

TEKNIKER FÖR AVKYLNING OCH AVFUKTNING I VÄXTHUS

Del 1 av 4. Rapportserie från projektet AKTIV

Mats Borg & Johan Westö





TEKNIKER FÖR KYLNING OCH AVFUKTNING AV VÄXTHUS

DEL 1 AV 4. RAPPORTSERIE FRÅN PROJEKTET AKTIV

Mats Borg & Johan Westö

2013-12-13



Närings-, trafik- och
miljöcentralen



Europeiska jordbruksfonden för
landsbygdsutveckling:
Europa investerar i landsbygdsområden

FINANSIERING

Projektet ”Avfuktning- och kylteknik för växthus” (AKTIV) har finansierats av NTM-centralen med medel från Europeiska jordbruksfonden för landsbygdsutveckling. Övriga finansiärer är Österbottens svenska producentförbund, Närpes trädgårdsproducenter samt Stiftelsen Svenska Småbruk och Egna Hems undervisningsfond.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
2	ALLMÄNT OM KYLNING OCH AVFUKTNING I VÄXTHUS	2
3	OLIKA TEKNIKER FÖR KYLNING OCH AVFUKTNING	4
3.1	ALLMÄNT OM KYL- OCH AVFUKTNINGSTEKNIK	4
3.2	NATURLIG VENTILATION.....	4
3.3	MEKANISK VENTILATION	5
3.3.1	CLIMATE OPTIMIZER (PRIVA).....	6
3.3.2	AIR & ENERGY SYSTEM (AMMERLAAN).....	7
3.4	KYLAVFUKTNING MED VÄRMEPUMP	8
3.5	KYLAVFUKTNING MED FRI KYLA	9
3.6	KYLAVFUKTNING MED NOVARBOS VATTENBASERADE SYSTEM.....	10
3.7	SORPTIONSAVFUKTNING	11
3.8	AVFUKTNING MED HYGROSKOPISK VÄTSKA.....	12
3.9	TIDIGARE STUDIER AV OLIKA TEKNIKER.....	14
4	LITTERATURFÖRTECKNING	16

1 INLEDNING

Projektets målsättning har varit att kartlägga alternativa lösningar för kylning och avfuktning av växthus, ta fram data för kyl- och avfuktningens behovet i ett växthus, beräkna de energimässiga konsekvenserna av alternativa lösningar och göra en ekonomisk bedömning av den totala lönsamheten för de alternativa lösningarna. För att få underlag för en sådan analys inhyrdes och användes en kyl- och avfuktningssystem i ett växthus i Övermark under två års tid. Under denna tid gjordes mätningar kring denna anläggnings funktion och mer generellt av de centrala storheterna som behövs för att analysera växthusklimat och energiflöden. Den inhyrda anläggningen levererades av Novarbo (www.novarbo.fi).

Projektet var ursprungligen tänkt som ett samarbete mellan Yrkeshögskolan Novia och Martens trädgårdsstiftelse. Martens trädgårdsstiftelse skulle ansvara för biologisk uppföljning och analys medan Novia hade huvudansvar för projektet inkluderande ansvar för styrning av kyl/avfuktningssystemet, datainsamling samt energimässig och ekonomisk analys. Under projektets gång försattes Martensträdgårdsstiftelse i konkurs, varför den biologiska uppföljningen och analysen endast delvis förverkligats. Också i övrigt innebär detta en betydande förlust för genomförandet av projektet eftersom tillgången till odlingsteknisk sakkunskap försvann.

Resultatet av projektet redovisas i serie bestående av fyra rapporter, vilka kommer att publiceras i Novias publikationsserie år 2015. I den första rapporten görs en översikt av tillgängliga metoder och tekniska lösningar för kylning och avfuktning. I den andra rapporten görs en utvärdering av den undersökta kyl- och avfuktningssystemet. I den tredje rapporten beskrivs modellering av växthus. I den fjärde rapporten görs en utvärdering av lönsamheten hos olika kyl- och avfuktningssystem.

2 ALLMÄNT OM KYLNING OCH AVFUKTNING I VÄXTHUS

I växthus eftersträvar man att hålla klimatfaktorerna temperatur, fuktighet och koldioxidhalt på en för grödan optimal nivå. En fjärde central faktor är solinstrålningen. Den kan inte styras och påverkar optimum för de övriga faktorerna. Belysning kan ersätta låg solinstrålning. De optimala värdena varierar enligt odlingsväxt. I detta projekt studeras främst de omständigheter som gäller för tomat, som är den viktigaste växthusväxten i Österbotten.

Den optimala temperaturen beror av instrålningen och koldioxidhalten sålunda att den optimala temperaturen är högre vid hög instrålning och vid hög koldioxidhalt (Heuvelink, 1996). Plantorna kräver även en viss dygnsperiodicitet, och man håller en lägre "nattemperatur" under den mörka perioden. Den eftersträlvade fuktighetsnivån är mer konstant. En för låg fuktighet ökar plantstressen och kan minska fotosyntesaktiviteten genom att klyvöppningarna stängs för att reducera transpirationen (Bakker m.fl. 1995). En för hög fuktighet ökar risken för svampsjukdomar och reducerar transpirationen och därmed näringsupptaget.

Det finns alltså ett behov av att samtidigt hålla både temperatur och fuktighet på en optimal nivå. I traditionella system sker fuktregleringen genom att ventilera bort överskottsfukt. För att vid behov öka fuktigheten finns i vissa växthus dimningsanläggningar, men vanligen är problemet snarare för hög än för låg fuktighet och i många växthus saknas utrustning för att höja fuktighetsnivån. Temperaturen ökas genom uppvärmning och sänks genom ventilation.

Under perioder med fuktöverskott och värmeunderskott i växthuset används ventilation för att sänka fuktigheten samtidigt med uppvärmning för att öka temperaturen. Denna situation är naturligtvis energimässigt ofördelaktig. Under perioder med fuktöverskott och värmeöverskott gör ventilationen dubbel nytta, den både sänker temperaturen och fuktigheten och det råder då ingen konflikt mellan målsättningarna för temperatur och fuktighet. Eftersom samma metod används för att reglera två variabler innebär det vanligen att man inte kan hålla båda variablerna på en optimal nivå. Även under perioder med värmeöverskott tillförs vanligtvis en viss värmeeffekt till värmerören på marknivå. Syftet är då att öka luftcirkulationen för att få en jämnare temperatur- och fuktprofil i vertikal riktning. Att tillföra värme under perioder med värmeöverskott i växthuset är naturligtvis ingen energimässigt optimal lösning.

Avfuktningsteknik och övergång till täckmaterial med lägre värmeförluster har ett samband. När man sänker värmegenomgångstalet, U-värdet, för täckmaterialet stiger innerytans temperatur. Det här innebär att kondensationen minskar eller helt upphör. Man kan då i stället vara tvungen att ventilera bort fukten. Det ökade ventilationsbehovet och den därmed förbundna energiförlusten åter alltså upp en del av vinningen med lägre värmegenomgångstal (Campen m.fl. 2003).

Även användningen av gardiner påverkar behovet av avfuktning. Gardinen försämrar luftflödet i växthuset och därmed minskar även kondensationen. Återigen äts då en del av energiinbesparingen upp av ett ökat avfuktningensbehov (Campen m.fl. 2009).

På liknande sätt har avfuktningsteknik också en koppling till övergång från HPS- till LED-belysning. I belysta odlingar är spillvärmens från HPS-lamporna så pass stor att det finns ett ventilationsbehov p.g.a. värmeöverskott under en stor del av den belysta säsongen. En övergång till LED-belysning minskar spillvärmens och det gör att växthuset har ett värmeunderskott under en större del av den belysta säsongen. Därmed ökar betydelsen av värmeeffektiv avfuktning.

Energiåtgången för avfuktningen kommer alltså att öka om täckmaterialets U-värde sänks, gardiner tas i bruk eller vid byten till LED-belysning. Lönsamheten för dessa metoder kan därför vara beroende av tillgången till en energieffektiv avfuktningssmetod. Behovet kan klargöras genom att redovisa hur stor andel energibehovet för avfuktning utgör av växthusets totala energibehov. De Zwart (1996) undersökte detta för olika täckmaterial vid tomatodling i holländskt klimat och kom till slutsatsen att avfuktningens andel av totala energibehovet varierade mellan 10 och 40 %. Värdet 10 % gällde ett referensväxthus med enkelglas medan 40 % motsvarade dubbelglas med dubbel ytbeläggning. Vid användning av gardiner och LED-belysning kan andelen troligtvis stiga ytterligare. Man kan anta att värdena är högre i Finland eftersom andelen av tiden då det föreligger värmeunderskott är större.

Ventilationen påverkar koldioxidbalansen i växthuset. Plantorna förbrukar koldioxid vid fotosyntes. Utan konstgjord koldioxidtillförsel är ventilation nödvändig för att få in koldioxid utifrån, annars sjunker koldioxidhalten i växthuset och fotosyntesen hämmas. Om koldioxid tillförs på konstgjord väg är situationen den motsatta. Man håller en koldioxidhalt i växthuset som överstiger den i uteluften och vid ventilation försvinner koldioxid, vilket ökar kostnaden för koldioxidtillförsel. Vid hög instrålning (eller kraftig belysning) är optimal koldioxidhalt ungefär 1000 ppm. Hög instrålning är samtidigt ofta förbunden med ett högt värmeöverskott och därmed ett högt ventilationsbehov. Det är då inte nödvändigtvis ekonomiskt försvarbart att upprätthålla optimal koldioxidnivå eftersom koldioxid i snabb takt försvinner via ventilationen. Ventilationen påverkar då temperatur och fuktighet positivt men koldioxidhalten negativt och konsekvensen är att man inte uppnår optimala odlingsomständigheter.

Ventilationen är också en riskfaktor vad gäller spridning av växtsjukdomar och skadeinsekter eftersom dessa enkelt kan ta sig in genom öppna ventilationsluckor. Det finns lösningar där ventilationsluckorna förses med nät för att hindra insekter att passera. Ett fullständigt slutet växthus är dock ett ännu säkrare alternativ.

Om man kan hitta ekonomiska gångbara alternativ för att reglera temperatur och fuktighet i växthus med andra metoder än ventilation finns det alltså potentiell vinning i form av

- 1) reducerad energiförbrukning
- 2) ökad skörd genom bättre växthusklimat
- 3) minskad risk för spridning av skadliga organismer

Investeringsmässigt är ventilation en väldigt billig temperatur- och fuktregleringsmetod. Den potentiella nyttan hos alternativa tekniska lösningar måste ekonomiskt kvantifieras och ställas i relation till investeringskostnaden.

I detta projekt har målsättningen varit att kartlägga alternativa lösningar, ta fram data för kyl- och avfuktningens behov i ett växthus, beräkna de energimässiga konsekvenserna av alternativa lösningar och göra en ekonomisk bedömning av den totala lönsamheten för de alternativa lösningarna. För att få underlag för en sådan analys inhyrdes och användes en kyl- och avfuktningssystemanläggning i ett växthus i Övermark under två års tid. Under denna tid gjordes mätningar kring denna anläggningens funktion och mer generellt av de centrala storheterna som behövs för att analysera växthusklimat och energiflöden. Den inhyrda anläggningen levererades av Novarbo (www.novarbo.fi).

3 OLIKA TEKNIKER FÖR KYLNING OCH AVFUKTNING

3.1 ALLMÄNT OM KYL- OCH AVFUKTNINGSTEKNIK

Temperaturen hos luften i ett växthus kan sänkas genom att

- 1) byta ut luften mot kallare luft
- 2) låta luften kylas mot en kall yta
- 3) evaporativ kylning, dvs. att låta vatten förångas genom att uppta värme från luften

En viss evaporativ kylning sker alltid i form av växternas transpiration. Avdunstningen inne i bladen kräver energi som tas från luften eller från solinstrålningen/belysningen. I det förra fallet är det fråga om en direkt kylning av luften, i det senare fallet hålls bladtemperaturen nere och minskar därmed den sensibla värmelasten på växthusluften, d.v.s. reducerar de evaporativt kylda bladens temperaturökande verkan på växthusluften jämfört med okyllda blad.

Den relativa fuktigheten (RF) hos luft kan enkelt ändras genom att värma eller kyla luften. Den önskade temperaturen är dock vanligen given och en förändring av den relativa fuktigheten kräver då att man ändrar den absoluta fuktigheten, dvs. mängden vattenånga per kg luft.

Det finns i grunden bara tre praktiskt genomförbara sätt att reducera den absoluta luftfuktigheten. Dessa tre metoder är att

- 1) byta ut luften mot torrare luft
- 2) kyla luften under daggpunkten så att en del av vattenångan övergår i vätskefas och därmed kan separeras
- 3) låta vattenånga absorberas av ett hygroskopiskt material.

Nedan presenteras några olika tekniska lösningar som alla baseras på ovan nämnda grundläggande metoder för kylning och avfuktning.

3.2 NATURLIG VENTILATION

Genom att öppna ventilationsluckor ersätts fuktig luft från växthuset med torrare och kallare luft utifrån. Ventilationsluckorna är ofta placerade längs takåsen/-åsarna, med en serie på vardera sidan av åsen. Vid lägre ventilationsbehov öppnas bara ena sidan, i första hand läsidan. Vid kraftigt ventilationsbehov öppnas båda sidorna. Både tilluft och frånluft passerar luckorna. Luftombytet drivs dels av densitetsskillnaden mellan kall, tung uteluft och varm, lätt inneluft, dels av vinden.

Under uppvärmningssäsongen innebär ventilationen en ökad värmeförbrukning eftersom utomhusluften måste värmas upp. Utöver den sensibla energiförlusten, relaterad till temperaturskillnaden mellan frånluft och tilluft, går också den latent energi som finns i vattenångan hos frånluften förlorad. Det advektiva värmeflödet från växthuset till omgivningen som ventilationen medför kan beräknas med ekvationen

$$3.1 \quad P = \dot{m}_{\text{luft}} (h_{\text{från}} - h_{\text{till}})$$

\dot{m}_{luft} luftens massflöde

$h_{\text{från}}$ frånluftens, dvs. inneluftens, entalpitet

h_{till} tilluftens, dvs. uteluftens, entalpitet

Entalpiteterna, vilka innefattar både latent och sensibelt värme, fås fram ur ett s.k. Mollier-diagram om man känner till temperaturerna och luftfuktigheterna.

Värmeåtgången för bortförande av ett kilogram vatten beror av temperaturerna och luftfuktigheterna inne respektive ute. Om uteluftens temperatur ligger mellan -5 och +5 grader och dess luftfuktighet mellan 50 och 100 % samt inneluften har en fuktighet om 70 till 90 %, kommer den specifika värmeåtgången att ligga inom intervallet 3,8–4,9 MJ/kg för 25-gradig inneluft och 5,0–7,8 MJ/kg för 15-gradig inneluft. Värdet minskar med temperaturen och relativa luftfuktigheten hos inneluften och ökar med relativa luftfuktigheten hos uteluften.

3.3 MEKANISK VENTILATION

Mekanisk ventilation innebär att luften tillförs/bortförs på ett kontrollerat sätt genom fläktar och rörsystem. Mekanisk ventilation har följande grundläggande fördelar jämfört med naturlig ventilation:

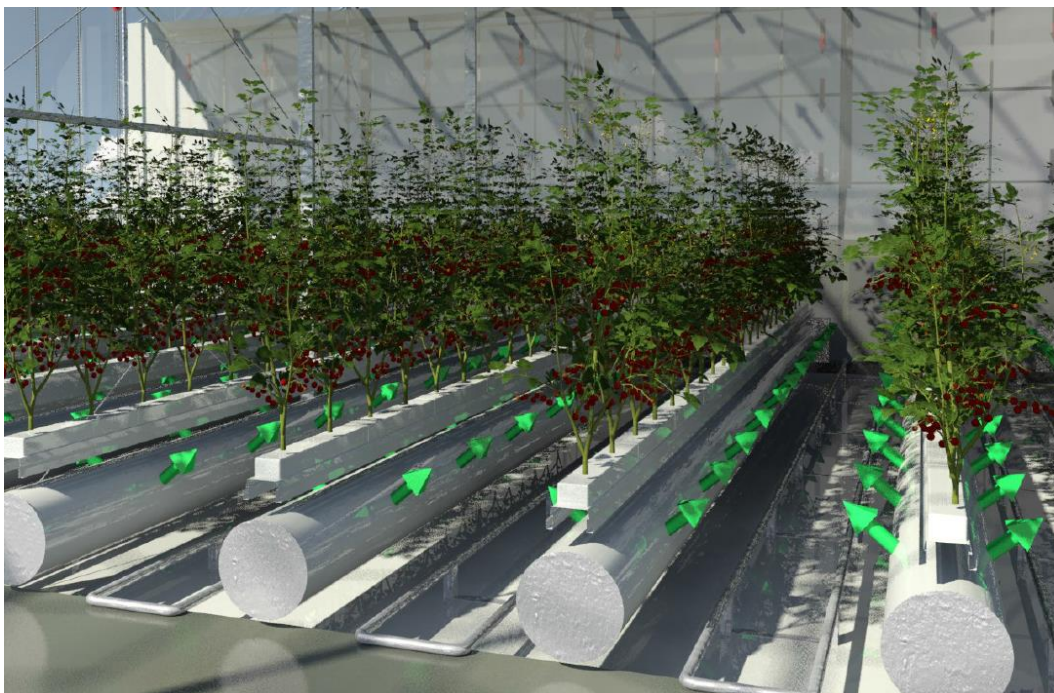
- 1) ett mer homogent klimat kan erhållas genom ökad luftcirkulation
- 2) tilluften kan förbehandlas, t ex uppvärmning för att undvika stora temperaturdifferenser i växthuset,
- 3) en värmeväxlare kan inkluderas för värmeåtervinning.

Utan värmeväxlare är värmeförlusten vid mekanisk ventilation samma som vid naturlig ventilation. Ändå kan mekanisk ventilation innebära en inbesparing av värme genom att man skapar luftcirkulation på mekanisk väg i stället för att skapa termiskt driven cirkulation genom tillförsel av värme via markrören. Denna värme från markrören skapar ofta ett värmeöverskott som måste ventileras bort och därmed en onödig värmeförlust. En annan potentiell värmeinbesparing är att man genom ökad luftcirkulation skapar ett homogent klimat. Man kan då hålla en högre genomsnittlig luftfuktighet utan att det uppstår fuktfläckor som utgör grogrund för sjukdomsalstring. Den högre genomsnittliga luftfuktigheten innebär lägre avfuktningensbehov och bättre avfuktningseffektivitet. Den högre luftcirkulationen kan emellertid också leda till högre konvektiva förluster genom höljet och påverka kondensationshastigheten vid takytan, beroende på omständigheterna antingen öka eller sänka den.

Med en värmeväxlare kan energiinnehållet i frånluften delvis överföras till tilluften. Av energin i frånluften kan högst en mängd som motsvarar den sensibla delen återvinnas. Denna utgör typiskt ungefär hälften av den totala bortventilerade energin. Den andra värmeenergikomponenten, dvs. vattenångans latent värme, är 2,4–2,5 MJ per kg vattenånga. Även i en ideal värmeväxlare blir energiförlusten alltså cirka 2,5 MJ per avlägsnat kg vattenånga. I praktiken torde högst 90 % av den sensibla energin kunna återvinnas. För motströmsvärmeväxlare för fastighetsventilation uppger tillverkarna temperaturverkningsgrader om 70–90 %.

Eftersom frånluften är mycket fuktig kommer kondensation att inträffa redan vid mycket måttlig värmeåtervinningsgrad vilket höjer temperaturdifferensen i värmeväxlaren och därmed värmeväxlarens effektivitet. Under kalla dagar kan kondensationen leda till igenfrysningsproblem om inte värmeväxlaren är konstruerad för att hantera detta.

Ett alternativ till fasta värmeväxlare är en roterande värmeväxlare, regenerator, där frånluften avger värme till rotormaterialet, som sedan avger värme till tilluften, vilken passerar samma rotor ett halvt varv senare. Regeneratoren motsvarar ungefär en motströmsvärmeväxlare och uppnår liksom denna höga verkningsgrad. Fördelen med den roterande värmeväxlaren är att den är kompakt genom att den värmeupptagande ytan per volym är stor. I avfuktningens användning har den dock den nackdelen att en del av fukten återförs till inkommande luft. Detta beror på att när fukten kondenseras rinner inte allt bort eller blåser ut, utan en del stannar kvar på rotormaterialet och förångas sedan i den inkommande luften. Denna återförda fukt ökar energiåtgången per bortfört kg vatten.



Figur 1 Mekanisk ventilation (Källa: Ammerlaan produktblad).

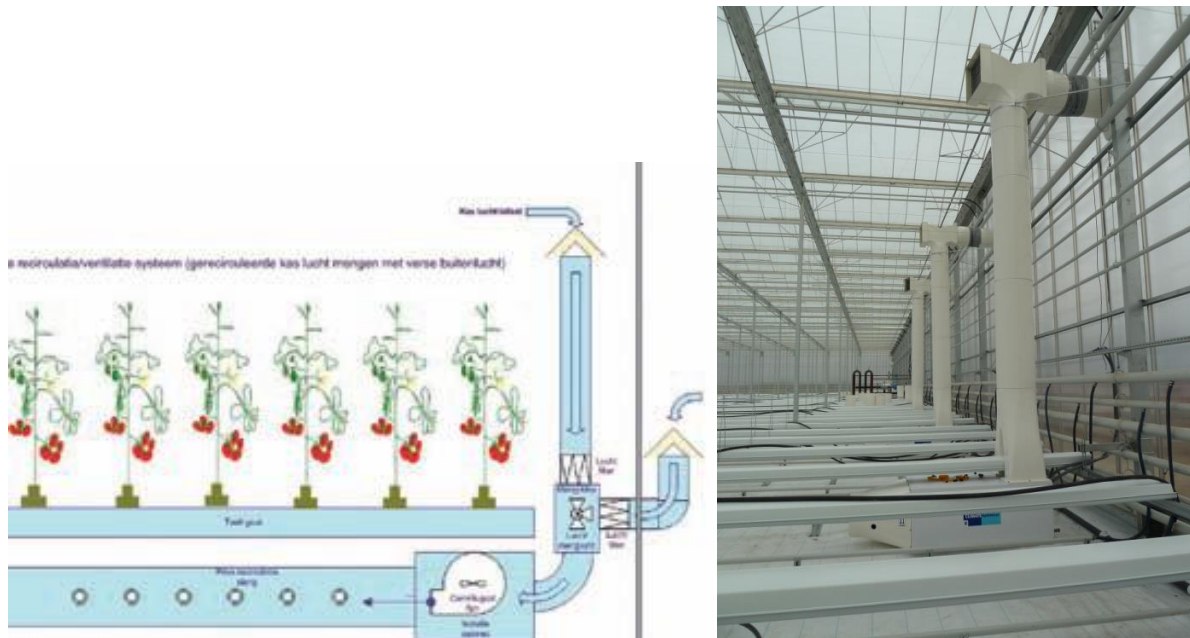
Den vanligaste lösningen på marknaden verkar vara radvisa anläggningar som ligger i väggen i ytterändan av plantraden och tar in luft utifrån och blåser ut den i ett perforerat plaströr under plantraden, se Figur 1. Exempel på produkter är Privas Climate optimizer, Ammerlaans Air & Energy System och Certhons SuprinAir växthus. En presentation av de två första följer nedan.

3.3.1 CLIMATE OPTIMIZER (PRIVA)

Privas Climate Optimizer består av moduler som installeras längs växthusväggen. En modul (2164 x 800 x 6240 mm) består av luftintag mot både utomhusluften och växthusets övre del samt en fläkt för att blåsa ut luft under växterna (Figur 2). Mellan intagen och fläkten sker en blandning av växthus- och utomhusluft samt eventuell uppvärmning. Uppvärmningen sköts genom att låta blandningen passera genom en värmeväxlare (vätska-luft) som anslutits till växthusets uppvärmningssystem. Enligt tillverkarens specifikation har modulen följande egenskaper

Kapacitet: 43,7 kW (uppvärmning)
 Max flöde: 6450 m³/h
 Max effekt: 3,3 kW (fläkt)

Typisk dimensionering är 10 m³/m², vilket motsvarar 5 W/m² fläkteffekt. Den verkliga förbrukningen ligger på 2–5 W/m².



Figur 2 Vänster: Principfigur för Priva Climate Optimizer. Höger: Installation av Priva Climate Optimizer i Priva Horticulture, De Lier, The Netherlands. Källor: http://www.priva.ca/media/2434/Climate_Optimizer_385260EN_092008.pdf, Wim Dekker, Priva.

Energiförbrukningen för systemet fås genom att beräkna hur mycket energi som går åt till att värma luftblandningen (baserat på önskad avfuktning, dvs. andelen inblandad kall torr luft) och addera till fläktens energiförbrukning. Eftersom systemet saknar värmeväxlare för värmeåtervinning är värmeförlusten per bortfört kg vatten i princip samma som vid naturlig ventilation. Systemet skall främst bekostas med inbesparade uppvärmningskostnader som grundar sig på att växthuset inte längre måste värmas lika kraftigt vid marknivå för att säkerställa avfuktning (luftcirkulation). Enligt tillverkaren skall t.ex. uppvärmningskostnaden vid tomatodling i holländska förhållanden kunna minska med 20 %. Ytterligare förväntas en större skörd då en bättre kontroll av den relativa fuktigheten förväntas ge upphov till mindre problem med svampangrepp, denna ökning är dock svår att kvantifiera.

Exklusive kostnader för montering, elinstallation och eventuella modifieringar av värmesystemet förväntas systemets investeringskostnad vara 20–25 €/m². Det här motsvaras av att moduler placeras med ca 6–8 m meters mellanrum i ett blockhus.

3.3.2 AIR & ENERGY SYSTEM (AMMERLAAN)

Ammerlaans Air & Energy system innebär att värmeväxlare för värmeåtervinning installeras längs ena gaveln. Vid avfuktning tas luft från växthuset översta skikt som sedan blåses ut genom värmeväxlaren för att värma inkommande luft. Tilluften blåses sedan ut genom rör under plantraderna (Figur 1). Verkningsgraden rapporteras av tillverkaren vara så pass hög att tilluften håller en temperatur som är endast en grad lägre än frånluften. Därmed elimineras i stort sett förlusterna av

sensibelt värme även om förluster på grund av latent värme kvarstår. Det direkta energibehovet för avfuktningen minimeras då till endast det som behövs för att driva fläktarna. När det råder värmeöverskott i växthuset kan värmeväxlingen frångöras så att luft fortsättningsvis tas in och distribueras genom rör under plantraderna, men frånluften avlägsnas via takluckorna. Systemet upprätthåller då ett litet övertryck i växthuset.

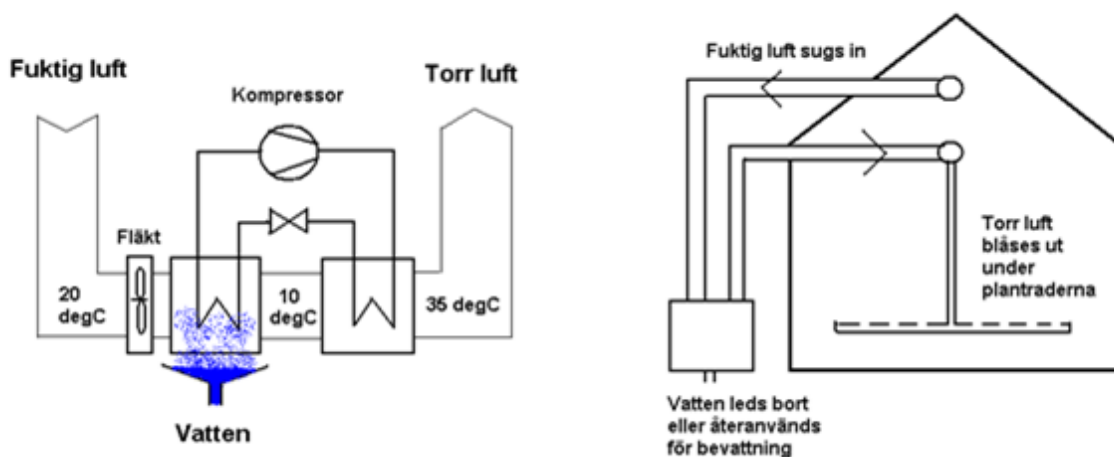
För reglering av relativa fuktigheten kan fläktarna anslutas till ett övergripande SCADA system som styr avfuktningen genom att reglera hastigheten på fläktarna. Systemet kan på så vis installeras i såväl nya som befintliga växthus. I och med att kondens uppstår i värmeväxlaren bör detta beaktas i kallare klimat där isbildning kan uppstå.

För tomat och gurka uppskattas systemet, enligt tillverkaren, kunna bidra med energiinbesparingar på uppemot 40 % och även en något bättre skörd. Installationskostnaden anges till 20–35 €/m² beroende på växthusets storlek, form och konstruktionslösningar.

3.4 KYLAVFUKTNING MED VÄRMEPUMP

Vid kylavfuktning passerar luften en kylande yta, som sänker lufttemperaturen under daggpunkten, varvid vatten kondenserar på ytan och rinner bort.

Vanligen skapas kylan för kylavfuktning med en värmepump av kompressortyp. Luften kyls ned genom kontakt med värmepumpens kalla sida, den s.k. förångaren, och kan sedan, vid behov, återuppvärmas genom kontakt med värmepumpens varma sida, den s.k. kondensorn (Figur 3). På detta sätt tas vattenångans latent värme till vara och återförs till luften. Den utgående luften är då torrare och varmare än den inkommande. Också den i kompressorer och fläktar använda elenergin omvandlas till värme i luften. I en mer avancerad version värmeväxlas luften före och efter förångaren för att reducera den värmemängd som behöver värmepumpas och därmed anläggningens elförbrukning.



Figur 3 Till vänster ett principdiagram över en enkel version av kompressorbaserad kylavfuktare med exempel på hur temperaturen hos luften kan förändras då den passerar avfuktaren. Till höger ett exempel på hur en anläggning kan installeras. Mindre aggregat kan också designas för placering inne i växthuset, t ex upphängda under taket.

En kylavfuktningssystem kan även konstrueras så att värmen från kondensorn inte återförs till inneluften utan i stället avges på utsidan. Då åstadkommer man en samtidig avfuktning och nedkylning av luften. Om anläggningen förses med dubbla värmeavgivande ytor, en på utsidan och en på insidan kan man när värmebehov föreligger återvinna värmen och vid värmeöverskott kyla luften.

Kommersiella kylavfuktare arbetar med kompressordrivna värmepumpar. I princip kunde man också använda en värmepump driven med värme, en absorptionsvärmepump. Med en absorptionsvärmepump kan man inte uppnå lika låga temperaturer hos köldmediet, varför det krävs större värmeväxlande ytor. Det här kan vara en betydande nackdel i växthussammanhang. Absorptionsvärmepumpar är också i allmänhet större enheter och inte lämpade för distribuerade lösningar.

Standardapparaterna på marknaden är avsedda för mindre avfuktningensbehov i storleksordningen 1–5 kg/h. Större anläggningar specialtillverkas. Specifika elförbrukningen (per kg avlägsnat vatten) är starkt beroende av temperatur och luftfuktighet. Ju högre temperatur och relativ fuktighet, desto mindre blir specifika energiåtgången. För 20 °C och 80 % relativ luftfuktighet kan 0,2–0,3 kWh/kg uppnås i större anläggningar medan små standardenheter förbrukar 0,5–0,7 kWh/kg.

DryGair serietillverkar en kylavfuktare avsedd för växthus. Apparaten är designad för att upprätthålla 18 °C och 80 % RF. Tillverkaren uppger ett luftvolymflöde om 20000 m³/h en avfuktningsskapacitet om 45 liter/h. En anläggning uppges räcka till för 1400 m². Effektförbrukningen är 10 kW el, vilket motsvarar 0,22 kWh/kg. Anläggningen utgör en fristående enhet som placeras inne i växthuset (Figur 4). Den har dimensionerna 2 m (L) x 1 m (B) x 2,5 m (H) och väger 600 kg.



Figur 4 DryGairs anläggning. Källa: www.drygair.com

3.5 KYLAVFUKTNING MED FRI KYLA

Finns en värmesänka med tillräckligt låg temperatur att tillgå, t.ex. uteluften, ett vattendrag, marken eller ett bergborrhål, kan man kyla inneluften genom att låta den få kontakt med denna värmesänka, antingen direkt eller genom att låta ett medium cirkulera mellan luft och värmesänka, t.ex. pumpa vatten via ett bergborrhål till en kondensor inne i växthuset.

En form av fri kylavfuktning sker automatiskt vid växthusets hölje om temperaturen hos höljet sjunker under dagpunkten, vilket är fallet under kalla årstider. Problemet är att det inte går att styra denna process eftersom höljets temperatur inte kan regleras enligt avfuktningensbehov. Ur fuktbalanssynpunkt är detta emellertid en viktig process.

Fri kyla kan också användas för att kyla växthuset. Det stora problemet är då sommartid tillgången till en värme-sänka med tillräckligt låg temperatur. Om den drivande temperaturskillnaden är låg krävs mycket stora värmeöverförande ytor.

Att transportera luften är mer energi- och utrymmeskrävande än att flytta värme med ett vätskeformigt medium, vanligen vatten, men har den fördelen att apparaturen kan förläggas utanför växthuset, där den inte skymmer instrålningen eller är i vägen. Man kan då också ha en enda stor anläggning, vilket ofta är mer kostnadseffektivt än flera mindre enheter.

Om man transporterar bort värmeenergin i vätskeform kan den kylande ytan placeras på olika ställen i växthuset. Vill man undvika behovet av fläktar för luftcirkulationen är en placering högt uppe att föredra. Den kylda luften sjunker då av sig självt nedåt. Problemet är att apparaturen lätt blir ett hinder för ljusinstrålningen, i synnerhet som den värmeväxlande apparaturen måste ha en stor effektiv yta om man förlitar sig på naturlig konvektion. Använder man fläktar för att driva luften förbi de kylande ytorna kan apparaten göras mer kompakt och placeringen är friare. Denna typ av kylning kan förverkligas som decentraliserade enheter, vilket ger möjlighet att sprida ut dem för att uppnå ett jämnt klimat.

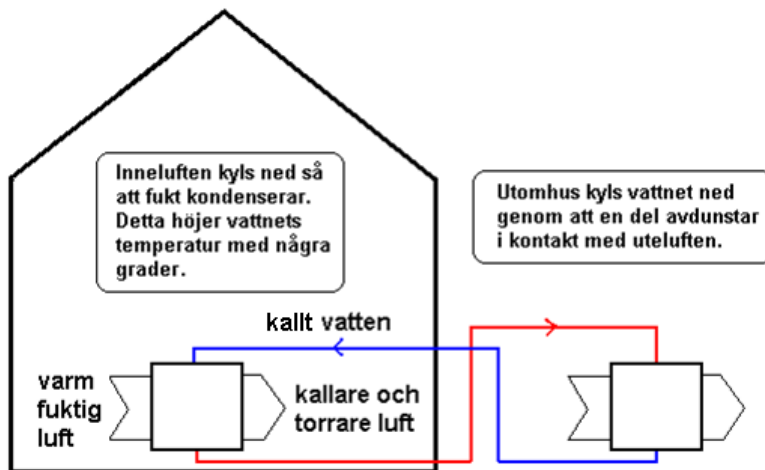
Med fri kylning reduceras elbehovet kraftigt jämfört med kompressorbaserad teknik. El behövs då bara för att cirkulera luften och/eller det kylande mediet, medan värmepumpens kompressor utgör den stora elförbrukaren i en värmepumpbaserad kylavfuktningssystem. Man kan dock inte tillgodogöra sig den värme som frigörs vid kondensationen och den främsta vinningen med en sådan anläggning är att avfuktningen sker slutet. Energiförlusten kan reduceras genom att på samma sätt som vid mekanisk ventilation använda en värmeväxlare för att återvinna sensibelt värme, men ångbildningsvärmets går alltid förlorat. Energimässigt kan värmeförlusten per avlägsnat kg vatten vara större eller mindre än vid naturlig ventilation.

3.6 KYLAVFUKTNING MED NOVARBOS VATTENBASERADE SYSTEM

Novarbos system är i princip en form av fri kylning. Den kalla ytan är i detta fall en vattendroppridå. Vattnet har en dubbelfunktion, det utgör både värmetransportmedium och kylande yta. När dropparna är kallare än luften sker en kylning. För att kondensation skall ske måste temperaturen hos vattendropparna ligga under daggpunkten för inomhusluften. Efter kylningen är luftens relativa fuktighet hög men absolut sett är luften, om kondensation inträffat, ändå torrare än den övriga växthusluften och när den värms upp på nytt sänker den växthuset relativa fuktighet. Novarbos system skiljer sig från andra typer av kylavfuktning däri att fukttransporten kan ske i båda riktningarna. Om vattnets temperatur ligger över daggpunkten avdunstar vatten från dropparna och tillför fukt till växthuset.

Funktionsprincipen är alltså samma som för andra system med kalla ytor. Fördelarna med denna lösning jämfört med att använda en värmeväxlande yta av fast material är att man

- 1) undviker den temperaturskillnad som behövs för att flytta värmets mellan den kylande vätskan och den fasta ytan,
- 2) man får en stor värmeöverförande area p.g.a. många små droppar,
- 3) den värmeöverförande ytan är transparent,
- 4) de fallande dropparna skapar en forcerad konvektion utan användning av fläktar.



Figur 5 Principen för Novarbos kyl/avfuktningssystem

Det vattenflöde, som dropparna utgör en del av, värms upp genom kontakten med inomhusluften. Vattnet cirkulerar så att det åter kyls ned genom kontakt med utomhusluften, även här i droppform.

Den temperatur som teoretiskt kan uppnås vid nedkylningen, är utomhusluftens våta temperatur.

Den våta temperaturen beror av den torra temperaturen och av luftens fuktighet. Ju torrare uteluften är, desto mer ligger våta temperaturen under torra temperaturen. Vid 100 % relativ fuktighet är våt temperatur och torr temperatur samma. Vid t ex 20 °C och 50 % relativ fuktighet är kylgränsen 13,7 °C. På denna punkt skiljer sig anläggningen från andra system för fri kylning, där den möjliga kyltemperaturen är värmesänkans normala torra temperatur.

Den drivande faktorn för energitransporten är skillnaden mellan växthusluftens våta temperatur och uteluftens våta temperatur. Om uteluften är tillräckligt torr är kylning i princip möjlig också under varma dagar, men eftersom den drivande temperaturskillnaden då är låg krävs en massiv vattencirkulation och därmed en hög elförbrukning för pumpning.

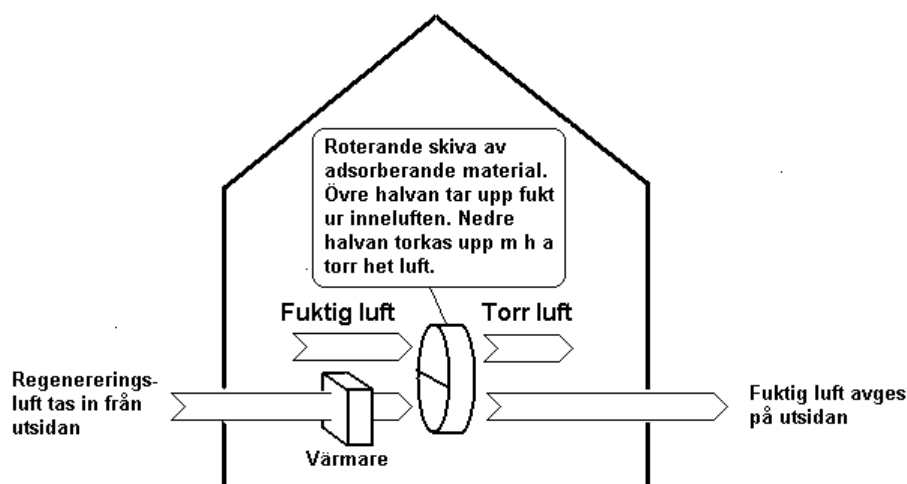
Den speciella formen av kontakt mellan luft och kylande yta gör att det är omöjligt att återvinna sensibelt värme med en värmeväxlare. Värmeförlusten per kg bortförd ånga beror på hur långt luften kyls ned, vilket i sin tur beror av vilken vattentemperatur som uppnås i uteenheten. Värmeförlusten kan vara både större och mindre än vid naturlig ventilation. Denna typ av avfuktning innebär alltså inte någon nämnvärd värmeinbesparing, snarare tvärtom, men ger däremot möjlighet att hålla växthuset slutet.

Eftersom vattnet upptar värme i samband med avfuktningen kunde man i princip, i stället för att kyla vattnet på utsidan, kyla vattnet med en värmepump och därigenom återvinna värmeenergin i sin helhet. Den återvunna värmeenergin måste då återföras till växthuset, t.ex. genom värmerör.

3.7 SORPTIONSAVFUKTNING

Sorptionsavfuktning innebär att ett fuktadsorberande fast material upptar fukt från inneluften. Materialet blir snabbt mättat med fukt och måste därför regenereras (torkas upp) genom att torr het luft (90–120 °C) passerar materialet och upptar fukten, som avlägsnas genom att den våta hetluften leds ut. Kommersiella produkter använder en roterande adsorbatorskiva. Eftersom processluften (inneluften)

återförs torrare och regenereringsluften kan tas utifrån och återbördas ut är sluten avfuktning möjlig.



Figur 6 Principen för sorptionsavfuktning

Sorptionsavfuktning är mest lämpad vid låga temperaturer och när hög lufttorrhet eftersträvas. Standardprodukter finns upp till 50 kg/h avfuktningsskapacitet och även större på beställning. Energiåtgången är cirka 1,1 kWh värme och 0,16 kWh el per kg vatten vid 20 °C och 80 % relativ fuktighet. El behövs främst för fläktar som blåser luftströmmarna genom apparaten. Energiåtgången är starkt beroende av luftfuktigheten och minskar med ökande luftfuktighet.

I basutförandet avges den varma fuktiga regenereringsluften utomhus, vilket innebär att dess värmeinnehåll går till spillo. Värmen kan delvis återanvändas och värmebehovet därmed minskas med 30–40 % genom att på regenereringssidan inkludera en värmeväxlare mellan inkommande och utgående regenereringsluft.

Värmen kan i sin helhet komma till nyttoanvändning om en luftkyld kondensator inkluderas i systemet. Den fuktiga luftens värmeinnehåll återförs då i sin helhet till växthuset, likaså den värme som genereras i fläktar m.m. Kondensorn gör emellertid systemet betydligt dyrare och temperaturen som behövs vid regenerering stiger till cirka 120 °C, vilket kräver trycksatt hetvatten.

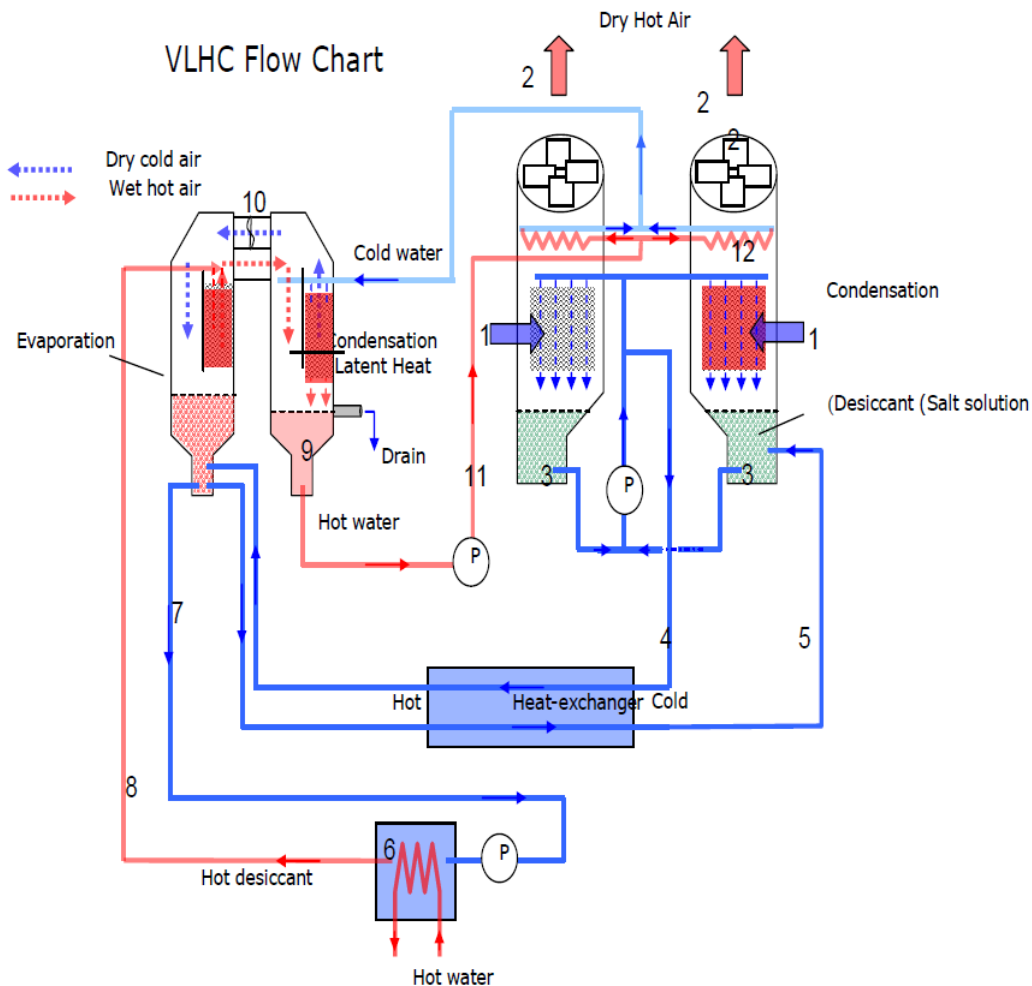
3.8 AVFUKTNING MED HYGROSKOPISK VÄTSKA

En process som till sin grundidé är samma som den ovan beskrivna sorptionsavfuktningen med fast adsorbator kan också göras med en hygroskopisk (fuktabsorberande) vätska. De vätskor som används är då olika saltlösningar. Kontakten mellan luft och vätska sker genom att vätskan sprinklas över luften som strömmar genom apparaten eller att luften får passera en vätskedränkt matris.

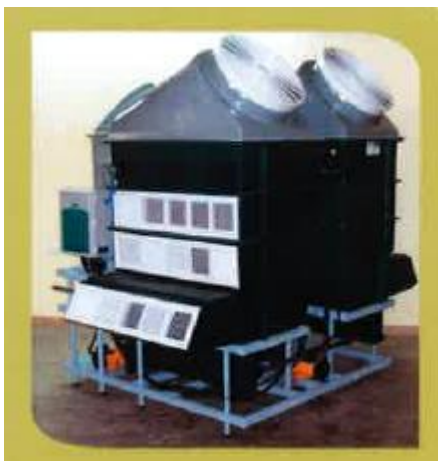
Jämfört med sorptionsavfuktning med fast adsorbator är en apparat med flytande adsorbator mer komplicerad. Det behövs fler pumpar och värmeväxlare. En väsentlig fördel är att den kan drivas med lägre temperaturer än en apparat med fast adsorbator. I växthussammanhang är det också av betydelse att de kemiska ämnen som används kan vara skadliga. Å andra sidan har en anläggning av denna typ också en desinficerande och filtrerande verkan.

En avfuktningssystem för växthusändamål har utvecklats av det israeliska företaget Agam. Anläggningen kallas Ventilated Latent Heat Converter (VLHC). Den har en litiumkloridsaltlösning som absorptionsmedium. Regenereringen drivs med 85-gradigt vatten och den vid regenereringen

avgivna ångan kondenserar i apparaten så att allt latent värme kan återvinnas (Figur 7). En enhet har en storlek om 2,3 m (L) x 2,1 m (B) x 1,6 m (H), väger 350 kg och uppges räcka till för 1000 m². För avfuktningsskapaciteten per enhet uppges cirka 20 kg/h och för effektförbrukningen 23 kW värme och 2,5 kW el. Värmebehovet är 4200–4700 kJ per kg avlägsnad fukt enligt (Longo & Gasparella, 2012). Beräkning utgående från tillverkarens uppgifter ger elförbrukningen 0,125 kWh/kg och värmeförbrukningen 4100 kJ/kg.



Figur 7 Principschema för Agams anläggning. I den övre högra delen sker avfuktning genom att fuktig luft från växthuset (1) passerar en matris dräkt med koncentrerad saltlösning (3). Denna lösning absorberar fukt från luften och värms samtidigt upp något. Den avfuktade luften värms sedan upp i värmeväxlare (12) och blåses ut i växthuset (2). I den övre vänstra delen regenereras saltlösningen, dvs. koncentrationen ökas. Detta sker genom att saltlösningen hettas upp (6) och den heta saltlösningen möter kall torr luft (10), som upptar vattenånga från saltlösningen. Det här sker i den vänstra halvan av regenereringsdelen. I den högra halvan torkas och kyls luften genom att den möter kallt vatten varvid vattenånga kondenseras. I denna process värms vattnet (9) och pumpas därför via värmeväxlaren (12) för kylning. Källa: (Amir)



Figur 8 Ventilated Latent Heat Converter Agam 1020. Källa: Agam produktbroschyr.

3.9 TIDIGARE STUDIER AV OLIKA TEKNIKER

Av de ovan beskrivna teknikerna är naturlig ventilation den absolut dominerande. Den utgör alltid referensteknik för studier om alternativa lösningar.

Campen (2009) gör en resumé av några tidigare studier av mekanisk ventilation med värmeåtervinning. I dessa har man uppnått 60–80 % återvinning av det sensibla värmets eller en tredjedel av entalpin. Mekanisk ventilation i kombination med värmeåtervinning har i både (Campen m.fl. 2003) och (Zhang & Guo, 2008) ansetts vara en metod med god potential. I en belgisk studie uppnådde man en energiinsparning på 12 % med en anläggning av denna typ (Bulck m.fl. 2013).

Campen (2009) har undersökt möjligheten att avfukta med kall yta utan användning av fläktar. I försöket användes flänsade rör som kylades med kallt vatten till en temperatur av 5 °C. Flänsarna hade en yttre diameter om 103 mm och fanns på ungefär 1 cm avstånd från varandra. Rören var placerade under takrännorna i ett blockhus. Man uppnådde vid 20 °C och 80 % RF en avfuktningkapacitet om 0,054 kg vatten per rörmeter. Värmeförlusten var cirka 7,5 MJ/kg.

En tidigare version av Novarbos system har undersökts i en finländsk studie (Särkkä m.fl. 2006). Undersökningen gjordes under 14 veckor juni–september 2005 i ett 130 m² stort växthus med kylanläggning och ett referenshus utan kylanläggning. Odlingsväxten var gurka. I det kylda växthuset lyckades man hålla takluckorna stängda och temperaturen under 30 °C så länge globalinstrålningen låg under 600 W/m² och utetemperaturer under 25 °C. I det kylda växthuset var temperaturen ungefär en grad lägre än i referensen, ångtrycksdifferensen lägre, dvs. luftfuktigheten högre, p.g.a. andra klimatinställningar och CO₂-halten högre (910 ppm i det kylda mot 565 ppm i referensen). I det kylda växthuset uppmätte man en 24 % högre skörd. Det genomsnittliga COP-värdet för kylningen var 11.

I en icke-publicerad rapport av Ronny Amir vid Israeliska jordbruksministeriet återges resultat av ett försök med Agams anläggning. Försöket gjordes februari–mars 2010 i ett israeliskt plastväxthus med energigardin och blommor som odlingsväxt. Växthuset uppvärmdes slumpmässigt endera med Agams anläggning eller rörvärme. Energiinsparningen med avfuktningssystemet var i genomsnitt 40 % samtidigt som den genomsnittliga fukthalten var 10 % lägre. Den avfuktade vätskemängden var 110–120 liter per natt. Antalet nätter i försöket var totalt nio, fyra med anläggningen igång och 5 utan anläggning. Detta är för lite för att vara statistiskt tillförlitligt och man kan inte dra säkra slutsatser på basen av detta försök.

I ett italienskt försök (Longo & Gasparella, 2012) användes Agams avfuktningssystem i ett växthus medan man använde konventionell fuktreglering i ett referensväxthus. Vartdera växthuset var 1500 m² och man odlade blommor. Försöket utfördes under 2,5 månader oktober till december i Bergamo i norra Italien. Växthuset med avfuktningssystem förbrukade 9 % mindre energi och höll en jämnare luftfuktighet än referensväxthuset. I växthuset med avfuktningssystem hade man också mindre problem med *Botrytis* (gråmögel) än i referensväxthuset.

(Arbel m.fl. 2011) undersökte energiinsparingen som DrygAirs produkt kunde ge upphov till. Undersökningen gjordes i Israel i ett 1100 m² växthus med paprika. Anläggningen användes endast nattetid. Den uppmätta avfuktningmängden uppgick till 25–40 liter/h. Temperatur och fuktighet mättes i tolv punkter och man uppnådde god homogenitet hos dessa variabler. Luftfuktigheten låg kring 70–80 %. Med en kombination av energigardin och avfuktningssystem uppskattades energiinsparingen nattetid till 80 %, varav anläggningen står för ungefär hälften. Uppskattningen grundar sig på beräknade U-värden för växthusskalet under natten med och utan användning av anläggningen, varvid U-värdet beräknats som medelenergiförbrukningen dividerat med odlingsarean och medeltemperaturskillnaden till utomhusluften.

4 LITTERATURFÖRTECKNING

- Amir, R. (2010-2011). *Tracking energy saving and Greenhouse climate while using Agam's VLHC system*. Opublicerad rapport. Hämtat från http://site204454.webydo.com/Test_reports.html?v=7760212223 den 30 3 2015
- Arbel, A., Barak, M., Shklyar, A., Lidor, G., & Elad, Y. (2011). Performance of Combined HEating and Dehumidification System for Greenhouses. *GreenSys2011* (ss. 449-456). ISHS.
- Bakker, J., Bot, G., Challa, H., & Van de Braak, N. (1995). *Greenhouse Climate Control - an integrated approach*. Wageningen: Wageningen Academic Publisher.
- Bulck, N. V., Coomas, M., Wittemans, L., Hanssens, J., & Steppe, K. (2013). Monitoring and energetic performance analysis of an innovative ventilation concept in a Belgian greenhouse. 57.
- Campen, J. B. (2009). *Dehumidification of Greenhouses (PhD Thesis)*. Wageningen, NL: Wageningen University.
- Campen, J., Bot, G., & Zwart, H. (2003). Dehumidification of Greenhouses at Northern Latitudes. *Biosystems Engineering*, 487–493.
- Campen, J., Kempkes, F., & Bot, G. (2009). Mechanically controlled moisture removal from greenhouses. *Biosystems Engineering*, 424–432.
- de Zwart, H. (1996). *Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model (PhD thesis)*. Wageningen: de Zwart.
- Heuvelink, E. (1996). *Tomato growth and yield (Ph.D. thesis)*. Wageningen Agricultural University.
- Longo, G. A., & Gasparella, A. (2012). Comparative experimental analysis and modelling of a flower greenhouse equipped with a desiccant system. *Applied Thermal Engineering* 47, 54–62.
- Särkkä, L. E., Hovi-Pekkanen, T., Kaukoranta, T., Tahvonen, R., & Huttunen, J. (2006). Greenhouse Cooling in Summer in Finland – Preliminary Results of Climate Control and Plant Response. *Proc. IS on Greenhouse Cooling*. Acta Hort. 719, ISHS.
- Zhang, X., & Guo, H. (2008). Review of Dehumidification Technologies in Greenhouses. *CSBE/SCGAB 2008 Annual Conference*. The Canadian Society for Bioengineering.

YRKESHÖGSKOLAN
NOVIA

Novia är den största svenskspråkiga yrkeshögskolan i Finland med examensinriktad ungdoms- och vuxenutbildning, utbildning som leder till högre yrkeshögskoleexamen samt fortbildning och specialiseringsutbildning. Nova har ca 4000 studerande på sex campus i Vas, Jakobstad, Raseborg och Åbo.

Yrkeshögskolan Nova är en internationell yrkeshögskola, via samarbetsavtal utomlands och internationalisering på hemmaplan. Novias styrka ligger i närvaron och nätverket i hela Svenskfinland.

Novia representerar med sitt breda utbildningsutbud de flesta samhällssektorer. Det är få organisationer som kan uppvisa en sådan kompetensmässig och geografisk täckning. Högklassiga och moderna utbildningsprogram ger studerande en bra plattform för sina framtida yrkeskarriärer.

YRKESHÖGSKOLAN NOVIA

Wolffskavägen 33, vån 4, 65200 Vas
Växel tfn (06) 328 5000
Fax (06) 328 5110
www.novia.fi

ANSÖKNINGSBYRÅN

Wolffskavägen 33, 65200 Vas
Tfn (06) 328 5555
Fax (06) 328 5117
ansokningsbyran@novia.fi

Yrkeshögskolan Nova upprätthåller en publikations- och produktionsserie för att sprida information och kunskap om verksamheten såväl regionalt, nationellt som internationellt. Publikations- och produktionsserien är indelad i fem kategorier:

R - Rapporter • P - Produktioner • A - Artiklar • L - Läromedel • S - Studerandes arbete

Läs våra senaste publikationer på www.novia.fi/FoU/publikation-och-produktion