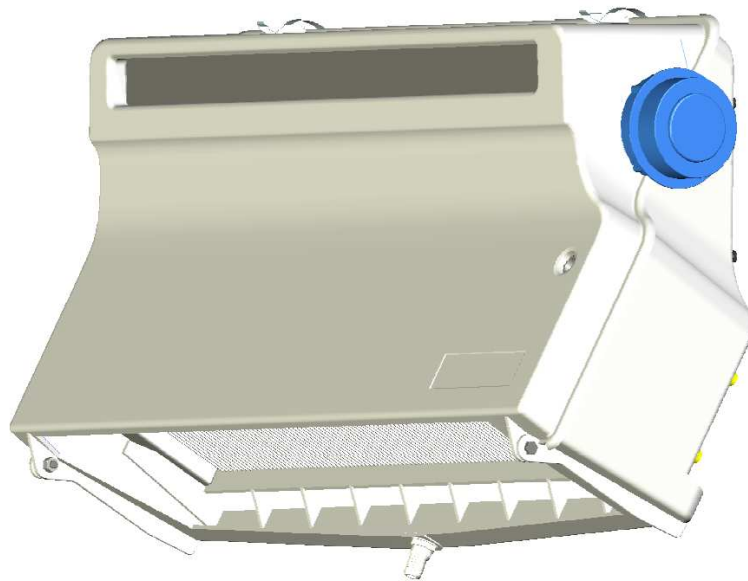


Warmte-overdrachtsprestaties van de OPAC106 warmtewisselaar



H.F. de Zwart
H.J.J. Janssen

Productschap  Tuinbouw



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit

Wageningen UR Glastuinbouw
PT project nummer : 13991
Herziene versie, oktober 2010

Rapport GTB-1019

© 2010 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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 enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Pagina
1 Samenvatting	1
2 Inleiding	2
3 Metingen aan de OPAC106 warmtewisselaar	3
3.1 Meetopstelling	3
3.2 Resultaten	5
4 Een simulatiemodel voor de vertaling van benchmark punten naar gebruiksomstandigheden	8
5 De OPAC106 warmtewisselaar in vergelijking met andere warmtewisselaars	10
5.1 Vergelijking tussen OPAC106 en FiWiHEX warmtewisselaar	10
5.2 Vergelijking tussen OPAC106 en de koelers in de SunergieKas	14
6 Conclusies	15

1 Samenvatting

Zowel vanuit het oogpunt van een betere beheersbaarheid van het kasklimaat, als vanuit de toenemende behoefte aan laag-temperatuur verwarmingssystemen zijn er de afgelopen jaren belangrijke ontwikkelingen in warmtewisselaars voor de tuinbouw in gang gezet. Er zijn systemen die boven in de kas worden geplaatst en systemen die onderin zijn gesitueerd. Er zijn installaties met en luchtverdelingsslurven, maar ook systemen met een vrije uitblaas. Door de veelheid aan toepassingsgebieden zijn warmtewisselaars moeilijk onderling vergelijkbaar. Als een warmtewisselaar onderin een kas met roltafels kas gebruikt wordt is er veel inbouwruimte beschikbaar. Indien het kasklimaat het meest gebaat is bij koeling van bovenaf wordt de lichtonderschepping van de installaties die daarvoor gebruikt worden van groot belang. In dat geval is de inbouwmaat een belangrijk kwaliteitskenmerk van de koeler. Ook de mate waarin warmtewisseling systemen zorgen voor een homogene horizontale en verticale temperatuurverdeling verschilt per apparaat zodat dit aspect bij vergelijking van systemen altijd in de gaten gehouden moet worden. Tenslotte is er nog een groot verschil in geluidsproductie tussen de ene en de andere warmtewisselaar

In dit rapport zijn de warmte-overdrachtprestaties van een nieuw type compacte warmtewisselaar bestudeerd, de OPAC106 warmtewisselaar met dwarsstroom ventilator. OPAC betekent Ovale Pijpen Air Conditioner en heeft betrekking op de constructie van het warmtewisselende onderdeel van de unit waar ovale pijpen bijdragen aan een goede luchtdoorstroming. Het koelvermogen van deze wisselaar ligt bij gebruik in warme en vochtige kassen in de vermogensrange van 20 kW per unit, hoewel het uiteindelijke vermogen in de praktijk heel sterk bepaald wordt door de gebruiksomstandigheden. Wordt er heel koud koelwater gebruikt dan neemt het koelvermogen uiteraard toe en bij gebruik in droge lucht of bij lage kasluchttemperaturen loopt het koelvermogen belangrijk terug.

De metingen die ten behoeve van de benchmarking van de OPAC106 warmtewisselaar zijn gebruikt bestrijken dan ook verschillende temperaturen en luchtvochtigheden. Behalve dat deze metingen op zich al een goed beeld geven van de prestatie van de koeler is op grond van de gemeten data een simulatiemodel ontwikkeld dat de prestatie van de koeler onder willekeurige gebruiksomstandigheden beschrijft. Met het model kan ook een betrouwbare verwachting van de werking van de warmtewisselaar in de verwarmingsmodus worden gegeven.

De getoonde prestaties van de OPAC106 warmtewisselaar geven echter nog niet zoveel informatie zolang deze niet vergeleken worden met de prestaties van voor de hand liggende alternatieven. Daarom wordt in dit rapport de OPAC106 warmtewisselaar in eerste instantie vergeleken met de FiWiHex warmtewisselaar zoals die in 2008 werd gebouwd. Omdat deze FiWiHex warmtewisselaar vrijwel dezelfde inbouwmaten heeft en voor hetzelfde toepassingsgebied is ontwikkeld kon de vergelijking in een simultaantest plaatsvinden. De vergelijking vindt dan onder dezelfde gebruiksomstandigheden plaats, wat de beoordeling sterk vereenvoudigt. Uit deze simultaantest bleek dat de OPAC106 warmtewisselaar beter uit de bus kwam, vooral wanneer de verhouding tussen het voor de ventilator benodigde elektriciteitsverbruik wordt afgezet tegen het geleverde koelvermogen.

De hogere warmteoverdracht per unit maakt dat de OPAC106 warmtewisselaar minder geluid produceert dan de FiWiHex warmtewisselaar omdat de ventilator bij de OPAC106 warmtewisselaar bij vergelijkbare koelvermogens op een wat lager toerental kan draaien. Ook is geconstateerd dat de OPAC106 warmtewisselaar een duidelijk lagere waterzijdige drukval oplevert dan de FiWiHex warmtewisselaar. De effecten op geluidsniveau en de waterzijdige drukval zijn echter niet gekwantificeerd.

Naast de gedetailleerd vergelijking met de FiWiHex warmtewisselaar is de prestatie van de OPAC106 warmtewisselaar met nog een andere warmtewisselaar vergeleken die voor koeltoepassingen in eenzelfde categorie past. Ook ten opzichte van deze andere wisselaar presteert de OPAC106 warmtewisselaar beter.

Met het gegeven dat in semi-gesloten kassen het elektriciteitsverbruik voor de ventilatoren tijdens koeling ongeveer 15 kWh per m² per jaar verbruiken wordt berekend dat de verbetering van de warmteoverdracht van de OPAC106 een besparing op elektriciteitsverbruik van 5 kWh per m² per jaar oplevert. Wordt de warmtewisselaar ook voor het verwarmen gebruikt dan loopt de besparing door de toepassing van een OPAC106 warmtewisselaar in vergelijking met de beschouwde alternatieven op tot zo'n 8 kWh per m² per jaar.

2 Inleiding

Koeling in kassen is een technologie die sterk in ontwikkeling is. Het gebruik van koeling kan de tuinbouwproductie verbeteren in kwaliteit en kwantiteit en de verzameling van de zomerse warmte-overschotten kan bij gebruik hiervan in koudere perioden belangrijk bijdragen aan de verduurzaming van de tuinbouw.

Voor de energetisch en bedrijfseconomisch relevante prestatie is het van belang dat de warmtewisselaars die bij de koeling en verwarming van de kas gebruikt worden een goede warmteoverdracht realiseren bij een laag elektriciteitsverbruik, terwijl de investeringskosten voor de wisselaars beperkt blijven.

In dit rapport wordt een nieuw type warmtewisselaar voor de tuinbouw op deze punten beoordeeld. Het betreft een compacte warmtewisselaar die opgebouwd is uit een combinatie van een dwarsstroom ventilator en een OPAC106 tube-and-fin wisselaar. De units kunnen gebruikt worden om per stuk een kasoppervlak van 50 tot 100 m² kas te koelen, maar ze kunnen ook gebruikt worden voor laag-temperatuur verwarmingssystemen. In dat geval zou 1 unit een basisverwarming van zo'n 50 W/m² voor ongeveer 160 m² kas kunnen verzorgen.

Het rapport bespreekt in hoofdstuk 3 de meetopstelling waarmee een ruim aantal benchmark-punten is verkregen. Deze punten gelden voor de koelcapaciteit in vochtige en in droge omstandigheden bij vrij hoge kasluchttemperaturen (25 tot 28 °C) en lage koelwatertemperaturen (7 á 8 °C). In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op een model waarmee vanuit deze benchmark-punten de performance van de koeler onder willekeurige situaties kan worden berekend en waarmee ook kan worden bepaald hoe de warmtewisselaar in de verwarmingsmodus zal presteren.

In hoofdstuk 5 wordt de prestatie van de OPAC106 warmtewisselaar vergeleken met een tweetal andere wisselaars waarvan goed gedocumenteerde benchmark-punten voorhanden zijn. De meest intensieve vergelijking wordt gemaakt met FiWiHEx warmtewisselaar die qua uitwendige maatvoering en toepassingsgebied sterk op de OPAC106 warmtewisselaar lijkt.

In hoofdstuk 6 worden de conclusies uit dit onderzoek gepresenteerd en worden deze conclusies doorvertaald naar hun betekenis in de alledaagse praktijk.

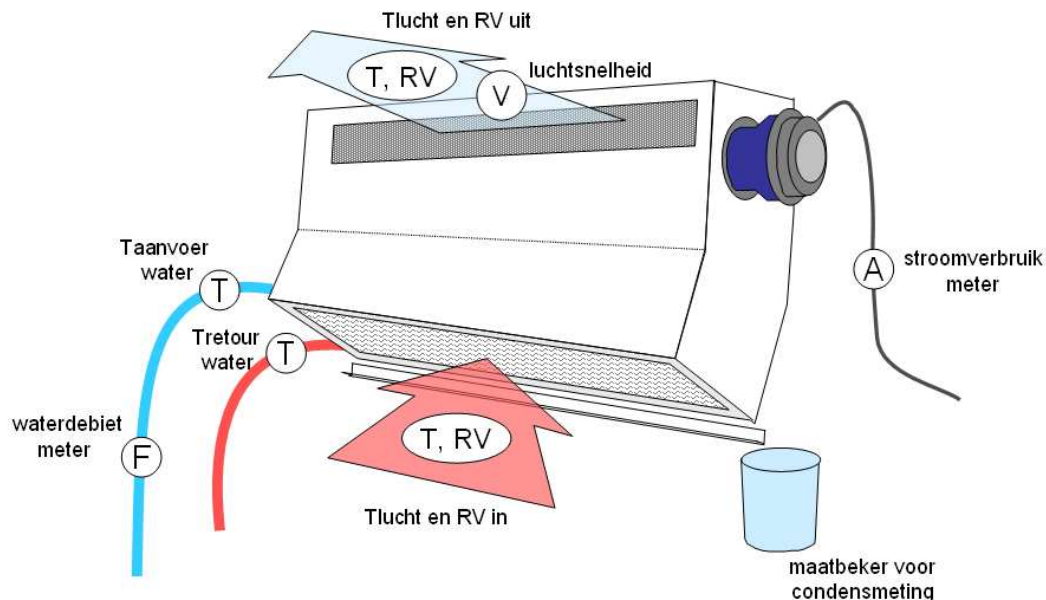
Het voorliggende rapport gaat niet in op de performance van de warmtewisselaar voor wat betreft de horizontale en verticale temperatuurverdeling in de kas. Ook gaat dit rapport niet in op de verwachte corrosiebestendigheid. Beide punten zijn van minstens even groot belang als de warmte-overdrachtprestatie. Deze aspecten worden in een vervolgproject onderzocht.

3 Metingen aan de OPAC106 warmtewisselaar

3.1 Meetopstelling

De capaciteit van een warmtewisselaar wordt bepaald door apparaat-kenmerken en door de gebruiksomstandigheden. De apparaat-kenmerken bepalen de efficiëntie van het warmtewisselende oppervlak en de efficiëntie waarmee de ventilator elektrische energie omzet in luchtbeweging door de wisselaar. Daarnaast hebben de gebruiksomstandigheden natuurlijk ook een enorm grote invloed. Eenzelfde koeler zal in vochtige lucht een groter koelvermogen kunnen leveren dan in droge lucht en verhoging van het waterdebiet en/of het luchtdebiet door de koeler zal ook tot een grotere warmteoverdracht leiden.

Om de prestatie van de OPAC106 warmtewisselaar te bepalen zijn er daarom een groot aantal meetpunten verzameld onder verschillende omstandigheden. In onderstaande schets zijn de meetinstrumenten rond de warmtewisselaar getoond.



Figuur 1. Opnemers rond de OPAC106 warmtewisselaar

Voor de metingen werd gebruik gemaakt van het TCS meet- en regelsysteem van Lek/Habo (het Total Control System). De temperatuur-opnemers in de waterstroom zijn voorafgaand aan de metingen een tijdje naast elkaar in een bak water gehouden om na te gaan of ze in dat geval dezelfde temperatuur opleverden. Dit bleek het geval, afgezien van een ruis van ± 0.1 °C, zodat de later gemeten verschillen tussen aanvoer- en retourtemperatuur als betrouwbaar konden worden aangemerkt. Het waterdebiet werd met een turbinerad flowmeter bepaald, waarvan de uitlezing vergeleken is met een inductieve, geijkte, flowmeter. Met de combinatie van deze drie metingen kon een nauwkeurige bepaling van het actuele koelvermogen worden gedaan.

De luchtzijdige meetresultaten zijn vergeleken met de resultaten uit een draadloos temperatuursensor netwerk dat door Wageningen UR rond de aanzuig- en uitblaaszijde was aangebracht.

Het elektriciteitsverbruik van de ventilator werd bepaald middels een in het circuit opgenomen ampèremeter die na vermenigvuldiging met de stabiele spanning van 230 V het opgenomen motorvermogen aangaf.

De condensafvoer werd bepaald door met behulp van een stopwatch gedurende 5 minuten water uit de condensgoot van de koeler te verzamelen. Als deze meting na het wijzigen van het ventilatordebiet werd uitgevoerd dan werd er eerst zo'n 7 minuten gewacht totdat zich weer een gestabiliseerde situatie had ingesteld.

Om de werkings-condities van de warmtewisselaar te bepalen is steeds de ingaande luchttemperatuur en luchtvochtigheid gemeten. Hiertoe was een temperatuur- en vochttopnemer voor de aanzuigopening van de warmtewisselaar geplaatst. Ook de uitgaande luchttemperatuur en luchtvochtigheid is gemeten. Vanwege die variabiliteit in de luchtsnelheid is het luchtdebiet dat door de koeler stroomt bepaald door de uitblaassnelheid op 5 (gemarkeerde) plaatsen langs de uitblaasopening te meten en deze te middelen. vervolgens is deze gemiddelde snelheid vermenigvuldigd met het effectieve uitblaas-oppervlak van de ventilator (0.083 m²).

Figuur 2 toont een foto van de meetopstelling in een kasafdeling van het PTC+ in Ede. De gebruikte warmtewisselaar is opgebouwd uit de uiteindelijk te gebruiken ventilator en warmtewisselaar-blok, maar heeft nog niet de uiteindelijke behuizing. De uiteindelijke behuizing is mede op grond van de ervaringen tijdens de metingen bij PTC+ vastgesteld. De gekozen hoek waaronder de warmtewisselaar was geplaatst bleek goed te voldoen. Het condenswater stroomde prima af naar de condensverzamelgoot en de warmtewisselaar raakte nergens met water verzadigd.

De uiteindelijke omkasting wordt een deelbare kunststof behuizing waardoor de warmtewisselaar gemakkelijk geopend kan worden voor inspectie en/of reiniging.

De testafdeling betrof een leeg kascompartiment van 200 m² waar de luchtvochtigheid op een hoog niveau werd gebracht middels verneveling en waarbij de zon en het verwarmingssysteem voor een hoge temperatuur zorgden.

Het aluminium folie dat op de foto te zien is zorgde voor de zonafscherming van de temperatuur-opnemers.



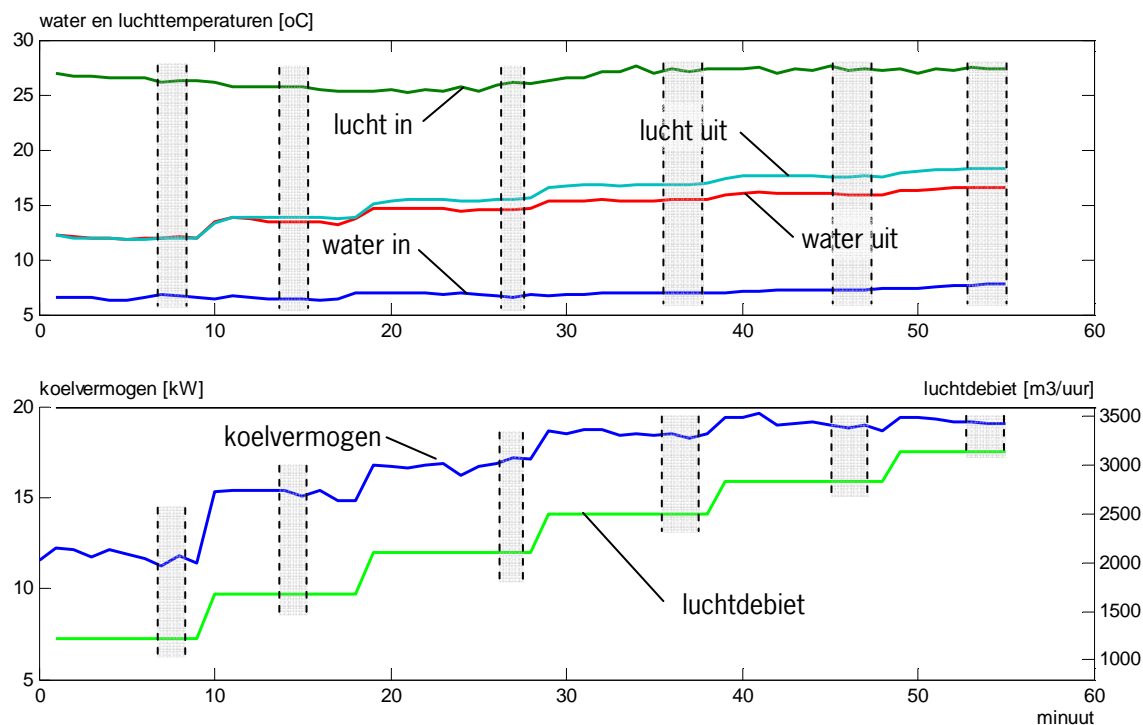
Figuur 2. Meetopstelling bij een kasafdeling van PTC+ in Ede

3.2 Resultaten

Op maandag 13, en donderdag 15 april 2010 hebben de metingen aan de OPAC106 warmtewisselaar plaatsgevonden. Beide dagen waren zonnig, zodat er niet veel verwarmingsvermogen nodig was om de kaslucht op temperaturen tussen de 25 en 28 °C te brengen.

Een meetserie bestond uit een cyclus van 6 tot 8 koelniveaus bij een vast waterdebiet en een ongeveer constante luchtvochtigheid en kasluchttemperatuur de warmtewisselaar met verschillende luchtdebieten te laten werken.

Figuur 3 toont de resultaten van zo'n meetserie. De metingen vonden continu plaats, maar de meetgegevens waarop de benchmarkpunten zijn gebaseerd zijn de gemiddelden van de grijze gebiedjes die in de grafieken zijn getoond. De selectie van die gebiedjes vond handmatig plaats door goed naar alle lijnen te kijken en een stukje te selecteren waarin alle waarden zoveel mogelijk vlak liggen.



Figuur 3. Ingaande water- en luchttemperaturen en gemeten koelvermogens bij verschillende ventilatorstanden. De RV lag tijdens deze metingen tussen de 79% (aan het begin van dit uur) en 74% (aan het eind van het uur). In de figuur zijn 6 stationaire gebieden aangegeven die gebruikt zijn als gemiddelde waarde voor een benchmark punt. Het waterdebiet bedroeg in deze meetserie 1.87 m³/uur.

Op soortgelijke wijze als aangegeven in Figuur 3 zijn er in totaal 27 benchmark punten bepaald. Deze staan weergegeven in Figuur 4. De maximale koelcapaciteit die in deze periode gemeten is was 19.1 kW, welke werd gerealiseerd met een hoog waterdebiet, een hoog luchtdebiet en een hoge luchtvochtigheid.

Een hoge luchtvochtigheid draagt belangrijk bij aan het koelvermogen omdat, zoals uit de tabel blijkt, ruim de helft van de koelcapaciteit uit latente warmte bestaat. Hierdoor wordt het koeloppervlak als het ware dubbel gebruikt; voor de overdracht van warmte en voor de overdracht van vocht.

Naast het koelvermogen toont de tabel ook het opgenomen elektrisch vermogen. Door het elektrisch vermogen te delen door het koelvermogen wordt een Coefficient Of Performance, een COP van de warmtewisselaar verkregen. Het is duidelijk dat de COP hoog is bij een lage belasting van de koeler en afneemt tot waarden tussen de 25 en 50 bij het maximale water- en luchtdebiet.

benchmark nummer	Water in °C	Lucht in °C	luchtvochtigheid % R/V	waterdebiet m³/uur	luchtdebiet m³/uur	koelvermogen kW	fractie latent %	elektrisch vermogen W	warmtewisselaar COP
1	6.5	26.4	78	0.03	1280	11.7	58	33	356
2	6.5	25.5	79	0.06	1760	15.1	57	63	240
3	6.8	25.8	76	0.12	2220	16.8	55	119	142
4	7.0	27.2	74	0.19	2620	18.4	54	192	96
5	7.2	27.3	74	0.28	2980	18.9	53	276	69
6	7.8	27.3	74	0.36	3280	19.1	52	364	53
7	6.8	24.3	37	0.03	1280	4.7	0	33	143
8	6.7	25.0	36	0.06	1760	6.8	0	63	108
9	6.5	25.6	35	0.12	2220	8.9	0	119	75
10	6.5	25.8	35	0.19	2620	10.3	0	192	54
11	6.5	25.9	34	0.28	2980	11.3	0	276	41
12	6.5	26.1	33	0.36	3280	12.3	0	364	34
13	6.6	26.1	32	0.45	3560	12.7	0	450	28
14	6.6	26.6	31	0.45	3560	11.2	0	450	25
15	6.6	26.9	30	0.36	3280	10.9	0	364	30
16	6.8	26.8	29	0.28	2980	10.3	0	276	37
17	7.0	27.2	28	0.19	2620	9.8	0	192	51
18	6.6	27.4	27	0.12	2220	9.0	0	119	76
19	6.7	27.7	27	0.06	1760	7.7	0	63	123
20	6.7	28.0	26	0.03	1280	6.0	0	33	182
21	6.6	28.6	26	0.04	740	3.5	0	37	94
22	6.8	26.5	77	0.03	1280	10.1	56	33	306
23	6.6	27.2	80	0.06	1760	12.9	59	63	204
24	6.7	27.1	78	0.12	2220	14.1	56	119	119
25	6.7	26.7	77	0.19	2620	14.7	53	192	76
26	6.8	26.8	78	0.28	2980	15.4	53	276	56
27	7.1	27.0	78	0.36	3280	15.4	52	364	42

warm en vochtig,
↓ oplopend luchtdebiet

minder warm en droger,
↓ oplopend luchtdebiet

warm en droog,
laag waterdebiet
↓ afnemend luchtdebiet

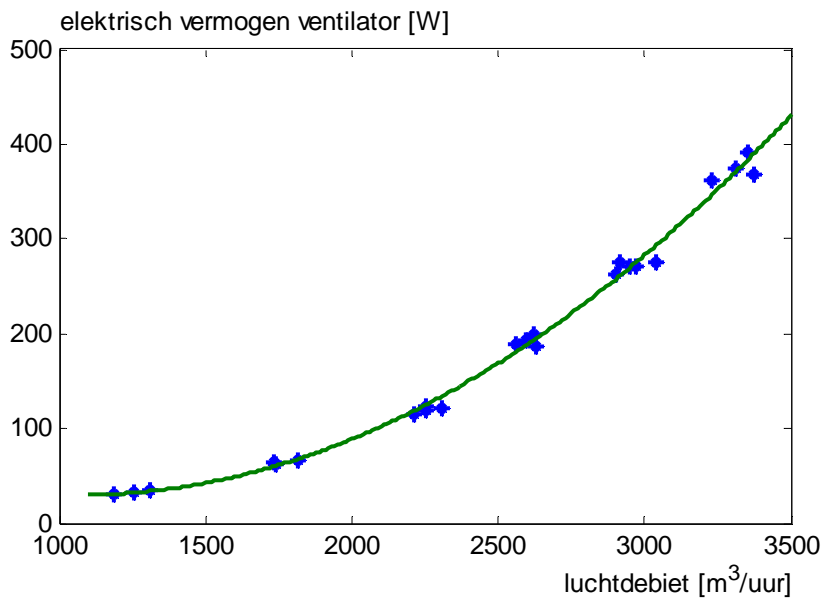
warm en vochtig,
laag waterdebiet
↓ oplopend luchtdebiet

Figuur 4. De 27 benchmark punten ter karakterisering van de OPAC106 warmtewisselaar.

Hoewel de warmte-overdrachtsprestaties van de OPAC106 warmtewisselaar als goed kunnen worden bestempeld is de vergelijking met andere warmtewisselaars niet in één oogopslag te maken omdat deze heel sterk van de werkingscondities afhangen.

Daarom is een simulatiemodel ontwikkeld die vanuit de getoonde benchmark punten het gedrag van de warmtewisselaar kan afleiden zodat een betrouwbare uitspraak voor de prestatie in willekeurige omstandigheden kan worden verkregen. Dit model wordt in het volgende hoofdstuk besproken.

Zoals af te leiden valt uit Figuur 4 is behalve de warmte-overdrachtsprestatie ook het elektriciteitsverbruik van de ventilator gemeten. Een analyse van de relatie tussen luchtdebiet en elektriciteitsverbruik levert de onderstaande grafiek.



Figuur 5. Relatie tussen luchtdebiet en elektriciteitsverbruik voor de OPAC106 warmtewisselaar

In het domein van 1100 tot 3500 m³ lucht per uur kan het verbruik erg goed met een kwadratische functie worden beschreven. De vergelijking luidt dan:

$$\text{Elektriciteitsverbruik} = 6.7 \cdot 10^{-5} \text{ debiet}^2 - 0.145 \text{ debiet} + 107 \text{ [W]} \quad (1100 \text{ m}^3/\text{uur} < \text{debiet} < 3500 \text{ m}^3/\text{uur})$$

In deze vergelijking is het luchtdebiet uitgedrukt in m³ per uur en volgt een elektriciteitsverbruik in Watt.

De gebruikte ventilator is een 230 Volt motor waarvan het toerental via een digitale aansturing 0 en 100% kan worden geregeld. De ervaring leert overigens dat het praktische regelbereik tussen 30 en 80% ligt. Daarom zijn er geen metingen bij nog lagere luchtsnelheden gedaan. Bovendien zal bij een laag luchtdebiet de verdeling van de uitgeblazen lucht in het horizontale vlak verslechteren. Het eindpunt van de getoonde grafiek is het maximale luchtdebiet door de ventilator.



Figuur 6. Detailfoto van de ventilatormotor op de OPAC106 warmtewisselaar

4 Een simulatiemodel voor de vertaling van benchmark punten naar gebruiksomstandigheden

In een warmtewisselaar is sprake van twee massastromen (in dit geval water en lucht) die van elkaar gescheiden zijn door middel van goed warmtegeleidend materiaal. Hierdoor blijven de massastromen gescheiden, maar kan de warmte worden uitgewisseld.

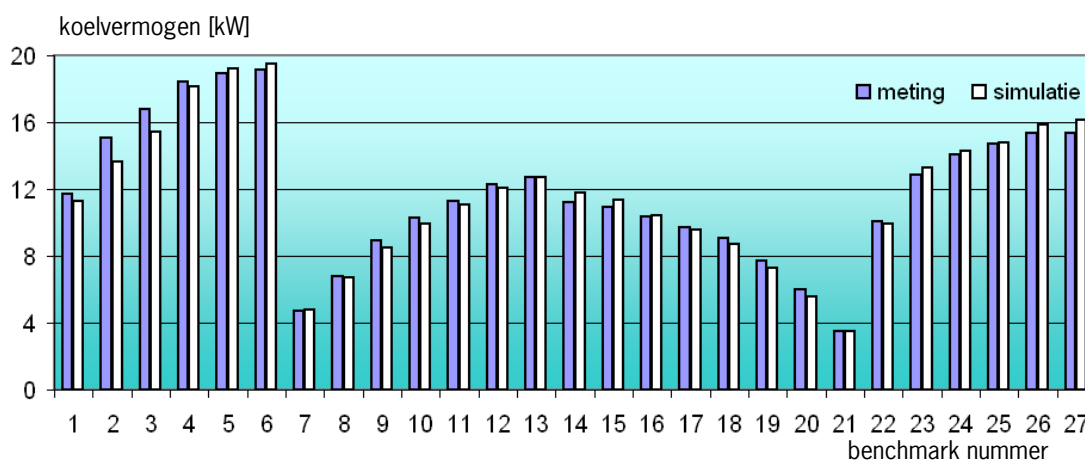
De warmte-uitwisselingscapaciteit (het vermogen) is ten principale afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de beide massastromen en wordt beïnvloed door de overdrachtscoëfficiënten aan zowel de lucht- als waterzijde.

Deze overdrachtscoëfficiënten zijn niet constant. Bij een hoge lucht en/of waterstroom neemt de turbulentie bij de uitwisselingsoppervlakken toe, waardoor de uitwisseling beter verloopt. Dit maakt dat een warmtewisselaar zich in het algemeen sterk niet-lineair gedraagt (twee keer zoveel lucht door de warmtewisselaar geeft niet twee keer zoveel vermogen).

Een andere belangrijk bron van niet-lineairiteit is condensatie bij gebruik in de koelmodus. Condensatie treedt op als een oppervlak beneden het dauwpunt van de luchttemperatuur ligt en de snelheid waarmee de condensatie plaatsvindt hangt af van het dampdruksverschil tussen lucht en oppervlak. Dampdruksrelaties zijn sterk niet-lineair waardoor een koeler onder wat drogere omstandigheden veel minder presteert dan onder vochtiger omstandigheden.

Om op een fysisch onderbouwde manier met al deze aspecten rekening te kunnen houden heeft Wageningen UR een model voor warmtewisselaars opgesteld. Dit model heeft een aantal parameters die via een geautomatiseerde parameter-zoek methode kunnen worden ingevuld ♦.

Onderstaande figuur laat de vergelijking zien tussen de 27 gemeten en gesimuleerde koelvermogens voor de OPAC106 warmtewisselaar



Figuur 7. Vergelijking van de simulatieresultaten met de 27 gemeten benchmark punten van de OPAC106 warmtewisselaar

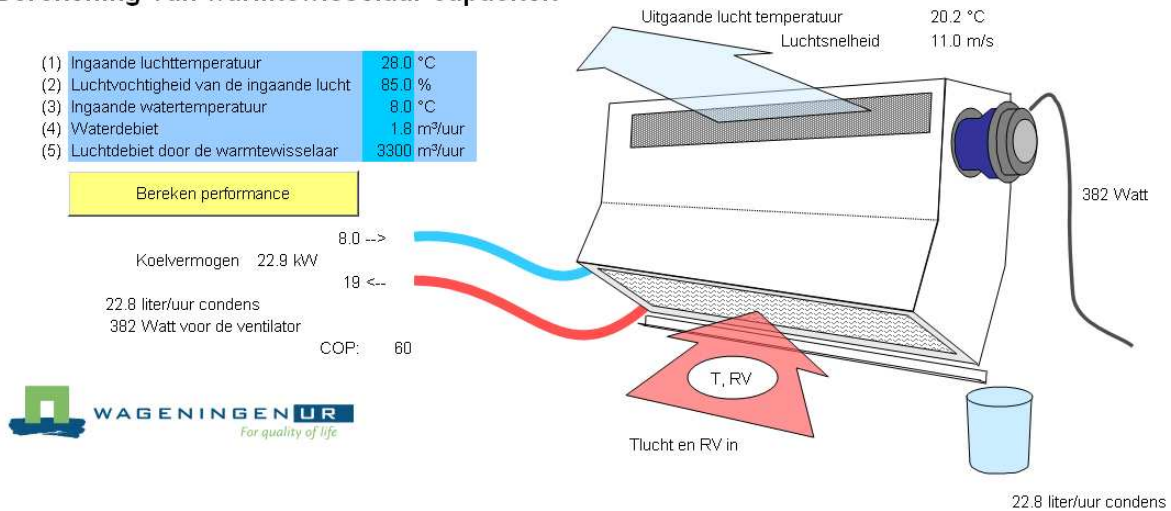
De vergelijking laat zien dat met uitzondering van het 2^e en 3^e benchmark punt, waar de afwijking bijna 10% is, het simulatiemodel een goede verwachting uitspreekt voor het koelvermogen dat onder bepaalde werkingscondities met de OPAC106 warmtewisselaar gerealiseerd wordt.

♦ Zwart, H.F. de and F.L.K. Kempkes, 2008, Characterizing of Cooling Equipment for Closed Greenhouses, Acta horticulturae (2008)801, pag 803-811

Het voor de OPAC106 warmtewisselaar getune-de model is in een spreadsheet programma toegankelijk gemaakt zodat de koelcapaciteit voor een willekeurige situatie kan worden berekend.

Figuur 8 toont het invoer- en uitvoerscherf van dit spreadsheet. Het blijkt dat de OPAC106 warmtewisselaar onder de getoonde werkscondities 22.9 kW koelvermogen levert waarbij er 22.8 liter/uur condens uit de koeler stroomt. De warmtewisselaar levert hierbij 60 W koeling per W elektriciteit

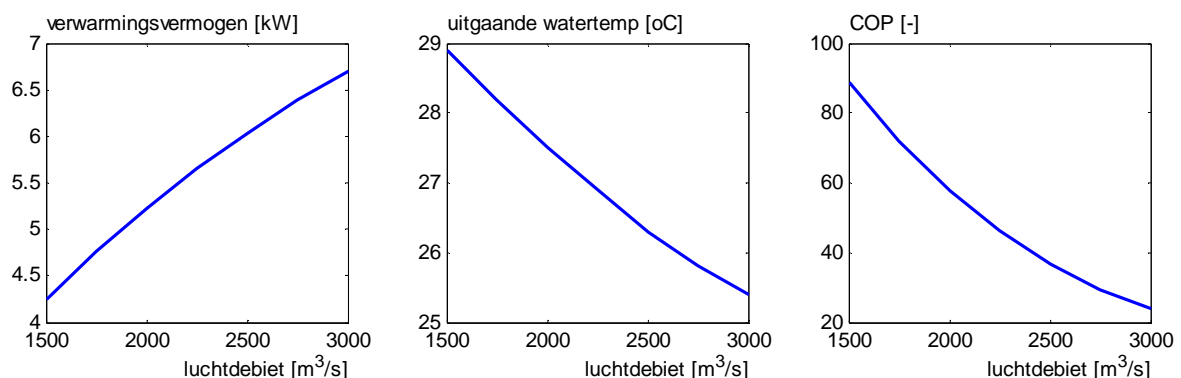
Berekening van warmtewisselaar capaciteit



Figuur 8. Input en output van het voor de OPAC106 warmtewisselaar getune-de warmtewisselaar model

Het simulatiemodel houdt nauwgezet de bijdrage van de latente en de voelbare warmteoverdracht bij, en daarom kan het model zowel voor berekeningen in de koelmodus als voor de verwarmingsmodus worden gebruikt.

Figuur 9 toont het verwarmingsvermogen indien de warmtewisselaar wordt gebruikt om warmte toe te voeren aan lucht van 20 °C met verwarmingswater van 35 °C. Het waterdebiet is op 0.6 m³/uur ingesteld en het luchtdebiet verloopt van 1500 naar 3000 m³/uur. De figuur toont niet alleen het geleverde verwarmingsvermogen, maar ook de uitstromende watertemperatuur en de resulterende COP.



Figuur 9. Verwachte performance van de OPAC106 warmtewisselaar in de verwarmingsmodus. De kasluchttemperatuur is 20 °C, de verwarmingswatertemperatuur is 35 °C en het waterdebiet is 0.6 m³ per uur.

Het verwarmingsvermogen kan natuurlijk nog wat worden opgevoerd door de aanvoerwatertemperatuur of het waterdebiet te verhogen, maar in beide gevallen loopt ook de uitstroomtemperatuur op. Bij een debiet van 1.8 m³/uur en een luchtdebiet van 3000 m³/uur kan bij een aanvoerwatertemperatuur van 35 °C ruim 8.5 kW verwarmingsvermogen worden geleverd, maar is de uitstroomtemperatuur bijna 31 °C.

5 De OPAC106 warmtewisselaar in vergelijking met andere warmtewisselaars

De metingen aan de OPAC106 warmtewisselaar hebben interessante resultaten opgeleverd, maar blijven moeilijk grijpbaar wanneer ze niet tegen de achtergrond van de warmte-overdrachtprestaties van vergelijkbare koelers worden geplaatst. Daarom is parallel aan de metingen aan de OPAC106 warmtewisselaar in dezelfde meetopstelling gemeten aan de FiWiHEX warmtewisselaar zoals die in 2008 is geproduceerd.

Om de prestaties van de OPAC106 in een nog wat breder licht te plaatsen wordt in § 5.2 wordt een vergelijking gemaakt met de koelers van één van de Energieproducerende Kassen op het IDC (de koelers in de SunergieKas).

5.1 Vergelijking tussen OPAC106 en de FiWiHEX warmtewisselaar

Gelijktijdig met de metingen aan de OPAC106 warmtewisselaar zijn er metingen aan een FiWiHEX warmtewisselaar uitgevoerd. Deze warmtewisselaar is voorzien van dezelfde ventilator als de OPAC106. De metingen vonden simultaan plaats zodat de werkingscondities vrijwel identiek waren (zie Figuur 10). Omdat de metingen parallel liepen zijn ook voor de FiWiHEX 27 benchmarkpunten verkregen. Deze staan afgebeeld in Figuur 11.

Bij vergelijking van de resultaten van de OPAC106 en de FiWiHEX blijkt dat de koelvermogens van de OPAC106 allemaal groter zijn dan die van de FiWiHEX, met name bij situaties met wat hogere luchtdebieten. De belangrijkste reden hiervoor is dat bij gelijke aansturing van de stroom naar de ventilator (beide warmtewisselaars werden in de meetserie parallel door de computer aangestuurd) het luchtdebiet door de OPAC106 warmtewisselaar duidelijk groter was. Uiteraard is dan het koelvermogen groter.

In de uiteindelijke vergelijking van de efficiëntie van een warmtewisselaar gaat het echter niet alleen om de vergelijking van het koelvermogen, maar ook om de vergelijking van het koelvermogen per eenheid ventilatorvermogen. Dit betekent dus een vergelijking van de COP van de warmtewisselaar. Een globale indruk van de COP die door de FiWiHEX bij een bepaald koelvermogen wordt gerealiseerd geeft aan dat deze iets lager is dan bij de OPAC106, maar een gemakkelijke vergelijking kan niet gemaakt worden omdat er in de 27 benchmarkpunten geen enkele situatie echt gelijk is.

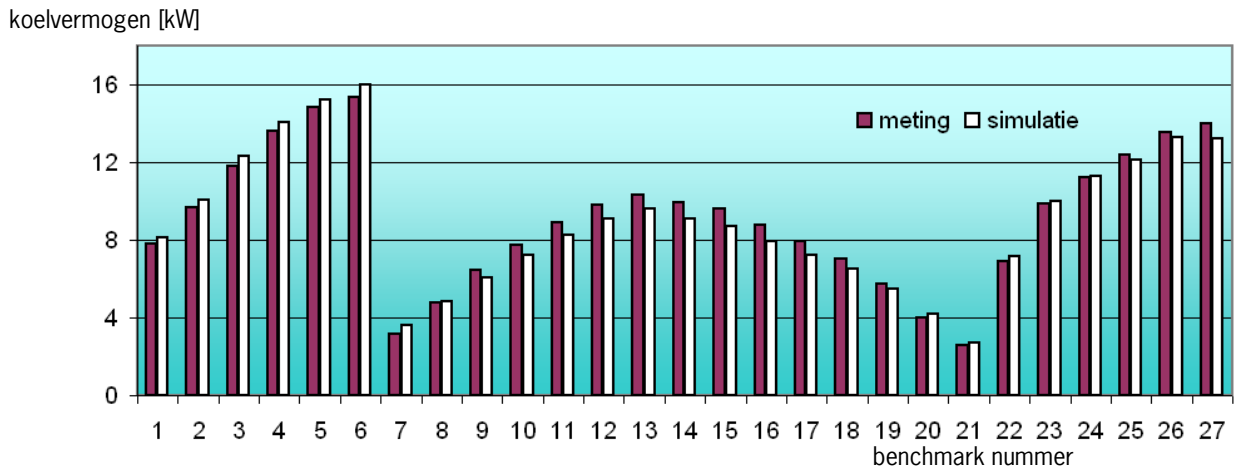
Daarom is opnieuw gebruik gemaakt van het warmtewisselaar-simulatiemodel, maar dan geparameteriseerd naar de prestaties van de FiWiHEX warmtewisselaar. Figuur 12 toont het resultaat van simulatie en metingen en geeft aan dat ook voor de FiWiHEX warmtewisselaar een goede match wordt verkregen, met name onder vochtige omstandigheden.



Figuur 10. Meetopstelling bij het PTC+ in ede waar naast de OPAC106 warmtewisselaar parallel aan de FWiHex warmtewisselaar is gemeten.

benchmark nummer	Water in		Lucht in		luchtvochtigheid		waterdebiet		luchtdebiet		koelvermogen		fractie latent		elektrisch vermogen		warmtewisselaar COP
	°C	°C	% RV	m³/uur	m³/uur	kW	%	W	-								
1	6.5	25.7	78.2	1.83	1120	7.8	56	32	246	warm en vochtig, ↓ oplopend luchtdebiet							
2	6.4	25.1	78.8	1.84	1520	9.7	56	52	186								
3	6.7	26.0	76.4	1.85	1880	11.8	55	92	128								
4	6.9	26.6	74.1	1.86	2220	13.6	54	147	93								
5	7.1	26.7	73.9	1.86	2520	14.8	48	211	70								
6	7.7	26.9	73.5	1.88	2780	15.3	53	281	55								
7	6.7	24.6	36.9	1.74	1120	3.2	1	32	100	minder warm en droger, ↓ oplopend luchtdebiet							
8	6.6	24.6	35.5	1.74	1520	4.8	0	52	92								
9	6.5	24.9	34.9	1.75	1880	6.5	0	92	70								
10	6.4	25.3	34.5	1.74	2220	7.8	0	147	53								
11	6.4	25.7	33.9	1.76	2520	8.9	0	211	42								
12	6.5	25.8	33.0	1.75	2780	9.8	0	281	35								
13	6.6	25.6	32.4	1.76	3040	10.3	0	354	29								
14	6.5	26.0	31.4	1.05	3040	10.0	0	354	28	warm en droog, laag waterdebiet ↓ afnemend luchtdebiet							
15	6.5	26.4	30.0	1.06	2780	9.6	0	281	34								
16	6.7	26.4	29.2	1.06	2520	8.8	0	211	42								
17	6.9	26.9	27.9	1.06	2220	7.9	0	147	54								
18	6.6	27.2	27.1	1.05	1880	7.0	0	92	76								
19	6.7	27.8	26.7	1.05	1520	5.7	0	52	110								
20	6.7	27.9	26.2	1.05	1120	4.0	0	32	127								
21	6.5	28.6	25.6	1.05	700	2.6	0	36	71								
22	6.7	25.5	76.8	1.06	1120	6.9	55	32	219	warm en vochtig, laag waterdebiet ↓ oplopend luchtdebiet							
23	6.5	26.2	80.1	1.07	1520	9.8	57	52	189								
24	6.7	26.2	77.8	1.07	1880	11.2	55	92	122								
25	6.6	26.0	76.7	1.07	2220	12.4	54	147	84								
26	6.6	26.1	78.0	1.07	2520	13.5	54	211	64								
27	7.0	25.6	77.9	1.07	2780	14.0	53	281	50								

Figuur 11. De 27 benchmark punten van de FWiHex warmtewisselaar die parallel aan de metingen aan de OPAC106 warmtewisselaar zijn gemeten.



Figuur 12. Vergelijking van metingen en simulatie van de FiWiHex warmtewisselaar

Nu het gedrag van beide warmtewisselaars met een goed verklarend model kan worden beschreven kan voor elk van de 27 benchmark-punten de gemiddelde werkingsconditie worden bepaald en kan vervolgens via de modelberekening worden uitgerekend hoeveel de meetwaarden naar boven of naar beneden zouden schuiven indien de werkingscondities wél precies gelijk waren geweest.

De procedure wordt uitgelegd aan de hand van de data van het eerste benchmarkpunt.

zie Figuur 4 en 11

	Water in °C	Lucht in °C	luchtvochtigheid % Rv	waterdebiet m³/uur	luchtdebiet m³/uur	koelvermogen kW	gestimuleerd koelvermogen kW
meting 1 OPAC	6.5	26.4	78	1.87	1280	11.7	11.5
meting 1 FiWiHex	6.5	25.7	78	1.83	1120	7.8	8.1
gemiddelde cond	6.5	26.1	78	1.85	1200	10.9	10.7
OPAC bij gem. cond	6.5	26.1	78	1.85	1200	10.9	10.7
FiWiHex bij gem. cond	6.5	26.1	78	1.85	1200	8.5	8.8

Annotations in the table: -7% between OPAC and FiWiHex cooling capacity; +9% between OPAC and average condition; -7% between average condition and FiWiHex at average condition; +9% between average condition and FiWiHex at average condition.

Figuur 13. Toelichting op de procedure waarbij met het simulatiemodel het effect van het gelijktrekken van benchmarkpunten wordt doorgerekend. Het procentuele effect in het simulatiemodel wordt overgenomen op de meetwaarden.

Het grootste verschil tussen de werkingsomstandigheden bij het eerste benchmarkpunt zit in de hoeveelheid doorstromende lucht (hier ligt overigens bij alle benchmarkpunten het grootste verschil). De andere omstandigheden verschilden slechts marginaal.

Bij gelijkgetrokken werkingsomstandigheden moet er op grond van de meetgegevens wat minder lucht door de OPAC106 stromen en wat meer door de FiWiHex warmtewisselaar. Het simulatiemodel berekent dat onder deze gelijkgetrokken omstandigheden de OPAC106 7% minder koelvermogen zou gaan leveren en de FiWiHex warmtewisselaar 9% meer. Een vergelijking tussen de OPAC106 en de FiWiHex onder gelijke omstandigheden zou dus betekenen dat het gemeten koelvermogen voor de OPAC106 met 7% verlaagd moet worden (en dus 10.9 kW wordt) en de FiWiHex met 9% verhoogd (en daarmee op 8.5 kW uitkomt).

Het elektriciteitsverbruik voor de OPAC106 warmtewisselaar bij een luchtdebiet van 1200 m³/uur bedraagt 31 W en de FiWiHex warmtewisselaar gebruikt bij 1200 m³/uur 39 W elektriciteit.

Onderstaande tabel toont de op deze manier uitgevoerde vergelijking tussen de OPAC106 en FiWiHex warmtewisselaar.

	binnenruimte nutmer		Lucht in		luchtvochtigheid		waterdebiet		luchtdebiet		koelvermogen OPAC		koelvermogen FiWiHEX		elektrisch vermogen OPAC		elektrisch vermogen FiWiHEX		COP OPAC		COP FiWiHEX		koelcap. verbetering	
	°C	°C	% Rv	m³/uur	m³/uur	kW	kW	W	W	-	-	%	%											
1	6.5	26.1	78	0.93	1200	10.9	8.5	31	34	350	253	28	38											
2	6.5	25.3	79	0.95	1640	14.0	10.4	52	63	269	165	35	63											
3	6.7	25.9	76	0.98	2050	16.2	12.5	95	118	170	106	29	59											
4	6.9	26.9	74	1.02	2420	17.2	14.7	154	189	112	78	17	44											
5	7.2	27.0	74	1.07	2750	17.8	16.5	222	271	80	61	7	31											
6	7.7	27.1	74	1.12	3030	18.2	16.4	291	353	63	46	11	35											
7	6.8	24.4	37	0.89	1200	4.5	3.3	31	34	143	99	34	44											
8	6.6	24.8	36	0.90	1640	6.3	5.2	52	63	122	82	22	48											
9	6.5	25.2	35	0.93	2050	8.2	7.1	95	118	86	60	16	43											
10	6.4	25.6	35	0.96	2420	9.6	8.5	154	189	62	45	12	38											
11	6.5	25.8	34	1.02	2750	10.5	9.7	222	271	47	36	9	33											
12	6.5	26.0	33	1.06	3030	11.5	10.6	291	353	39	30	8	31											
13	6.6	25.8	32	1.10	3300	11.9	11.2	367	444	32	25	6	28											
14	6.6	26.3	31	0.75	3300	10.5	10.7	367	444	29	24	-2	19											
15	6.6	26.6	30	0.71	3030	10.2	10.3	291	353	35	29	-1	20											
16	6.8	26.6	29	0.67	2750	9.7	9.4	222	271	44	35	2	25											
17	6.9	27.0	28	0.63	2420	9.2	8.6	154	189	59	45	7	32											
18	6.6	27.3	27	0.59	2050	8.5	7.6	95	118	89	64	12	38											
19	6.7	27.8	27	0.56	1640	7.3	6.1	52	63	141	97	20	45											
20	6.7	28.0	26	0.54	1200	5.7	4.3	31	34	183	127	33	44											
21	6.6	28.6	26	0.54	720	3.5	2.6	38	35	91	74	33	23											
22	6.7	26.0	77	0.54	1200	9.3	7.6	31	34	300	225	23	33											
23	6.6	26.7	80	0.56	1640	12.3	10.7	52	63	236	170	15	39											
24	6.7	26.7	78	0.59	2050	13.3	12.1	95	118	140	103	10	35											
25	6.7	26.4	77	0.63	2420	14.0	13.2	154	189	91	70	6	30											
26	6.7	26.5	78	0.67	2750	14.7	14.4	222	271	66	53	2	25											
27	7.0	26.3	78	0.72	3030	14.5	15.3	291	353	50	43	-5	16											

Figuur 14. Vergelijking van de prestatie van de OPAC106 warmtewisselaar met de FiWiHEX warmtewisselaar. In bijna alle gevallen levert de OPAC106 een hoger koelvermogen. Het elektriciteitsverbruik van de ventilator bij een bepaald luchtdebiet in het geval van de OPAC106 warmtewisselaar steeds lager. Daardoor is de COP van de OPAC106 warmtewisselaar, (het koelvermogen per eenheid elektrisch vermogen) in alle gevallen hoger.

In praktisch alle gevallen levert de OPAC106 warmtewisselaar een grotere koelcapaciteit dan de FiWiHEX warmtewisselaar. Qua warmte-overdrachtsefficiëntie wordt het verschil nog groter omdat het elektriciteitsverbruik van de OPAC106 wisselaar bij een bepaald luchtdebiet lager is dan wanneer deze ventilator eenzelfde hoeveelheid lucht door de FiWiHEX warmtewisselaar moet trekken. De COP voor de warmteoverdracht wordt hierdoor merkbaar verbeterd.

Doordat de OPAC106 warmtewisselaar voor een bepaald koelvermogen onder overigens gelijke omstandigheden minder lucht hoeft te verplaatsen is de OPAC106 warmtewisselaar stiller dan de FiWiHEX warmtewisselaar. Dit effect is echter niet getalsmatig (door middel van een decibelmeter) vasgelegd.

In de laatste fase van de simultaanproef is ook nog kwalitatief gekeken naar de waterzijdige doorstroomweerstand. Het bleek dat de waterzijdige weerstand van de OPAC106 warmtewisselaar duidelijke kleiner was dan die van de FiWiHEX warmtewisselaar. Het elektriciteitsverbruik voor het rondpompen van water zal bij gebruik van een OPAC106 warmtewisselaar dus kleiner zijn dan bij gebruik van een FiWiHEX warmtewisselaar. Het verschil zal qua ordegrootte zo'n 10% zijn en betekent in absolute zin qua ordegrootte 1 kWh per m² kas per jaar.

5.2 Vergelijking tussen OPAC106 en de koelers in de SunergieKas

De SunergieKas is een gesloten kas op het Innovatie en DemoCentrum in Bleiswijk waaraan gedurende anderhalf jaar intensief gemeten is. In deze kas zijn 6 koelers opgehangen die een vergelijkbare hoeveelheid lucht verplaatsen als de maximale luchtverplaatsing door de OPAC106 warmtewisselaar. Een foto van twee van deze koelers is afgebeeld in Figuur 15.



Figuur 15. Foto van twee van de zes koelers in de SunergieKas. De linker koeler toont de blaas-zijde en de rechterkoeler toont het warmtewisselaar oppervlak aan de zuigzijde. De koelers hangen op 6.5 meter hoogte.

Aan de hand van de metingen aan de koelers in de SunergieKas is het warmtewisselaar simulatiemodel ook voor deze koeler geparameteriseerd zodat de prestatie langs geüniformeerde weg kan worden vergeleken. Er is gekeken naar twee waterdebieten, maar omdat de koelers in de SunergieKas slechts op één luchtdebiet werken is het luchtdebiet in beide gevallen 3000 m³/uur.

Tabel 1. Met het simulatiemodel berekende prestaties van de OPAC106 warmtewisselaar in vergelijking met de prestatie van de koeler die in de SunergieKas wordt gebruikt. In alle gevallen is de kasluchttemperatuur op 28 °C 85% RV gesteld en is de aanvoerwatertemperatuur 10 °C. Het luchtdebiet is in alle gevallen 3000 m³/uur.

	waterdebiet	Koelvermogen	Elektr. ventilator	COP
OPAC106	1.9 m ³ /uur	19.9 kW	280 W	70
SunergieKas		20.5 kW	450 W	45
OPAC106	0.8 m ³ /uur	12.8 kW	280 W	46
SunergieKas		13.1 kW	450 W	29

Op grond van bovenstaande tabel kan geconcludeerd worden dat de koelers in de SunergieKas een wat grotere warmte-overdracht hebben, maar een lagere efficiëntie in termen van de hoeveelheid elektriciteit per eenheid koeling. Bij lagere belasting wordt het verschil tussen de efficiëntie van de OPAC106 in vergelijking met de SunergieKas koeler nog veel groter omdat de ventilator van de Suneriekas-koeler niet kan worden afgetoerd (het is een aan/uit ventilator). In de praktijk zal de OPAC106 warmtewisselaar bij een lagere vermogensvraag daarom naast het terugschroeven van het waterdebiet vooral ook het ventilatordebiet verlagen. Het simulatiemodel laat zien dat wanneer de OPAC106 warmtewisselaar, net als de Suneriekas koeler, 13.1 kW koelvermogen zou moeten leveren dit gerealiseerd zou kunnen worden met bijvoorbeeld 1 m³ koelwater per uur en een ventilatordebiet van 2100 m³/uur. Deze gebruikt dan slechts 115 W zodat de COP dan op 130 zou uitkomen.

6 Conclusies

Bij hoge belasting in een warme en vochtige kasomgeving (28 °C en 85% RV) realiseert de OPAC106 warmtewisselaar bij een koelwatertemperatuur van 10 °C en een waterdebiet van 1.8 m³/uur een koelvermogen van 20 kW per unit. Dit geldt bij een luchtcirculatie-debiet van 3000 m³ per uur, waarvoor de ventilator 280 W elektrisch vermogen gebruikt. De koeler werkt dan bij een COP van 70, wat betekent dat er 70 keer zoveel koelvermogen wordt geleverd als dat de ventilator aan elektriciteit verbruikt.

De genoemde 3000 m³ per uur is nog niet het maximale luchtdebiet. De ventilator kan maximaal bijna 3600 m³ per uur door de warmtewisselaar trekken, maar het koelvermogen neemt dan met slechts 10% toe terwijl het elektriciteitsverbruik dan bijna verdubbelt.

Uiteraard neemt het koelvermogen toe wanneer de koelwatertemperatuur lager wordt gekozen of de kaslucht nog warmer of nog vochtiger is. Andersom neemt het koelvermogen af bij minder koud koelwater en lagere kasluchttemperaturen en luchtvochtigheden. Vanwege de gevoeligheid van de prestaties ten opzichte van de werkingscondities is er een simulatiemodel ontwikkeld dat de prestatie onder willekeurige omstandigheden berekent. Met dit model kan ook de prestatie van de warmtewisselaar in de verwarmingsmodus worden bepaald.

Bij vergelijking van de OPAC106 warmtewisselaar met een aantal andere warmtewisselaars die als min of meer vergelijkbaar alternatief kunnen worden beschouwd (een vergelijkbare inbouwmaat én een qua orde-grootte vergelijkbaar koelvermogen) blijkt de OPAC106 warmtewisselaar beter te presteren dan de getoonde alternatieven. Vooral qua warmte-overdracht per eenheid toegevoerde elektrische energie presteert de OPAC106 beter.

Aangezien de OPAC106 warmtewisselaar in de koel-modus meer warmte-overdracht realiseert (ook in situaties zonder condensatie) kan gesteld worden dat de warmte-overdracht in de verwarmingsmodus eveneens groter zal zijn.

Met het gegeven dat het elektriciteitsverbruik van ventilatoren in semi-gesloten kassen zo'n 15 kWh per m² bedraagt (meetgegevens uit de SunergieKas¹) kan worden berekend dat het gevolg van de verbeterde overdracht een elektriciteitsbesparing van 5 kWh per m² per jaar oplevert. Wordt de warmtewisselaar ook bij de verwarming gebruikt dan bespaart de OPAC106 warmtewisselaar zo'n 3 kWh per m² per jaar tijdens het gebruik voor de verwarming. De besparing is wat kleiner omdat de gemiddelde belasting van de warmtewisselaar tijdens verwarmen kleiner is dan tijdens koeling en ook omdat het gemiddelde temperatuurverschil tussen water en lucht bij verwarmen meestal groter is.

¹ Zwart, H.F. de, 2010, De performance van de drie demo-kassen op het Innovatie en Demo Centrum (*in voorbereiding*)