van de mest. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 22 pp., f 25,00
- 93-11 Aarnink, A.J.A., Houwers, H.W.J., Ouwerkerk, E.N.J. van en P.B. Hangelbroek – Vooronderzoek naar een milieu- en welzijnsvriendelijk huisvestingssysteem voor vleesvarkens. Mestscheiding, vloerkoeling en grote groepen dieren. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 41 pp., f 40,00
- 93-12 Kasper, G.J. – Literatuuronderzoek naar het droogproces van gemaaid gras en de invloed van technische factoren hierop. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 34 pp. f 30,00
- 93-13 Vollebregt, H.J.M. en T. de Jong – Experimenteel onderzoek aan indirecte verdampingskoeling. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 56 pp. f 35,00
- 93-14 Hendrix, A.T.M. – Taaktijden voor de groenteteelt onder glas. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 95 pp. f 40,00
- 93-15 Loeffen, H. – CO₂-produktiesnelheid als maat voor groei van de champignon *Agaricus bisporus*. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 75 pp. f 35,00

- 93-16 Swierstra, D. en M.J.M. van den Elzen. – Verhardingen voor containerteelt buiten: technische eisen en ontwerpvarianten.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 61 pp. f 35,00
- 93-17 Frénay, J .W., Waltje, H. en H. Zilverberg. – Duurzaamheid van beton in agrarische milieu.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 108 pp. f 50,00
- 93-18 Ketelaar-de Lauwere, C.C., Benders, E. en P.J.M. Huijsmans. – De reactie van koeien als de krachtvoerverstrekking in de stal afhankelijk wordt gesteld van die in de AMS-ruimte. De invloed van verschillende stalindelingen.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 19 pp. f 35,00

De rapporten kunt u **schriftelijk** bestellen door overmaking van het genoemde bedrag op Postbanknummer 3514771 ten name van IMAG-DLO te Wageningen, onder vermelding van het rapportnummer.

Reports must be ordered by transferring the appropriate amount (in Dutch Guilders) to the IMAG-DLO account, no. 3514771, at the Postbank, Wageningen, quoting the relevant report number(s)

