

Onderzoeksrapportage

Duurzaam Koelen

EOS Renewable Cooling

dr.ir. Jan Broeze
met input van ir. Sietze van der Sluis en ir. Edo Wissink (TNO)

juni 2010

rapport nr. 1122

Colofon

Titel	Onderzoeksrapportage Duurzaam Koelen EOS Renewable Cooling
Auteur(s)	dr.ir. J. Broeze
AFSG nummer	1122
ISBN-nummer	978-90-8585-569-0
Publicatiedatum	juni 2010
Vertrouwelijk	nee
OPD-code	05/338
Goedgekeurd door	Huug de Vries

Wageningen UR Food & Biobased Research
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 480 084
E-mail: info.afsg@wur.nl
Internet: www.afsg.wur.nl

© Wageningen UR Food & Biobased Research

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, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

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 permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for inaccuracies in this report.



Het kwaliteitsmanagementsysteem van Food & Biobased Research is gecertificeerd door SGS International Certification Services EESV op basis van ISO 9001:2000.

Abstract

For reducing energy use for cooling, alternative methods (that do not rely on electricity) are needed.

Renewable cooling is based on naturally available resources such as evaporative cooling, free cooling, phase change materials, ground subcooling, solar cooling, wind cooling, night radiation & storage. The project was aimed to create innovative combinations of these renewable cooling technologies and sophisticated control systems, to design renewable climate systems for various applications, amongst which a cold store for agro produce and air conditioning for utilities.

This project was aimed at the introduction of these concepts for 2015 and beyond, satisfying the following requirements:

- suitability for the application in industry and the built environment
- sustainability: savings of external energy input over 30% compared to current state-of-the-art
- reliability: chance of out-of-specs not larger than for current systems
- cost-effectiveness (based on life-cycle costs lower than for current systems)

'Renewable cooling principles' were combined with innovative 'optimal control strategies'. In that approach weather forecasts are utilised to anticipate to dynamic environmental conditions. This largely contribute to the energy saving potential of renewable cooling since (1) the potential of renewable largely depends on the actual and anticipated weather conditions, and (2) through buffering adequate amounts of cold the use of electrical energy for cooling can be reduced to a minimum.

The research has learned that (a) renewable cooling technologies can play a large role in reducing energy use for higher temperature applications (comfort cooling and cooling of data centers). For industrial cooling advanced control of electricity-driven cooling is most promising.

Inhoudsopgave

Abstract	3
1 Inleiding	7
2 Methoden	9
3 Resultaten	11
4 Discussie en conclusies	13
Literatuur	15
Samenvatting	16
Bijlage A: Factsheets Renewable Cooling principes	17
Bijlage B: Alternatieve benaderingen voor verduurzaming van koeling	31
Bijlage C: Duurzaam koelen voor verschillende toepassingen	39

1 Inleiding

In Nederland wordt jaarlijks 28PJ energie verbruikt voor koeling; daarvan wordt 12PJ gebruikt voor agro-food en 16PJ voor industriële toepassingen. De koelingsbehoefte voor gebouwen, voedselketens en ICT nemen sterk toe.

Koeling in voedselketens is van wezenlijk belang voor onze maatschappij omwille van (a) veilig voedsel, (b) de toenemende behoefte aan vers en gemaksvlees (en dus vaak gekoeld), en (c) omwille van de logistieke positie van Nederland (import via havens, afzet in het achterland waaronder Duitsland).

Historisch verbetert het energetisch rendement van koelen en vriezen met 1 à 2% per jaar.

In het kader van de Kyoto afspraken heeft het Nederlandse Ministerie van Economische Zaken het programma *Schoon en Zuinig* geformuleerd met de volgende ambities:

- o 2% energiebesparing per jaar;
- o 30% reductie van broeikasgassen ten opzichte van 1990;
- o 20% duurzame energie.

Autonome ontwikkelingen in de sector zijn onvoldoende om deze doelen te bereiken. Daarom is het onderhavige onderzoeksproject gericht op de vraag welke alternatieve koelmethoden (die geen of substantieel minder gebruik maken van fossiele energie) wereldwijd beschikbaar zijn en betekenis deze kunnen hebben in de Nederlandse situaties (uitgaande van de specifieke klimaatcondities en belangrijkste toepassingvelden).

De duurzame koelmethoden zoals hier beoogd zijn bekend onder de benaming *Renewable Cooling*. *Renewable Cooling* technieken maken gebruik van ‘natuurlijke processen’; daarbij wordt gebruik gemaakt van o.a. verdampingskoeling, bodemkoeling, zon, wind en koudebuffering.

Het onderzoeksproject EOS Renewable Cooling was een samenwerking tussen Food & Biobased Research (voorheen Agrotechnology & Food Innovations) van Wageningen UR en TNO Bouw en Ondergrond. NVKL heeft als klankbord gefunctioneerd.

Dit rapport geeft een beeld van de onderzoeksopzet en vat de belangrijkste resultaten samen.

2 Methoden

De kern van het onderzoek bestond uit:

- Kennisimport.

Economische ontwikkelingen hebben ertoe geleid dat het aandeel van Nederlandse bouwers van koeltechnische equipment de afgelopen decennia sterk is afgenomen. De meeste koeltechnische systemen worden gebouwd op basis van geïmporteerde componenten. Deze ontwikkeling heeft ook zijn weerslag op innovaties: duurzame koelmethode worden vooral in het buitenland verder ontwikkeld. Kennisimport is noodzakelijk om deze beschikbaar te maken voor de koelsector in Nederland.

- Uitwerken van potentie van methoden voor de Nederlandse context.

Duurzame innovaties vergen in de regel aanzienlijke investeringen die pas op de langere termijn door (energie)besparingen terugverdiend kunnen worden. Dat geldt ook voor duurzame koelmethode. Het overtuigen van potentiële gebruikers vergt een goede onderbouwing van de mogelijkheden. Daartoe zijn verschillende rekenmethodieken ontwikkeld.

- Kennisdisseminatie.

Ook omwille van het oppakken van de ideeën door de doelgroep is veel aandacht besteed aan kennisdisseminatie (vooral in de vorm van toelichting op diverse bijeenkomsten). Kennisdisseminatie wordt verder ondersteund door de vorming van een internetsite www.koudecentraal.nl waarin kennis rondom koelen (en mogelijkheden van duurzame koeling) wordt ontsloten voor de sector.

3 Resultaten

Op basis van eigen kennisontwikkeling en geïmporteerde kennis zijn de volgende producten verzameld en ontwikkeld:

- Van een aantal technieken (zoals nachtstraling) zijn de haalbare koeltemperaturen en koelvermogen voor verschillende weerscondities gemeten.
- Er is een kennisbasis opgezet met beschrijvingen (en performance karakteristieken) van verschillende duurzame koelmethode. Daaraan gekoppeld zijn rekenmodellen die de performance van de systemen geven uitgaande van omgevingscondities en vereiste koelcondities van de toepassingen.
- In overleg met verschillende bedrijven is de haalbaarheid van duurzame koeling en de mogelijkheden om geïnspireerd op de methodieken met gangbare koelsystemen energie te besparen uitgewerkt.
- Voor verschillende toepassingsgebieden is een samenvatting van de meest voor de hand liggende duurzame koelmethode alsmede de technische economische haalbaarheid samengevat in factsheets. Deze zijn op verschillende workshops uitgedeeld en vormen een basis voor recente en geplande publicaties. Een aantal van deze sheets is hierna weergegeven.

Resultaten zijn samengevat in Bijlages A, B en C.

4 Discussie en conclusies

In het onderzoek is gebleken dat wereldwijd verschillende duurzame koelmethoden worden ontwikkeld, veelal op basis van oude principes. Zo werd in het verre verleden in ons land gekoeld door gebruik van ijsbuffers die 's-winters werden aangelegd.

Voor de korte termijn ligt gebruik van duurzame koelmethoden voor hogere temperatuurbereiken (zoals comfort klimatisering en datacenters) het meest voor de hand. Mits erg strakke eisen ten aanzien van de temperatuur worden losgelaten (zoals de eis dat zelfs op de warmste dag koeling tot 22°C vereist is) zijn duurzame koelmethoden (met name vrije koeling en verdampingskoeling) concurrerend ten opzichte van gangbare elektrisch aangedreven koeling. De bijbehorende potentiële energiebesparing is zeer groot.

Vooraf in warme landen wordt in toenemende mate daarvoor al veel gebruik gemaakt van zongedreven absorptiekoeling. Deze techniek is iets minder concurrerend in Nederland vanwege de geringere zoninstraling.

Gebruik van duurzame koeltechnieken voor koeltechniek voor industriële (voedings-) toepassingen is minder verbreid. In koude gebieden wordt allicht wel gebruik gemaakt van de koude omgeving (vrije koeling), maar bij hogere temperaturen wordt gebruik gemaakt van aanvullende koeling met behulp van elektrisch aangedreven koeling.

In warme regio's zijn de duurzame koelsystemen voor koeltechnische toepassingen experimentele systemen (dus nog niet concurrerend). Pas na fors hogere energieprijzen (meer dan verdubbeling ten opzichte van de prijzen in 2009) wordt alternatieve technieken concurrerend.

Voor de korte termijn zijn de meeste perspectieven te verwachten van het optimaal inrichten en duurzaam aansturen van koelsystemen. Met *Optimal Control* technieken kan bijvoorbeeld geanticipeerd worden op weersverwachtingen; daardoor zijn nog aanzienlijke besparingen mogelijk (zie ook laatste factsheet in Bijlage B).

Literatuur

- Bot, G. & J. Wildschut (2008): *Deskstudy koeling met minimaal energiegebruik bij bewaring van bloembollenplantgoed*. Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen, Nota 524
- Lukasse, L.J.S., J.E. de Kramer-Cuppen and A.J. van der Voort (2007): A physical model to predict climate dynamics in ventilated bulk-storage of agricultural produce. *International Journal of Refrigeration*, **30**, pp. 195-204.
- van der Sluis, S.M. (2009): Renewable Cooling voor supermarkten, RCC-Koude en Luchtbehandeling, 102: 30-35.
- SenterNovem (2005): De keuze van koel/vriessystemen in supermarkten (brochure)

Verschillende andere publicaties zijn in afrondende fase.

Samenvatting

De NVKL participeert in een project van AFSG (Wageningen UR) en TNO gericht op zogenaamde *Renewable Cooling* technieken. *Renewable Cooling* technieken maken gebruik van ‘natuurlijke processen’; daarbij wordt gebruik gemaakt van o.a. verdampingskoeling, bodemkoeling, zon, wind en koudebuffering. Dit driejarig project had als doelen (1) het verzamelen van state-of-the-art kennis en ervaringen bij buitenlandse partijen, (2) onderzoek naar effectievere benuttingsmogelijkheden van de ‘hernieuwbare koudebronnen’ door slim regelen, en (3) de perspectieven van de verschillende renewable cooling processen kwantificeren.

De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat duurzame koeling in het Nederlandse klimaat volop mogelijkheden biedt voor “hogere tempertuurbereiken” (comfort-klimatisering en koeling van datacenters). De daarbij behorende energiebesparingen zijn groot.

Voor koeltechnische toepassingen biedt het optimaal aansturen (inclusief anticiperen op bijvoorbeeld), evt. in combinatie met koudebuffering en andere duurzame koeltechnieken, de beste kansen voor de korte termijn.

Dit onderzoek werd uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken; regeling Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn

Bijlage A: Factsheets Renewable Cooling principes

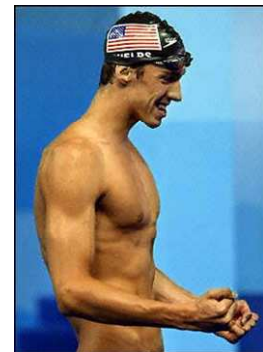
Renewable Cooling

Factsheet

9 mar. 2009

Evaporative Cooling – direct

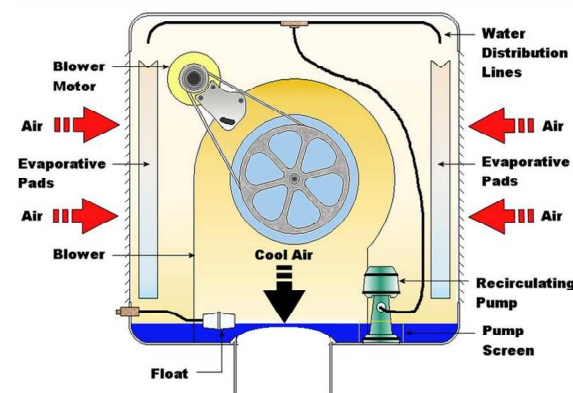
Direct evaporative cooling is what makes you feel “cold” when you get out of the water after a swim. The liquid (water) on your skin evaporates into the dry air. Heat is needed to evaporate the liquid. This heat is taken from the liquid itself and from the gas (the air) and surfaces (the skin) in contact with the evaporating liquid.



An evaporative cooler uses a fan to direct outdoor air through or along moist surfaces. In industrial cooling towers, falling water droplets are used to moisturize the air. A water pump is needed to circulate the water, this circulation of water is necessary to prevent any water soluble substances from depositing on the evaporative surfaces. Water must be drained from the reservoir to prevent building up of too high concentrations of soluble materials. Chemicals are added to the water to prevent microbiological growth (e.g. legionella pneumophila bacteria).



Evaporative coolers, such as depicted below, have been used extensively to cool homes in hot and dry climates. Industrial cooling towers (such as depicted in the picture above on the left) are somewhat different, as they are used to cool down hot water – where the end temperature is not necessarily below the ambient temperature.



Capacity

The amount of water that can be evaporated into ambient air (Δx in kg water / kg air) depends on the initial and final conditions of the air, especially the relative humidity (ϕ in %) and saturated water vapour pressure (P_{sat} in Pascal).

$$\Delta x = 0,622 \cdot P_{sat} \cdot \left\{ \frac{\phi_{final}}{P_{ambient} - P_{sat} \cdot \phi_{final}} - \frac{\phi_{initial}}{P_{ambient} - P_{sat} \cdot \phi_{initial}} \right\} \quad [\text{kg/kg}]$$

In this formula $P_{ambient}$ is the ambient pressure, which is normally 101325 Pascal (1 atm). The saturated vapour pressure (P_{sat} in Pascal) is highly dependent on temperature. The amount of “cold” generated – or better, amount of heat absorbed – Q is equal to the amount of evaporated water per time interval ($time$ in seconds), multiplied with the heat of evaporation (2500,6 kJ/kg):

$$Q = 2500,6 \cdot \Delta x / time \quad [\text{kW}]$$

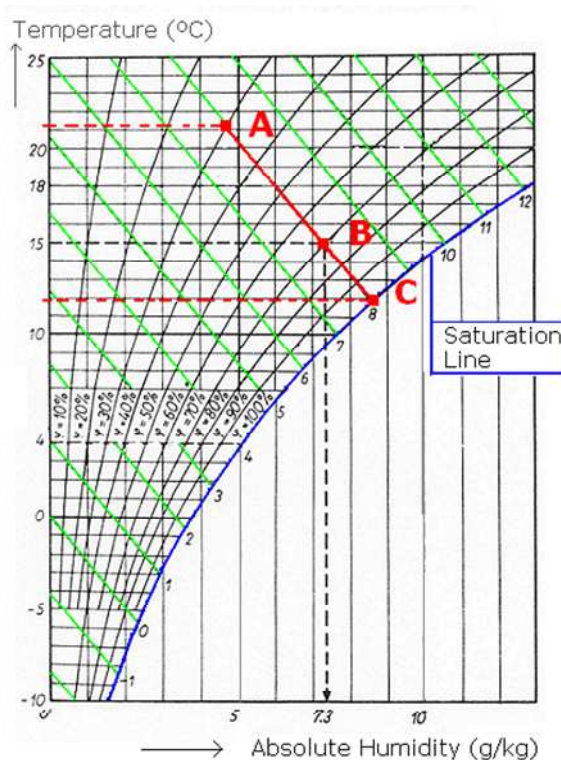
The final relative humidity of the outgoing air depends on the size and efficiency of the evaporating surface, values from 95 % to almost 100 % are possible. The final temperature of the outgoing air is in between the initial temperature and the wet bulb temperature. When the outgoing air is fully saturated ($\phi_{final} = 100 \%$) the temperature is equal to the wet bulb temperature T_{wb} . For values of final relative humidity ϕ_{final} , the final temperature can be approximated by:

$$T_{final} = T_{initial} - \left\{ \frac{(\phi_{final} - \phi_{initial})}{(100 - \phi_{initial})} \right\} \cdot (T_{initial} - T_{wb})$$

The Mollier Diagram (below) presents conditions of moist air. An example situation is depicted with points A, B and C.

In the example, the initial condition of air at temperature of 21,3 °C and relative humidity of 30% is marked “A”. The water content (absolute humidity) in this case is 4,7 g/kg.

Renewable Cooling



When water evaporates into this air, the condition of the air moves along a line of constant enthalpy (green lines). For perfect evaporative cooling the final condition is the dew point, which is the intersection of the enthalpy line and the saturation line (point "C"). The dew point in this case has a temperature of 11,7 °C and a water content

of 8,6 g/kg. Thus, into each kg of air 0,0039 kg of water can be evaporated (8,6 minus 4,7 gram).

At an air flow rate of 1000 kg/hr. this equals 3,9 kg of water being evaporated per hour, providing a cooling capacity of $(3,9 \cdot 2500,6) / 3600 = 2,71$ kW

When the evaporation is not continued until saturation (e.g. when the wetting surface is too small), the air will be moisturized only partly. This is depicted in the figure as point "B" (air moisturized until 70% relative humidity. The end temperature then is 14,8 °C and the absolute humidity 7,3 g/kg. At an air flow rate of 1000 kg/hour the cooling capacity then is $(2,6 \cdot 2500,6) / 3600 = 1,81$ kW

In very humid climates the direct evaporative cooler has a limited applicability. Because the ambient air is nearly saturated direct evaporative coolers will not provide significant cooling.

The cold air supplied by the direct evaporative cooler has a high humidity. In cases where this is not desired, it is better to apply an indirect evaporative cooler (*Factsheet Indirect evaporative cooling*).

Costs

Costs for a direct evaporative unit of 400 m³/hr are estimated at 750 Euro (2008) excluding installation. Running costs include costs for electricity (fan & pump), water (and possibly water treatment chemicals) and maintenance.

Table: Specifications for a small direct evaporative cooling unit. Unit size 400 m³/hr.

Coefficient of performance (COP) equals Cooling Capacity (kW) divided by electrical power input (kW).

Unit contains one fan (full power 0,11 kW) and one water pump (0,02 kW).

Where the desired temperature is higher than or equal to the outdoor condition, cooling is "free"

Where the desired temperature is lower than the wet bulb temperature, direct evaporative cooling is not possible (NA).

Desired Temperature	Outdoor conditions					
	25°C / 50%		15°C / 50%		5°C / 50%	
	Capacity (kW)	COP	Capacity (kW)	COP	Capacity (kW)	COP
18 °C	0,92	7,1	(free)	-	(free)	-
5 °C	NA (under T _{wb})	-	NA (under T _{wb})	-	(free)	-
0 °C	NA (under T _{wb})	-	NA (under T _{wb})	-	NA (under T _{wb})	-
-18 °C	NA (under T _{wb})	-	NA (under T _{wb})	-	NA (under T _{wb})	-

Contact: Sietze van der Sluis, TNO, Phone +31.88.8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl

This renewable cooling research is executed with practical input by NVKL and financial support by the Dutch Ministry of Economic Affairs; program *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Renewable Cooling

Factsheet

9 mar. 2009

Evaporative cooling – two-stage

Evaporative cooling was already used in ancient Egypt. By using porous jugs and letting the water evaporate from the surface, the contents were cooled. Heat is needed to evaporate the liquid. This heat is taken from the jug surface, which in turn cools the contents. Nowadays evaporative cooling is used, based on the same principle, to cool buildings. Clever “two stage” designs are introduced, to use the cold without increasing air humidity, and to cool below the wet bulb temperature limit.



A single stage (direct) evaporative cooler takes in dry air, evaporates water into the dry air, and discharges the moist air, which has dropped in temperature.

Theoretically, the wet bulb temperature is the lowest output temperature one can get from a direct evaporative cooler; it is reached when the air is saturated with water (relative humidity 100 %). In practice, heating by the fan (dissipation) and humidification below 100% will result in output temperatures above the wet bulb temperature. More details on direct evaporative coolers can be found in *Factsheet Evaporative cooling – direct*.

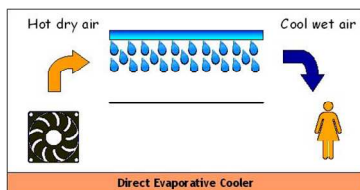


Figure 1. Direct evaporative cooler.

The advantage of direct evaporative coolers is that they operate at very low energy costs, and perform well in hot and dry climates. These coolers are called “swamp coolers” in the USA. A the big disadvantage of these direct evaporative coolers is the high humidity of the air that is discharged. At warm temperatures this becomes uncomfortable when the humidity is over 60%.

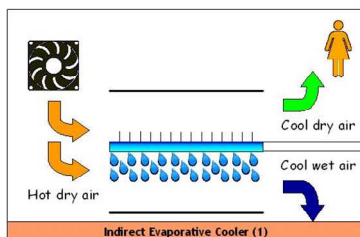


Figure 2. Indirect evaporative cooler (1).

The most obvious solution to the problem of high humidity in the cool air, is to use the moist, cool airstream for cooling a second airstream (which is not by itself moisturized). This principle is known as indirect evaporative cooling. There are a number of possible configurations for creating an indirect evaporative cooler, of which Figure 2 shows the simplest setup. Here, the “dry” side of the evaporating surface is formed as the

heat exchanger surface.

Unfortunately, this is not a very effective setup, because a part of the produced “cold” is discharged to outdoors with the cool wet air stream. Nevertheless, these systems are on the market both in residential size and industrial size.

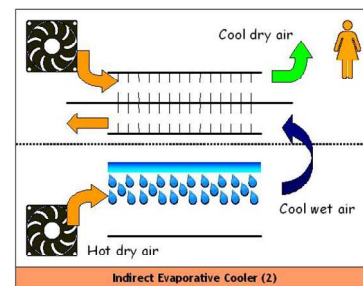


Figure 3. Indirect evaporative cooler (2).

A setup that doesn’t “waste” so much of the moisturized air is shown in Figure 3 where a heat exchanger is placed after the humidifier section. The amount of “cold” produced that is useable, now depends on the efficiency of the heat exchanger. The heat exchanger can be the same as in traditional, mass produced, Heat Recovery Units. The disadvantage is obvious: a second fan is needed to create the airflow in the “dry” channel. The lowest temperature that can be obtained with this setup is close to the wet bulb temperature – but never completely, since there will remain a temperature difference across the heat exchanger.

It is possible to reduce costs for the indirect evaporative cooler with separate heat exchanger - the setup (2) according to Figure 3 - by not using ambient air as input to the humidifier, but to use the return air instead. This air is pre-cooled, and thus needs less additional cooling to reach it’s wet bulb temperature. The humidifier section therefore can be smaller, saving costs. Refer to setup (3), Figure 4.

Note that, when the return air has taken up much heat, e.g. when the space to be cooled is infiltrated with outdoor air, the cooling effect of the small humidifier will small.

Renewable Cooling

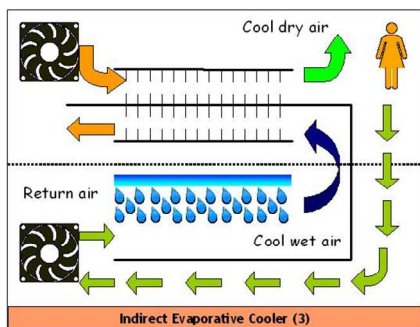


Figure 1. Indirect evaporative cooler (3).

More information on this type of indirect evaporative cooler is given in *Factsheet Indirect evaporative cooling*.

It is interesting to notice that with this setup, temperatures below the wet bulb temperature of the outdoor air can be reached, when the wet bulb temperature of the return air is lower than the wet bulb temperature of the outdoor air.

Two-stage evaporative cooler: dew point cooler

An interesting setup of the indirect evaporative cooler, known in the Netherlands as a “dew point cooler”, is given in Figure 2. It is an efficient setup, which uses only one fan and where the humidifier and the heat exchanger have been combined - similar as in indirect evaporative cooler (1) (**Error! Reference source not found.**).

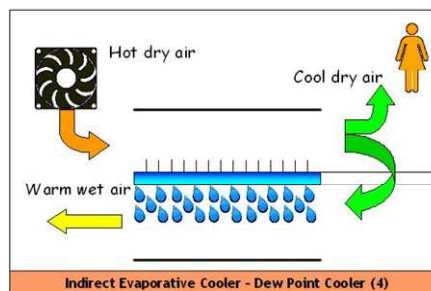


Figure 2. Indirect evaporative cooling - Dew point cooler.

In this setup too, it is possible to reach temperatures below the wet bulb temperature of the ambient air, as the incoming air is first cooled down at constant water content (and thus its wet bulb temperature decreases). The (theoretical) limit of the temperature of the cool dry air is the dew point temperature of the incoming air.

All indirect evaporative coolers have the advantage that the cooling air is not humidified, which is not only an advantage in terms of comfort, but also in terms of hygiene: bacteria that can multiply in humid environments, cannot reach the climatized area.

Costs

Costs for an indirect evaporative unit of 400 m³/hr according to setup (3) are estimated at 1000 Euro (2008) excluding installation. Costs for a commercial sized dew point cooler, 7500 m³/hr primary air and 5000 m³/hr useful air, are estimated at 7500 Euro (2008) excluding installation costs.

Running costs include costs for electricity (fan & pump), water (and possibly water treatment chemicals) and maintenance.

Table: Specifications for a commercially sized dew point cooling unit. Unit size 7500 m³/hr primary, 5000 m³/hr useful

Coefficient of performance (COP) equals Cooling Capacity (kW) divided by electrical power input (kW).

Unit contains one fan (7500 m³/hr primary air, pressure 400 Pa, input power 1,6 kW).

Where the desired temperature is higher than or equal to the outdoor condition, cooling is “free”

Where the desired temperature is lower than the wet bulb temperature, direct evaporative cooling is not possible (NA).

(*) Desired temperature is very close to dew point of outdoor air, and may not be reachable in practice

Desired Temperature	Outdoor conditions					
	25°C / 50%		15°C / 50%		5°C / 50%	
	Capacity (kW)	COP	Capacity (kW)	COP	Capacity (kW)	COP
18 °C	11,7	7,4	(free)	-	(free)	-
5 °C	NA (under T _{dp})	-	17,2 (*)	10,9	(free)	-
0 °C	NA (under T _{dp})	-	NA (under T _{dp})	-	9,0	5,7
-18 °C	NA (under T _{dp})	-	NA (under T _{dp})	-	NA (under T _{dp})	-

Contact: Sietze van der Sluis, TNO, Phone +31.88.8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl

This renewable cooling research is executed with practical input by NVKL and financial support by the Dutch Ministry of Economic Affairs; program *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Renewable Cooling

Factsheet

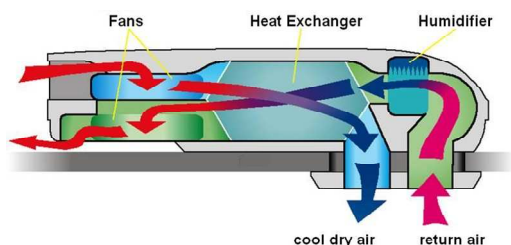
9 mar. 2009

Indirect evaporative cooling

When water evaporates from a surface, the surface is cooled down. The “other side” of the surface can then be used as for cooling down an air-stream, without adding water to that air stream. This is the principle of indirect evaporative cooling.

Another possibility is to use one airstream that is directly evaporative cooled (see *Factsheet Evaporative cooling – direct*) and thus becomes humid, and to provide the “cold” of this airstream to a second dry airstream by means of a heat exchanger.

An indirect evaporative cooler uses a humidifier to cool down one airstream by means of direct evaporative cooling (see *Factsheet Direct evaporative cooling*). This cooled down humid airstream is led through an air to air heat exchanger, where it cools down a second airstream without adding moisture to the second airstream. The heat exchanger is of the same type as those found in “heat recovery units” (HRU’s). A water pump is needed to circulate the water, this circulation of water is necessary to prevent any water soluble substances from depositing on the evaporative surfaces. Water must be drained from the reservoir to prevent building up of too high concentrations of soluble materials. Sometimes chemicals are added to the water to prevent microbiological growth (e.g. legionella pneumophila bacteria).



Evaporative coolers can be found in applications for cooling homes or for mobile cooling (caravans, campers).



Capacity

The amount of water that can be evaporated into ambient air (Δx in kg water / kg air) depends on the initial and final conditions of the air that is humidified, especially the relative humidity (ϕ in %) and saturated water vapour pressure (P_{sat} in Pascal). In this case the air that is humidified is the return air from the space that is cooled.

$$\Delta x = 0,622 \cdot P_{sat} \cdot \left\{ \frac{\phi_{final}}{(P_{ambient} - P_{sat} \cdot \phi_{final})} - \frac{\phi_{return\ air}}{(P_{ambient} - P_{sat} \cdot \phi_{return\ air})} \right\} \quad [\text{kg/kg}]$$

In this formula $P_{ambient}$ is the ambient pressure, which is normally 101325 Pascal (1 atm). The saturated vapour pressure (P_{sat} in Pascal) is highly dependent on temperature. The amount of “cold” generated – or better, amount of heat absorbed – Q is equal to the amount of evaporated water per time interval ($time$ in seconds), multiplied with the heat of evaporation (2500,6 kJ/kg):

$$Q = 2500,6 \cdot \Delta x / time \quad [\text{kW}]$$

The absolute humidity of the cooled air that enters the room to be climatized, is equal to the absolute humidity of the outdoor air. It’s relative humidity is higher, as the temperature is lower. The temperature of the cooled air depends on the size and efficiency of the evaporating surface, with values from 95 % to almost 100 % and on the efficiency of the heat exchanger (typically 95 – 98 %). The final temperature of the outgoing air is in between the initial temperature and the wet bulb temperature. When the outgoing air would be fully saturated ($\phi_{final} = 100\%$) the temperature would be equal to the wet bulb temperature T_{wb} .

$$T_{final} = T_{initial} - \left\{ \text{efficiency}_{\text{heat exchanger}} \cdot \text{efficiency}_{\text{evaporation}} \cdot (T_{return\ air} - T_{wb}) \right\}$$

Renewable Cooling

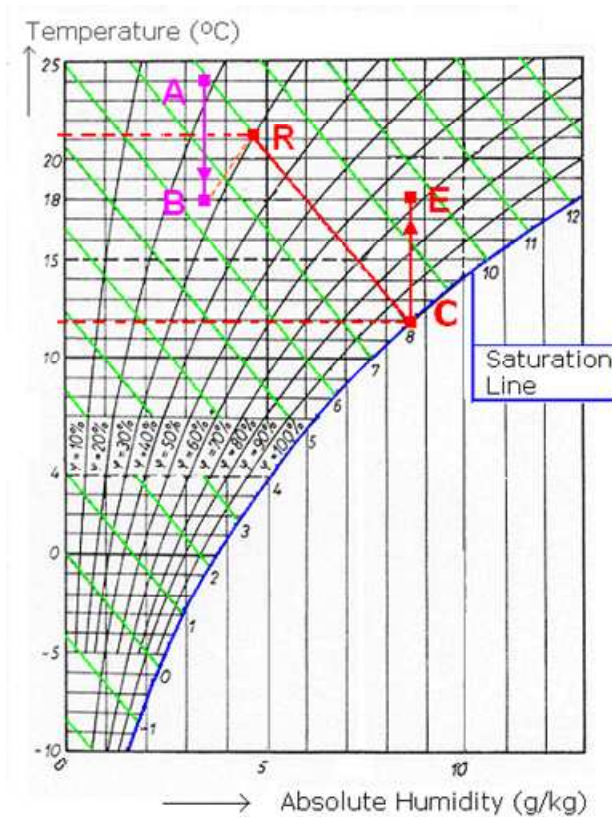


Figure 1. Mollier Diagram

The Mollier Diagram presents conditions of moist air. In the example points indicated in this figure, the initial condition of air at a temperature of 24 °C and a relative humidity of 19% is marked "A" (Ambient).

This air is cooled down in the heat exchanger, while keeping the same (absolute) water content. This is

depicted by a line going straight down in the graph, from "A" to "B".

A second line of the same length, going straight up from "C" to "E" (Exhaust) depicts what happens on the other side of the heat exchanger: here the air is heated up without changing water content.

The line from point "R" (return air) to point "C" depicts the adiabatic cooling in the humidifier. In practice, point "C" will not be on the saturation line, which is only the case when the humidification is perfect.

Finally, the dotted line between points "B" and "R" represents the take-up of heat and moisture in the room that is climatized. When no moisture is added in this room, the line would go straight up (constant water content). When more heat is added, point "R" will be higher in the graph. This also shows that the behaviour of the system changes when the heat load in the room to be climatized changes. For when point "R" is moved, all other points (excluding the outdoor condition "A") will also change.



caravan cooler 400 m3/hr

Costs

Costs for a direct evaporative unit of 400 m3/hr are estimated at 1000 Euro (2008) excluding installation. Running costs include costs for electricity (fan & pump), water (and possibly water treatment chemicals) and maintenance.

Table: Specifications for a small indirect evaporative cooling unit. Unit size 400 m3/hr.

Coefficient of performance (COP) equals Cooling Capacity (kW) divided by electrical power input (kW).

Unit contains one fan (full power 0,11 kW) and one water pump (0,02 kW).

Where the desired temperature is higher than or equal to the outdoor condition, cooling is "free"

Where the desired temperature is lower than the wet bulb temperature, direct evaporative cooling is not possible (NA).

Desired Temperature	Outdoor conditions					
	25°C / 50%		15°C / 50%		5°C / 50%	
	Capacity (kW)	COP	Capacity (kW)	COP	Capacity (kW)	COP
18 °C	0,85	3,7	(free)	-	(free)	-
5 °C	NA (under T_{wb})	-	NA (under T_{wb})	-	(free)	-
0 °C	NA (under T_{wb})	-	NA (under T_{wb})	-	NA (under T_{wb})	-
-18 °C	NA (under T_{wb})	-	NA (under T_{wb})	-	NA (under T_{wb})	-

Contact: Sietze van der Sluis, TNO, Phone +31.88.8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl
Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl

This renewable cooling research is executed with practical input by NVKL and financial support by the Dutch Ministry of Economic Affairs; program *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Renewable Cooling

Factsheet

5 march 2009

Thermal sorption cooling

Through sorption processes, heat can be used for cooling. It can be coupled with waste heat or with solar collectors for cooling with low environmental impact. Electric power is used for pumps and fans; the electrical power consumption is generally less than 10% of traditional (mechanical) cooling. Compared to traditional cooling systems, these technologies result in low operational costs (energy), but require high investments.

A summary of various systems (based on an overview of RAEE, 2008):

Method	Closed cycle		Open cycle	
Name / Market available	Adsorption chiller	Absorption chiller	Desiccant cooling	Close to market introduction
Principle	Chilled water		Dehumidification of air and evaporative cooling	
Phase of sorbent	Solid	Liquid	Solid	Liquid
Typical material pairs	water - silica gel	water - lithium bromide ammonia - water	water - silica gel, water - lithium chloride	water - calcium chloride, water - lithium chloride
Typical cooling capacity (kW cold)	50 – 430 kW	15 kW – 5 MW	20 kW – 350 kW per module	
Typical COP	0,5 – 0,7	0,6 – 0,75 (Single effect)	0,5 – >1	> 1
Driving temperature	60 – 90 °C	80 – 110 °C	45 – 95 °C	45 – 70 °C
Logical combination with solar collectors	Vacuum tubes, flat plate collectors	Vacuum tubes	Flat plate collectors, solar air collectors	Flat plate collectors, solar air collectors
Application	cooling water, min. 4°C	H ₂ O-LiBr: freezing NH ₃ -H ₂ O: min. 5°C	min. about 10°C	under study

Thermally driven chillers

The chillers are characterised by three temperature levels:

- A high temperature level that drives the process (supplied heat)
- A low temperature level produced by the process (cold generated)
- A medium temperature level that contains the reject heat. Closed cycle systems require cooling water for this (possibly supplied by a cooling tower). Lowering the cooling water temperature significantly contributes to the cooling efficiency.

Driving power (heat) can be (waste) heat from e.g. electricity production or solar heat.

Absorption cooling for refrigeration purposes

Closed cycle systems supply chilled water that can be used for refrigeration conditions. Cold distribution is realised through fluids such as water or glycol. The process is driven by evaporating refrigerants (water or ammonia) through the heat supplied (section 1 in Figure 1). The refrigerant condensates in a cooled section (2). This process results in a highly concentrated refrigerant solution. This solution is pumped to the “refrigeration section” (3). Because of the high

refrigerated concentration, part of it will evaporate here and condensate in a cooled lower concentration solution (4).

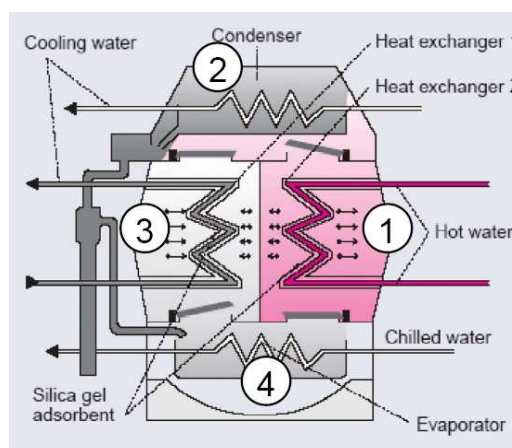


Figure 1. Absorption cooling process scheme (based on De Boer, 2005)

The evaporation in the “refrigeration section” provides the cooling effect. In order to keep the cyclic process

Renewable Cooling

going, the solution from section (4) is pumped to the hot section again.

Comfort cooling and dehumidification

Open systems supply cooled and dehumidified air. Driving force is evaporation and condensation of water on a desiccant (such as silica gel or zeolites). The process is explained with the following figure.

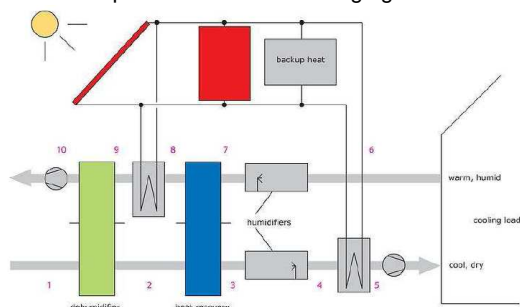


Figure 1. Desiccant cooling process scheme, using solar heat. (Solair-project, 2008).

Most common systems are desiccant cooling systems using a rotating dehumidification wheel with solid sorbent.

Warm and humid air enters the slowly rotating desiccant wheel and is dehumidified by adsorption of water (1-2). Since the air is heated up by the adsorption heat, a heat recovery wheel is passed (2-3), resulting in a significant pre-cooling of the supply air stream. Subsequently, the air is humidified and thus further cooled by a controlled humidifier (3-4). The exhaust air stream of the rooms is humidified (6-7) close to the saturation point to exploit the full cooling potential in order to allow an effective heat recovery (7-8). Finally, the sorption wheel has to be regenerated (9-10) by applying heat in a comparatively low temperature range from 50°C- 75°C and to allow a continuous operation of the dehumidification process.

This type of system (in combination with solar heat collectors) is quite common for cooling buildings in warm countries.

Financial considerations

The investments for sorption processes mainly depends on the cooling power required. The amounts are of comparable size for the various technologies. Estimations of investments can be derived from Figure 3.

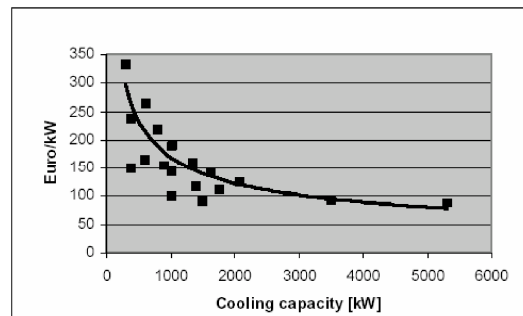


Figure 2. Estimated investments for single-effect sorption chillers (Vercampt, 2006)

Double-effect systems (with increased COP) require an additional investment of about €60 per kW. The investments are about 3 times higher than for traditional (compression) cooling systems. Feasibility of sorption chillers depends on:

- availability of free or inexpensive heat of sufficiently high temperature (possibly produced by solar collectors in hot countries).
- year-round variation of cooling need (return on high investments is most favourable if constant cooling is needed).

Practical financial feasibility will depend on external factors:

- availability (and price) of sufficiently high quality heat;
- availability of cooling water;
- continuity of availability of heat with respect to required continuity of cooling;
- existing system for cold distribution.

Typical example situations with favourable feasibility conditions:

- absorption refrigeration at food processing plants, using residual steam condensate heat.
- absorption refrigeration for chillers on fishing trawlers using waste heat from the diesel engine (existing);

Sources and further info

De Boer, R (2006).: Vaste stof-damp sorptiekoeling. *Verwarming en Ventilatie*, April 2005, pp. 302-307.

RAEE (2008): Rhônalpénergie-Environnement <http://www.raee.org/climatisationsolaire/gb/solar.php>

Solair-project (2008) www.solair-project.eu

Vercampt, S. (2006): *Warmte-kracht koppeling en trigeneratie*. Eindverhandeling, Universiteit Hasselt (Belgium).

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
Sietze van der Sluis, TNO, Phone +31.88.8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

This renewable cooling research is executed with practical input by NVKL and financial support by the Dutch Ministry of Economic Affairs; program *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Renewable Cooling

Factsheet

25 Nov. 2009

Solar thermal cooling

Through use of thermal-driven coolers, solar heat can be used for cooling. In fact, a large part of the existing thermal cooling systems worldwide is driven by solar heat. Solar thermal cooling is very adequate for hot areas, because temperature variation is positively correlated with solar radiation.

The main components of solar thermal cooling systems are:

1. thermal-driven cooling unit;
2. solar collector.

Alternative systems can be based on electric solar panels in combination with traditional cooling. Lambert and Beyene (2007) have shown that such systems will only be feasible with "exorbitant electric pricing".

Thermal-driven cooling unit

The cooling unit generally is a sorption chiller (using absorption, adsorption or desiccant cooling principle). The efficiency of those chillers (cooling power relative to heat use) varies from 0.5 (single-effect systems under sub-optimal conditions) to 1.2 (double-effect system, optimal conditions).

Solar collectors

Table 1 gives an overview of efficiency and costs of modern solar collectors (for "house-owner scales"; for large-scale applications some discount is expected). Heat production by solar panels will depend on:

- solar panel type
- collector or setpoint temperature (closely related with the chosen thermal chiller system)
- actual solar radiation (influenced by solar angle and weather conditions).
- hot-water buffer size and isolation.

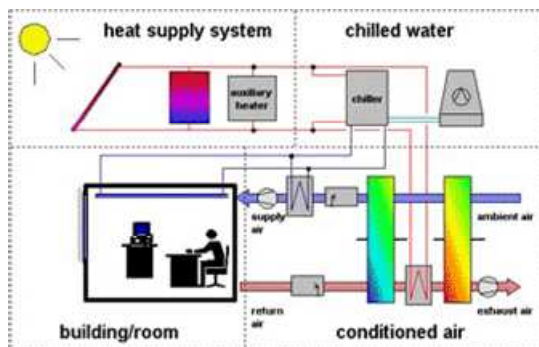


Figure 1. Solar thermal cooling system (figure: www.californiasolarcenter.org)

Efficiency and net solar conversion (W/m^2) for photovoltaic modules and thermal collectors: flat panel, evacuated flat panel (EFP), and compound parabolic concentrator (CPC)

Type of solar collector	Efficiency expression	Efficiency η at specified conditions ^a	Net conversion (W/m^2) at specified conditions ^a	Cost per m^2	Installed cost per Net kW elec. or thermal
Photovoltaic (PV), single crystal or poly-crystalline, not thin film	0.15	0.15	123	\$616-\$740	\$5500-\$6500 ^b
Flat Panel: single-glazed ($\tau_s = 0.86$), black paint ($\alpha_{s/e_{IR}} = 0.96/0.96$)	$0.83-8.6(T_{coil} - \bar{T}_a)/q_s$	0 @ max. $T_{coil} = 111^\circ C$	0	\$175	Cannot reach T_{coil}
Flat Panel: double-glazed ($\tau_s = 0.79$), black paint ($\alpha_{s/e_{IR}} = 0.96/0.96$)	$0.76-4.9(T_{coil} - \bar{T}_a)/q_s$	0 @ max. $T_{coil} = 160^\circ C$	0	\$200	Cannot reach T_{coil}
Flat Panel: single-glazed ($\tau_s = 0.89$), solar-selective ($\alpha_{s/e_{IR}} = 0.90/0.20$)	$0.80-3.8(T_{coil} - \bar{T}_a)/q_s$	0.162	133	\$200	\$1500
Flat Panel: double-glazed ($\tau_s = 0.79$), solar-selective ($\alpha_{s/e_{IR}} = 0.95/0.15$)	$0.75-3.4(T_{coil} - \bar{T}_a)/q_s$	0.179	147	\$225	\$1530
vacuated Flat Panel (EFP); etched single-glazed ($\tau_s = 0.95$), solar-selective ($\alpha_{s/e_{IR}} = 0.92/0.10$)	$0.874-1.754(T_{coil} - \bar{T}_a)/q_s$	0.580	477	\$250	\$524
Compound Parabolic Concentrator (CPC): CR = 10, etched single-glazed ($\tau_s = 0.95$), solar-selective ($\alpha_{s/e_{IR}} = 0.92/0.10$)	$0.613-0.381(T_{coil} - \bar{T}_a)/q_s$	0.549	451	\$375	\$831

^a $T_{coil} = 170^\circ C$, $\bar{T}_a = 32^\circ C$, $\bar{K}_T = 0.60$, $\theta \approx 0^\circ$, $\beta = 20^\circ$, $\rho_{sur} = 0.2$, $q_s = 822 W/m^2$.
^b Cost of additional PV needed for HVAC added onto, 3 kW array for non-HVAC usage.
^c Equals retail price plus estimated installation cost of \$50/ m^2 .

Table 1. Solar collectors indicative costs and efficiency (Lambert and Beyene, 2007)

Renewable Cooling

Estimate of costs and benefits

Below, the costs and benefits for cooling offices during summer season is analysed.

Situation:

- average daily solar radiation (average summer day according to data from www.helioclim.net for Amsterdam): 4.8 kWh/m² (per horizontal area unit);
- average solar radiation power between sun rise and sun set (16¼ hour) on average summer day: 293W/m²;
- maximum solar radiation during average day 460W/m² (estimate);

System considered:

- solar panel (estimations based on table 1)
 - type: vacuum tube collector (EFP in table 1)
 - installed costs per m² €200;
 - oriented towards south;
 - setpoint temperature 85°C;
 - average conversion on summer days 170W/m²;
 - maximum conversion on summer days 330W/m².
- sorption cooling process:
 - adsorption cooling;
 - COP 0.7;
 - investment costs 100 to 300 € per kW cooling capacity (for a system with 3000 resp. 300 kW cooling capacity).

According to current standards, 30W cooling capacity is needed per m³ office room. Thus, for cooling a unit of 5000m² offices (with height say 4m) total cooling capacity of 600kW would be needed.

Based on the above system considerations follows (estimations):

- average solar panel heat production 850kW;
 - solar collector area 5000m²;
 - investment costs solar panels k€1000;
 - investments costs adsorption cooler k€200.
- Total investments (excluding heat buffer) about k€1200.

For reference: investments for a traditional cooling system would be a few hundreds thousands euros. Annual energy use: 80MWh (for 16¼ hours per day on the summer days; 5 days per week; averagely 50% of 600kW cooling, with COP 4). With electricity price of €0.10/kWh, the annual energy costs would be k€8.

Conclusion

Straightforward implementation of solar thermal cooling in the Netherlands is not financially feasible. Feasibility can be improved by using the collected heat of the solar panels also during the cold seasons (for instance for heating purposes).

Sources and further info

- Augusta Solar: www.august-solar.de (2009).
 Lambert, M.A. and A. Beyene: Thermo-economic analysis of solar powered adsorption heat pump. *Appl. Thermal Engineering* 27, pp. 1593-1611 (2007).
 TNO and Deerns: *Keuzewijzer voor koelinstallaties in de utiliteitsbouw*. Rijswijk, Netherlands (2007).

Table 1. Yield potential of solar collector (location Freiburg, Germany)

Einstrahlung in die Kollektorebene (Freiburg, Deutschland)														
source: Augusta Solar (2009)														
	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	
Globalstrahlung	46	63.9	108	124	150	148	165	165	127	89.1	48.1	37.4	1270	kWh/m ²
Diffusstrahlung	23.4	32.6	51	62.1	72.8	74.8	75.2	68.1	55.6	43.1	24.3	18.9	602	kWh/m ²
Kollektorertrag bei fester mittlerer Kollektortemperatur (Tm) (evacuated flat panel with heat pipes)														
	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	
BWE Tm= 10°C	33.4	46.3	81.6	94	118	116	131	133	102	69.3	35.8	27.1	987.2	kWh/m ²
BWE Tm= 20°C	30.4	42.9	77.3	88.8	111	109	124	126	96.3	64.6	32.8	24.3	928	kWh/m ²
BWE Tm= 30°C	27.3	39.3	73	83.9	106	104	118	120	91.9	60.6	29.8	21.6	875.8	kWh/m ²
BWE Tm= 40°C	24.4	35.7	68.5	78.7	99.9	98	113	115	87.2	56.4	26.9	19.2	822.5	kWh/m ²
BWE Tm= 50°C	21.7	32.1	64	73.4	93.9	91.8	106	109	82.5	52.1	24.1	17.1	768.3	kWh/m ²
BWE Tm= 60°C	19.4	28.7	59.3	68.1	87.6	85.6	100	103	77.6	47.7	21.6	15.3	714.3	kWh/m ²
BWE Tm= 80°C	15.1	22.5	49.9	57.3	75.3	73.4	87.4	91.3	67.5	39.5	17.3	11.9	608.6	kWh/m ²
BWE Tm= 100°C	11.6	17.5	41.1	47	63.2	61.6	74.3	78.7	57.4	31.9	13.7	8.9	507	kWh/m ²
BWE Tm= 120°C	8.7	13.4	32.8	38.1	52.2	50.1	61.3	66.1	47.4	24.7	10.3	6.2	411.3	kWh/m ²
BWE Tm= 150°C	5.2	8	21.1	26.2	37.5	34.5	43.3	48.5	33.3	15.1	5.6	3	281.4	kWh/m ²

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
 Sietze van der Sluis, TNO, Phone +31.88.8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

This renewable cooling research is executed with practical input by NVKL and financial support by the Dutch Ministry of Economic Affairs; program *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Renewable Cooling

Factsheet

9 Mar. 2009

Seawater cooling

Seawater Air Conditioning (SWAC) systems use the cold water from the deep ocean (and in some cases a deep lake) to cool buildings. It can largely reduce the power consumed by air conditioning (AC) systems. In various situations it has proven cost-effective. Seawater cooling is also applied for cooling industrial processes; many examples exist of power stations cooled with seawater.

SWAC components

- Cold seawater. Although the temperature of surface seawater does not deviate very much from ambient temperatures, substantial lower temperatures exist at large depths. This is due to global water circulations in the oceans: driven by density cold water from the poles flows at large depths to warmer areas. Simultaneously, the water at the ocean surface layer flows back to the poles. Roughly, the ocean water temperature at various depths is as follows:

700m	below 7°C
1000m	below 5°C
2000m	below 3°C

- Sea water supply system: pipes for cold water in take and for returning heated water. These pipes are made out of seawater-resistant material, like polyethylene. Furthermore, the pipe design should resist the hydrodynamic impact. Adequate filters are needed to prevent accumulation of solid particles in the system.
- Heat exchanger ("cooling station"). This brings over the cold to a closed water system. Titanium heat exchangers are used for this, because titanium combines resistance to salty water with high heat conductivity.
- Chilled water distribution net (heat-isolated pipes).
- Cooling system: mostly the chilled water is cool enough for direct cooling application.

In some situations, the cooling capacity is insufficient. Then an auxiliary chiller can be used to supplement the cooling supplied by the sea water.

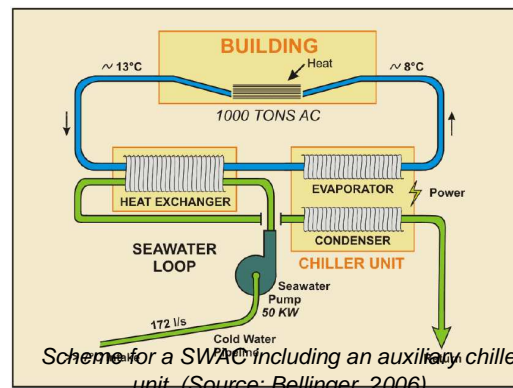
Pre-requirements for SWAC

- availability of cold water in the vicinity
- high cooling demand

Practical examples

SWAC have been realised in amongst others:

- Toronto: a 5 km long pipe draws cold water (4°C) from Ontario Lake. This system meets up to 40% of the city's cooling need. The cooling water is also used for drinking water purposes.
- Cornell University utilises a comparable system for cooling the campus and school (using water from the Cayuga Lake).
- Stockholm: Here, sea water is used. The system has two water inlets: one at sea level and another at a depth of 20m.



(280GWh) of the district cooling in Stockholm comes from seawater.

- The inlet at sea level is used for heating. In 2006 16% (1600GWh) of the heating for Stockholm is supplied by seawater.
- Hawai: a 1m diameter pipe is used for 15MW cooling power (with intake depth at 800m) (Ryzin and Leraand, 1992).
- Other seawater cooling systems have been realised or are considered in Halifax, Tahiti, Curacao, Korea, Malta, the Cape Verde Islands, Haiti and Mauritius. In many of these project Hawaii based Makai Ocean Engineering is involved.

Energetic feasibility

SWAC systems only need energy for pumping water; generally this is below 10 to 20% of the energy needed for traditional cooling.

For large building and hotels in tropical and subtropical climates, air conditioning represents the major energy demand. As a rule-of-thumb, a typical hotel room requires approximately 3.5kW of air conditioning with an energy requirement of 0.9 kW. A conventional system utilizes about 900 kw/1000 tons but a similar sized A/C system using seawater requires only pumping power in the order of 40-80 kw/1000 tons, representing a 90% electrical saving over the chiller power requirement.

The Curacao project (built in 2008):

The pipeline will reach 6 kilometres out into the sea, ... down to a depth of 850 meters, fetching up seawater at a temperature of 6°C at half cubic meter per second. The SWAC system operates with a

Renewable Cooling

temperature differential (ΔT) between the water it takes in and the water it lets out of about 7°C, and the return water will go into the sea again at 100 meters depth to avoid any substantial environmental impact. (source: OTEC news, www.otecnews.org)

The cooling capacity of this system will be about 10MW.

Financial feasibility

Like most sustainable energy concepts, investment costs of SWAC are relatively high, with relatively low operational costs.

The investment costs depend on:

- Required water flow rate (determining the diameter of pipes, sizes of the heat exchangers and pumping capacity. The flow rates are dependent on:
 - application/peak cooling load
 - sea water temperature
- Length of the pipes:
 - offshore distance to cold water below, say, 5°C
 - length of the onshore distribution system
- Specific measures needed for protecting the pipes.
- Percentage use of the cooling system

Because of the economy of scale, a SWAC system is most appropriate for supplying multiple buildings or hotels in a coastal area. Since normal water is used for the cold distribution, mostly existing building can be easily converted to SWAC by simply bypassing existing chillers.

Ryzin and Leraand (1992) give the following evaluation of payback periods:

... We studied the feasibility of seawater air conditioning for three sites on Curacao. with air conditioning loads ranging from 2 to 7.5 MW (corresponds to cooling of 540 to 2,100 hotel rooms). The length of the seawater intake pipelines ranged between 1.6 to 3.6 km depending on the site and the seawater intake temperature. The capital cost—including pipeline, heat exchangers, and chilled water distribution system was on the order of \$2 to \$5 million. The payback period for these systems ranged between 5 and 6 years for feasible sites and 9 to 17 years for the site with the smallest air conditioning loading. This payback is based on the cost of supplying existing buildings. If new construction only is considered (without chillers), the payback is considerably better. Makai Ocean Engineering has also completed some preliminary analyses for Guam in the Tumon Bay area where there is a high density of hotel rooms. This preliminary analysis indicates that 10,000 hotel rooms could be air conditioned with cold seawater and that the capital payback period for installing such a system would be approximately 5 to 6 years.

Investment costs for the Curacao project mentioned above amounted approximately M€15-20. With an electricity price of €0.10 per kWh, the annual electricity cost saving will be about M€3. Thus, the pay-back period will be about 6 to 8 years.

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
Sietze van der Sluis, TNO, Phone +31.88.8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

This renewable cooling research is executed with practical input by NVKL and financial support by the Dutch Ministry of Economic Affairs; program *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Suitability for the Netherlands

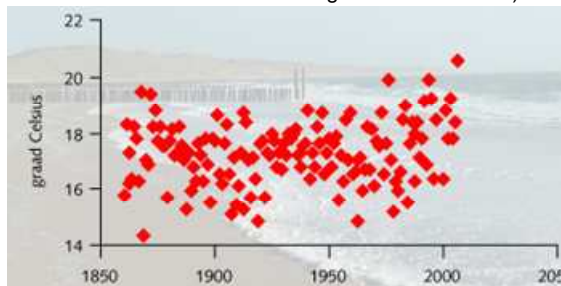
This technology could also be used in the Netherlands. In fact, the technology is used sometimes for cooling with lakewater:

- some buildings along the south axis of Amsterdam are being cooled with water from the “Nieuwe Meer” (developed in 2006),
- the Atlas Arena complex (also in the south of Amsterdam) will be cooled with water from the Ouderkerkerplas (starting in 2009),
- Sauna Fort Bronsbergen in Zutphen uses cold water from the Bronsbergen lake.

These examples all use water from lakes that resulted from sand winning, because those lakes are relatively deep (over 15m). Water at that depth is relatively cold (below 8°C). A large number of this kind of lakes exist in the Netherlands.

A typical lake has an area of 1km², with an average depth of 15m. The heat capacity of such a lake is about 63TJ/°C. Thus, per degree temperature increase allowed per year (heating up will gradually decrease), 63TJ cooling per year can be provided by the lake, which is 2.0MW averagely.

Conditions for cooling with seawater, however, are less favourable than the examples mentioned before, because very cold water is not available: the North Sea does not have a thermocline (the depth of the North Sea between the Netherlands and England is about 40m).



Average sea water temperature near Den Helder, The Netherlands (source: Rijkswaterstaat, through www.trendslnwater.nl)

Sources

Bellinger, R. : Re-installation of a sea water air conditioning system. *Public Utilities Commission Docket no. 05-0145* (2006).

<http://www.lifeofthelandhawaii.org/Proposed-2009-plant/Bellinger.pdf>

Ryzin, J. van and T. Leraand: Air conditioning with deep seawater: a cost-effective alternative. *Ocean Resources 2000*, Sea Technology, September 1992. <http://www.aloha.com/~craven/coolair.html>

Renewable Cooling

Factsheet

26 feb. 2009

Cryogenic cooling

Cryogenic cooling uses phase change for cooling: sublimation of dry ice (solid CO₂) or evaporation of liquid CO₂ or N₂. The solid or fluid is produced in large-scale centralised plants, mostly as by-product of a chemical process (for instance ammonia production). The cold can be applied in de-central applications, including mobile applications. Especially the use of dry ice is technically quite simple, because no electrical driven cooling equipment is needed. Dependent on the situation safety measures may be needed.

Although CO₂ is considered a by-product of industrial processes, cryogenic CO₂ is not available for free. Usually it comes available from regenerating gas washing fluids; the CO₂ will be available in (concentrated) gas form. This gas can be cooled and compressed for production of fluid CO₂. For production of solid CO₂ (dry ice), the fluid is adiabatically expanded (resulting in evaporation of about half of the CO₂ and solidification of the remainder).

Fluid N₂ is produced by compressing air.

Practical benefits

- silent (most relevant for mobile applications);
- very suitable for "refrigerated delivery": by adding some dry ice to a delivery, cooling is ensured for a certain period without need of power supply;
- high quality cold: low temperatures (far below the freezing point);
- buffer is very suitable for "peak shaving".

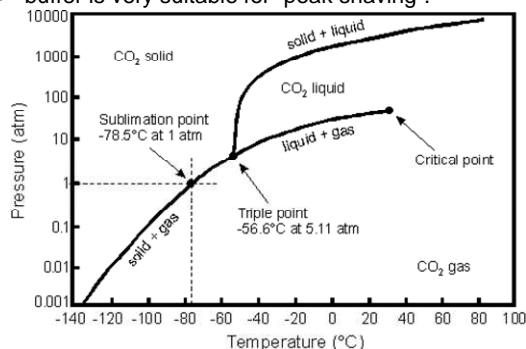


Figure 1. Pressure-Temperature phase diagram for CO₂.

Energetic considerations

Solid CO₂ at atmospheric pressure (sublimation point -78.5°C) has a latent evaporation heat of 571kJ/kg, whereas the specific heat (C_p) of CO₂ gas is 0.85kJ/(kg K). Thus, for cooling applications the evaporation of solid CO₂ will remove about 640kJ per kg CO₂.

When producing cryogen CO₂ a comparable amount of heat is removed from the gas, combined with compression; the exact amount of energy needed depends on the efficiency of the process. Since this is

low-temperature cooling, generally this is less efficient than refrigeration cooling. Furthermore, it should be taken in account that losses in the supply chain will occur.

For cooling far below the freezing point, however, COP of mechanical cooling is low too; energetic performance of cryogenic cooling and mechanical cooling will be more comparable.

Energetic efficiency of using cryogenic (fluid) N₂ is slightly lower than for CO₂ because fluid N₂ is produced from air (which has other components that hinder the process efficiency) whereas fluid CO₂ is produced from nearly pure CO₂ gasses. However, fluid N₂ has some practical advantages: it can be kept fluid at atmospheric pressure.

Financial considerations

Costs of investments largely depend on the specific situation; no general indicative figures can be given.

Indicative prices of cryogen CO₂ and costs of cooling:

- Fluid CO₂ (bulk amounts) €0.06 to €0.10 per kg (price 2006); cooling potential about 300 to 400 kJ/kg (dependent on temperature and pressure). Resulting variable costs for cooling €0.15 to €0.33 per MJ.
 - Dry ice (small amounts): about €1 per kg; cooling potential 640 kJ/kg. Cooling costs about €1.60 per MJ.
- For reference: energy costs for mechanical cooling are about €0.008 per MJ (with E-tariff €0.10/kWh and COP 3.5).

Conclusions

Generally, cryogenic cooling is energetically less efficient than mechanical cooling. Financial feasibility will depend on the specific situation.

Sources and further info

www.airliquide.com

Feron PHM and CA Hendriks (2005): CO₂ Capture Process Principles and Costs. *Oil & Gas Science and Technology* Vol. 60 (2005), No. 3.

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
Sietze van der Sluis, TNO, Phone +31.88.8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

This renewable cooling research is executed with practical input by NVKL and financial support by the Dutch Ministry of Economic Affairs; program *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Renewable Cooling

Bijlage B: Alternatieve benaderingen voor verduurzaming van koeling

Renewable Cooling

Factsheet

9 maart 2009

Duurzame koelmethoden uit de natuur

In de natuur overleven verschillende organismen onder extreme omstandigheden. Natuurlijke oplossingen kunnen waardevolle inspiraties vormen voor technologische innovaties. Een voorbeeld is de ontwikkeling van zonnecellen op basis van fotosynthese zoals die in planten plaats vindt.

Voor koeltechniek is het interessant te kijken naar oplossingen in het dierenrijk.

Lichaamskoeling van de mens en van warmbloedige dieren

Voor mensen en dieren wordt warmtetransport door het lichaam verzorgd door het bloed.

De belangrijkste koelmethoden van het menselijk lichaam zijn :

- stralingswarmte (75% van de warmteafvoer);
- verdampingswarmte door zweten (gemiddeld 15%);
- warmteverlies door ademhaling (voelbare en latente warmte: 10%).

De afkoeling wordt op verschillende manieren bijgesteld: bij hoge warmteproductie wordt meer bloed naar de huid gepompt en stijgt de zweetproductie. Een kat bijvoorbeeld (die niet zweet) maakt toch gebruik van verdampingskoeling: bevochtiging van de vacht door likken.

De lichaamsbouw van diersoorten is afgestemd op het klimaat van de natuurlijke omgeving. Een ijsbeer, bij voorbeeld, heeft een dikke vacht, een relatief klein huidoppervlak, een korte staart en kleine oren. Dieren die in warmere gebieden leven hebben in de regel langere oren, ledematen, staart en nek om toch voldoende warmte uit te kunnen stralen.

Enkele andere oplossingen uit het dierenrijk:

- zoeken van en koele plek onder de grond op warme jaar- of dagdelen;
- beperking van warmte-instraling door een schubbendek (reptielen) en door lichte lichaamskleuren.

Termietenheuvels

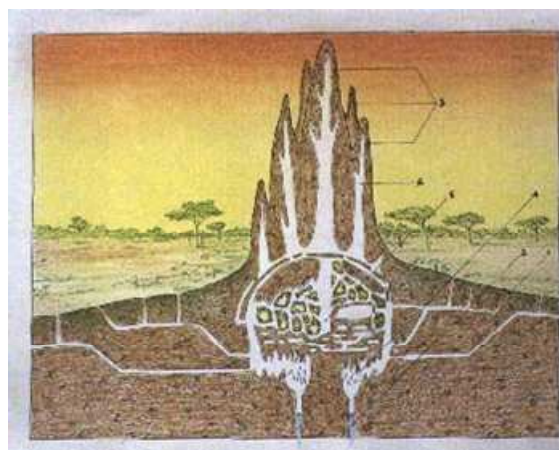
De kunstigste bouwers uit het dierenrijk zijn mieren, termieten en andere insecten (Hansell, 2008).

Klimaatbeheersing is vooral van belang voor sommige Afrikaanse termietensoorten die voor hun voedselvoorziening afhankelijk zijn van een schimmel die alleen rond 30°C gedijt.

Deze termieten maken in hun termietenheuvels gebruik van de volgende duurzame koelmethoden:

- Natuurlijke ventilatie: 's-nachts wordt via openingen in de toren warme lucht afgevoerd en koude lucht aangezogen; overdag wordt overdadige warmte op soortgelijke wijze afgevoerd.
- Koudebuffering in het constructiemateriaal
- Benutting van natuurlijke koudebronnen: gebruik van koel (grond)water.

- Verdampingskoeling.
- Isolatie: de constructie heeft een hoge isolatiewaarde.
- Intelligente regeling: termieten zijn voortdurend bezig met openen en sluiten van ventilatieopeningen, gericht op het handhaven van een optimale temperatuur.



Illustratie: doorsnede van een termietenheuvel. (bron http://www.exchangedlife.com/Creation/termite_towers.htm)

Duurzame koelen volgens de principes van termietenheuvels

Het principe van klimaatbeheersing in termietenheuvels is geïmplementeerd in het gebouw Eastgate Centre in Harare (1995). Het klimaat in Harare wordt voor het grootste deel van het jaar gekenmerkt door koele nachten (tot 10°C) en hoge temperaturen overdag (to t 40°C). Bovenstaande principes zijn als volgt ingevuld:

- Toepassing van grote hoeveelheden beton (thermische massa).
- Goede isolatie.
- Beperkt raamoppervlak om warmte-instraling te beperken.
- Schermen boven de ramen minimaliseren directe instraling van zonlicht.
- 's-Nachts wordt het gebouw afgekoeld door ventilatie.
- Een groot aantal "thermal chimneys" op het dak zorgen voor afvoer van warmte door natuurlijke convectie bij weinig/geen wind.
- Overdacht wordt koude uit de lagere verdiepingen gebruikt voor koeling van de hogere verdiepingen.

Renewable Cooling

- Koeling m.b.v. verdampingskoeling onder in het gebouw.
- Gerichte sturing van ventilatoren voor circulatie en ventilatie.

Klimatisering van dit gebouw vergt slechts 10% energie ten opzichte van de situatie met volledige airconditioning. Bij de bouw is M\$3.5 bespaard op installatiekosten (10% van de totale bouwkosten). De principes zijn inmiddels ook in andere gebouwen in de regio toegepast, o.a. van Harare International School (in 2002).



Het gebouw van Eastgate Centre, herkenbaar aan de schoorstenen. (source: Wikipedia/Mick Pearce)

Bronnen

M. Hansell (2008): *Built by Animals. The Natural History of Animal Architecture*. Oxford University Press.

Arup

Japan Times

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, tel. 0317-480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
Sietze van der Sluis, TNO, tel. 088-8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

Dit renewable cooling onderzoek wordt uitgevoerd met praktische input van NVKL en met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken; regeling *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Renewable Cooling

Factsheet

9 maart 2009

Alternatieven voor koeling

Waarom koelen?

Koelen is gericht op:

- comfort (woningen, utiliteiten, etc.)
- houdbaarheid van producten (vooral voedsel):
 - remmen microbiologisch bederf (bacterieel, schimmels, gisten),
 - remmen rijpingsprocessen (voor fruit),
 - remmen van enzymatische processen (enzymatische activiteit hangt af van temperatuur en pH),
 - remmen van chemische processen zoals oxidatie (van o.a. vetten),
 - beperken van vochttransport en andere vormen van kwaliteitsverlies door temperatuurschommelingen
- aansturen van fysische, chemische en biologische processen in productieprocessen.

Comfort-klimatisering

Koelbehoefte kan worden beperkt door o.a.:

- verbetering van isolatie
 - beperken van warmte instraling (zonwering, kleine ramen, etc.)
 - gericht omgaan met ventilatie
 - toepassen van "koude" kleuren
 - beperken van warmteproductie (gebruik van zuinig elektrische apparaten zoals lampen en computers)
- Sommige maatregelen leiden tot vergroting van verwarmingsbehoefte tijdens koude periodes. Genuanceerd ontwerpen is noodzakelijk!

Gekoelde bewaring

Verschillende maatregelen zijn mogelijk om de behoefte voor koeling te beperken. Gangbare methodes zijn:

- Steriliseren van voedselproducten door verhitting (minstens 120°C). Door de hittebehandeling worden micro-organismen en sporen gedood en enzymen geïnactiveerd. Na sterilisatie kunnen producten ongekoeld bewaard worden. De verhitting heeft negatieve effecten op smaak en voedingswaarde van de producten.
- Doorstraling is een alternatief voor de hittebehandeling. Dit principe is zeer gebruikelijk in o.a. de VS, maar omstreden in de EU.
- Klassieke bewerkingen zoals drogen, zouten, roken, inleggen in olie, vacumeren en fermenteren (zoals yoghurt). Deze methoden maken koeling overbodig of verlengen de houdbaarheid van gekoelde producten. Ze veranderen in verschillende mate de voedingswaarde en smaak van de producten.
- Verkorten van bewaarperiodes door veranderingen in planning, logistiek, etc.

Andere methoden maken koeling niet overbodig, maar dragen bij aan houdbaarheid bij koeling:

- Pasteuriseren (vaste of verpakte producten: blancheren) is een hittebehandeling op minder hoge temperatuur. Het deel van de micro-organismen en enzymen dat daarbij wordt gedood/geïnactiveerd hangt af van de temperatuur en verblijftijd. Sporen worden niet afgedood. Daarom kan deze behandeling de houdbaarheid wel verbeteren maar blijft koeling noodzakelijk.
- Toevoeging van conserveermiddelen: vaak noodzakelijk om voldoende lange bewaarperiode mogelijk te maken, maar niet voldoende voor ongekoelde bewaring.

Nieuwe technieken voor voedselconservering

Enkele innovatieve milde conserveringstechnologieën die klassieke processen kunnen vervangen maar kwaliteitsverlies beperken:

- PEF: behandeling met pulserend elektrisch veld (Pulsed Electric Field). De werking hiervan berust op het selectief uitschakelen van ziektekiemen en bederforganismen. Volgens de huidige stand van techniek geschikt voor pasteurisatie; gekoelde bewaring blijft dus nog noodzakelijk. Door sterilisatie m.b.v. PEF (nog in onderzoek) zou bijvoorbeeld 9PJ energie in zuivelketens kunnen worden bespaard.
- High pressure processing: Door toepassing van hoge druk kunnen micro-organismen worden afgedood, terwijl kwaliteitsverlies van het voedingsmiddel beperkt wordt ten opzichte van gangbare thermische processen. Ook dit proces is operationeel voor pasteurisatie, maar zit voor sterilisatie nog in de onderzoeksfase.



Productieprocessen

Duurzame innovaties variëren van procesintensificatie tot ontwikkeling van nieuwe processen. Deze ontwikkelingen zijn proces- en toepassingspecifiek.

Informatiebronnen

Joppen, L. & A.M. Matser: Steriliseren onder hoge druk : prijs voorlopig nog een drempel. *Elsevier Voedingsmiddelen Industrie* 8 (2007) 7.
<http://www.voedingscentrum.nl/EtenEnHerkomst/Productie/Productietechnieken/>

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, tel. 0317-480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
 Sietze van der Sluis, TNO, tel. 088-8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

Dit renewable cooling onderzoek wordt uitgevoerd met praktische input van NVKL en met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken; regeling *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.

Renewable Cooling

Factsheet

6 maart 2009

Duurzaam koelen met gebruik van mechanische koeling

Waarom mechanisch koelen?

Voor koeltechnische toepassingen zijn duurzame koeltechnieken nog niet concurrerend. Voorlopig zullen gangbare koeltechnieken noodzakelijk blijven; ook daarmee zijn nog aanzienlijke energiebesparingen mogelijk.

Optimalisatie van technisch ontwerp

- Optimaal ontwerp, goed afgestemd op het benodigde vermogen. Belangrijke argumenten:
 - bij lage deellast is sprake van verlaagd rendement
 - elke graad verhoging van de verdampertemperatuur bespaart zo'n 2-4% van de verbruiksenergie van een compressor (SenterNovem, 2008).
- Beperken van indirecte systemen (elke overdracht vereist een temperatuurverschil als drijvende kracht; bovendien moet elk medium worden aangedreven door pompen/ventilatoren die energie verbruiken en ook energie in het systeem brengen).
- Benutting van restwarmte.
- Duurzaam koelen van condensor. Elke graad verlaging aan de condensorzijde levert een energiebesparing op van 2 tot 3% (SenterNovem, 2008). Hierbij kan gebruik gemaakt worden van een eventueel beschikbare koudebron of verdampingskoeling (koeltoren).

Kosten-baten analyse koeltoren op condensor

Aannames:

- gebruik leidingwater (kostprijs €1/m³).
- 50% van het water wordt gespuid.
- lozing spuiwater op het riool kost €3/m³.
- prijs elektriciteit €0.10/kWh.
- condensortemperatuur wordt 10 graden verlaagd (energiebesparing koelmachine 25%)
- COP koelmachine 3.5

Resultaten per GJ warmteafvoer:

- totaal waterverbruik: 1 m³.
- kosten water inclusief lozingskosten: €2.50.
- kosten hulpstoffen: €0.40
- besparing energiekosten: €2

Blijkbaar is een recht-toe-recht-aan inpassing niet zo maar rendabel. In Jaarboek Water (2007) wordt een voorbeeld besproken waarin door gebruik van gedemineraliseerd water de variabele kosten worden gereduceerd met 2/3 waardoor de kosten-baten volgens bovenstaand voorbeeld wél positief uitvallen: kosten €1,- bij besparing van €2,- per GJ.

Regeltechnische optimalisatie

- Product-gerichte benutting van de acceptabele temperatuur-bandbreedte. Energiebesparing is mogelijk door:
 - Beperken van frequentie van starten en stoppen; dit resulteert in energiebesparing en vermindert slijtage.
 - Koelen bij gunstige weerscondities. Volgens langjarige gemiddelden van het KNMI ligt de gemiddelde minimale etmaaltemperatuur 8 graden lager dan de gemiddelde maximale temperatuur. Koelen op koude dagdelen is dus vele procenten efficiënter dan op warmere dagdelen.
- Beperken van schakelmomenten van compressoren (resulteert in energiebesparing en vermindert slijtage) door:
 - Toepassing van frequentie-geregelde compressoren,
 - Toepassing van indirecte systemen met centrale koudeproductie en distributie naar verschillende koudevragers (met verschillende dynamiek in vraag).
 - Toepassing van koude buffers (bijvoorbeeld een ijsslurry die ook als distributiemedium dient).
- Gebruik van intelligente regelsystemen (afstemmen van processturing op basis van actuele belasting om overmatig energieverbruik te voorkomen).

Quest: energiebesparing door productgerichte sturing van koelsystemen

Quest is een nieuw regelsysteem voor koelunits van reefer-containers, gericht op fruit. Quest reduceert het energieverbruik voor koelen van bederfelijke producten tijdens containertransport met ongeveer 50%, terwijl de kwaliteit optimaal blijft. Quest stuurt de koelunit aan op basis van de werkelijke behoefte van het product. Grote internationale spelers rollen het systeem wereldwijd uit. In 2009 zijn al ca. 200.000 containers van Maersk Line met dit systeem zijn uitgerust. Dit levert dan een jaarlijkse besparing van 380.000 ton CO₂-emissie. Dat is vergelijkbaar met de uitstoot van 2.3 miljard auto km's. Quest is ontwikkeld door een samenwerkingsverband tussen AFSG Wageningen UR, Maersk Line en Carrier Transicold.

De ontwikkeling is gesteund door de Nederlandse overheid (van het ministerie van EZ via het EET programma en van het ministerie van LNV).

Informatiebronnen

Jaarboek Water (2007). Kluwer, België.
SenterNovem (2008): *Best Practice. Efficiënt toepassen van warmtepomp- en koeltechniek.* Rapport.



Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl

Dit onderzoek wordt uitgevoerd in samenwerking met TNO, onder begeleiding van NVKL en met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken; regeling Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT).

Renewable Cooling

Factsheet

9 Mar. 2009

Renewable cooling: optimal design and control largely reduces need of mechanical cooling

The task of finding an optimal design and control sequence for a cold store may be treated as a mathematical problem. An algorithm to solve this problem has successfully been applied to a cold store in simulation, resulting in an insight into the cost effectiveness of specific refrigeration technologies. For an example cold store in The Netherlands evaporative cooling is shown to be too expensive, while ventilation in combination with mechanical refrigeration is economically viable if the cold store is to be used in January.

Most food in consumers' fridges has spent some time in a cold store. Such stores are essential to the world's food supply chains. The amount of electricity consumed by such stores is vast: in the Netherlands this amounts to 7 PJ annually at a cost of M€ 200. Consequentially one design criterion for cold stores is a minimisation of costs. This can be achieved through reducing investment costs and by saving energy during operation. Sustainable cooling technologies make such energy savings possible, but are weather dependent and often have high investments costs. Hence a combination of technologies is required, and deciding which combination and which capacity needs to be installed is a problem that must be tackled in the design stage.

In practise hardware design and controller design are two separate processes, where the control design is adapted to the apparatus that has been chosen based on static design rules. This two-step process is almost always suboptimal with respect to minimizing both investment *and* operating costs. A fully optimal solution may be achieved if both hardware design and control design are treated as a single, integrated problem.

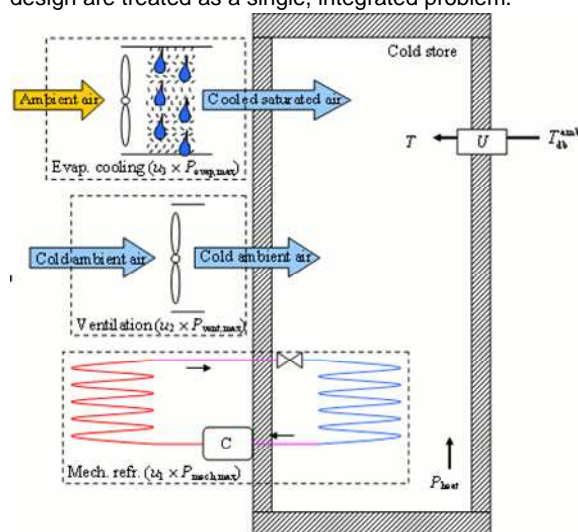


Figure 1. Schematic cold store

Methodology: OCDP

Mathematical methods for finding optimal designs and optimal control sequences may be combined in one Optimal Control and Design Problem (OCDP). This problem is solved by an iterative algorithm, which simultaneously searches for the most effective combination of design *and* control parameters using:

- a dynamical process model of the cold store;
- installation and exploitation costs and refrigeration capacity per cooling technology;
- (predicted) disturbances acting on the model;
- user-defined boundary conditions.

Example: mechanical cooling of potato storage needed?

Consider a potato cold store in the Netherlands (Fig. 1), equipped with mechanical refrigeration (u_1), ventilation (u_2) and evaporative cooling (u_3). The control aim is to keep the temperature T around 5 ± 0.5 °C while the ambient air conditions T_{db} (dry bulb) and T_{dp} (dewpoint) vary. The electricity tariff e is variable.

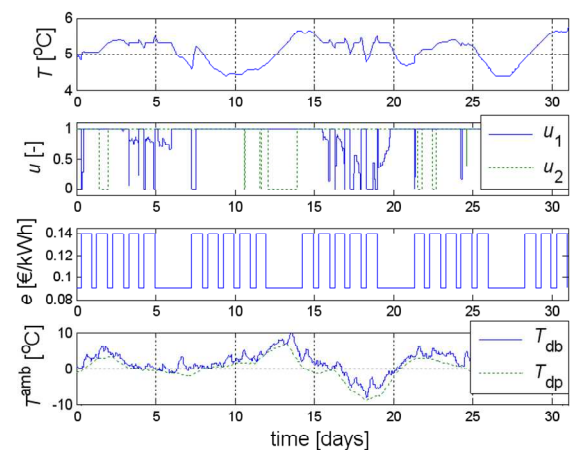


Figure 2. Optimal control solution for potato storage studied; January solution.

The OCDP is solved for January (results in Fig. 2; $u_3=0$). The optimal design consists of installing 17.5 W/m^3 mechanical refrigeration capacity and $3.2 \text{ (m}^3\text{/h)/m}^3$ ventilation capacity, with u_1 and u_2 their respective

Renewable Cooling

optimal control sequences. Furthermore, when both technologies are installed, the control sequence prefers ventilation over mechanical refrigeration to reduce operating costs. Evaporative cooling is not cost-effective in this specific situation, and is not installed.

Example: cooling control oriented at product's needs

Even with existing cooling equipment, substantial energy savings are possible. This is demonstrated by the development of the QUEST concept. QUEST uses an innovative control of refrigeration of perishable products during container transportation. The principle of Quest is that the refrigerating system of the container works optimally based on the actual needs of the specific product. Quest only involves changes to the software of the cooling unit and is therefore easy to implement. Supported by years of research, experiments in the laboratory and on test journeys, much confidence in the method has been generated such that it has been implemented on a large scale. QUEST reduces the energy need for reefer refrigeration by averagely 50%. It is being implemented world-wide.

QUEST was developed by AFSG, in co-operation with Maersk Line and Carrier Transicold, with financial support by the Dutch ministry of economic affairs

(program EET) and the Dutch ministry of Agriculture, Nature and Food Safety.

Conclusions

Through optimal design and control still substantial savings of energy use for cooling can be achieved. In essence, relating knowledge at various levels is crucial for optimal systems:

- product level (what are actual demand from the product);
- knowledge about the external loads (preferably including predictions for coming period);
- system behaviour.

Above examples demonstrate saving potential.

Sources and further info

Lukasse, L.J.S., J.E. de Kramer-Cuppen and A.J. van der Voort (2007): A physical model to predict climate dynamics in ventilated bulk-storage of agricultural produce. *International Journal of Refrigeration*, **30**, pp. 195-204.

Contact: Leo Lukasse, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480201, e-mail leo.lukasse@wur.nl
Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
Sietze van der Sluis, TNO, Phone +31.88.8662206 email Sietze.vanderSluis@tno.nl

This renewable cooling research is executed with practical input by NVKL and financial support by the Dutch Ministry of Economic Affairs; program *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*.



Renewable Cooling

Renewable Cooling

Bijlage C: Duurzaam koelen voor verschillende toepassingen

Renewable Cooling

Infosheet

25 november 2009

Duurzame koeling voor koel- en vrieshuizen

In het kader van Europese afspraken heeft Nederland de volgende doelen:

- 2% energiebesparing per jaar,
- 20% duurzame energie in 2020,
- 30% reductie van broeikasgasemissies in 2020 in vergelijking met 1990.

Koel- en vrieshuizen verbruiken jaarlijks ongeveer 2.3PJ primaire energie voor koelen en vriezen (10% voor invriezen, 55% voor bevroren bewaring en 35% voor inkoelen en gekoelde bewaring).

Voor soortgelijke toepassingen wordt door de voedselindustrie nog eens 9.5PJ primaire energie verbruikt.

Voor verduurzaming van koel- en vrieshuizen zijn verschillende maatregelen mogelijk.

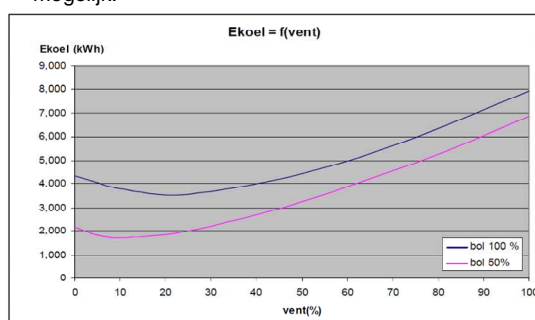
Efficiënte systemen met compressiekoelmachines

- Duurzame koudemiddelen (zoals natuurlijke koudemiddelen), bij voorkeur met directe systemen. Ongeveer een kwart van de broeikasgasemissies voor koelen en vriezen wordt veroorzaakt door lekkage van koudemiddelen. Doordat duurzame koudemiddelen amper bijdragen aan het broeikaseffect, levert deze stap een grote besparing op!
- Efficiënte systemen en besturing.

Keuze voor energie-efficiënte systemen is gangbare praktijk.

Beperken van de koudevraag

- Toepassen van efficiënte, frequentieregelde, ventilatoren. Besparen tot enkele procenten koelenergie.
- Koudeterugwinning uit ventilatielucht. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van warmtepijpen en andere effectieve warmtewisselaars.
- Minimaliseren van ventilatie. Door koudeterugwinning en minimaliseren van ventilatie zijn tientallen procenten energiebesparing mogelijk.



Figuur 1. Relaties tussen ventilatie en verbruik van koelenergie in bollenbewaring. (Bot & Wildschut, 2008)

- Verder zijn nog talrijke andere maatregelen mogelijk, zoals optimalisatie van isolatie, energiezuinige verlichting, etc.

Praktisch voorbeeld: efficiënt koelen van containers

Door aanpassing van besturing van de klimaatunits van reefer containers zijn grote besparingen mogelijk.

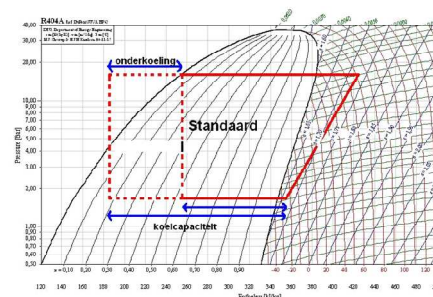
Quest is een nieuw regelsysteem voor koelunits van reefer-containers, gericht op fruit. Quest reduceert het energieverbruik voor koelen van bederfelijke producten tijdens containertransport met ongeveer 50%, terwijl de kwaliteit optimaal blijft.

Grote internationale spelers rollen het systeem wereldwijd uit. In 2009 zijn al ca. 200.000 containers van Maersk Line met dit systeem zijn uitgerust. Dit levert dan een jaarlijkse besparing van 380.000 ton CO₂-emissie. Dat is vergelijkbaar met de uitstoot van 2.3 miljard auto km's. Quest is ontwikkeld door een samenwerkingsverband tussen AFSG Wageningen UR, Maersk Line en Carrier Transicold, met steun van het ministerie van EZ via het EET programma en van het ministerie van LNV.

Duurzame koelsystemen

Voor koel- en vrieshuizen liggen duurzame koeltechnieken gekoppeld aan compressiekoelmachines het meest voor de hand:

- Warmteterugwinning van condensors (bijvoorbeeld voor verwarmingstoepassingen). Hierdoor is een totale energiebesparing rond 10% mogelijk (SenterNovem, 2005). Helaas is vaak geen gebruiker in de omgeving van het koel- of vrieshuis aanwezig. Terugverdientijd: 3 tot 6 jaar.
- Toepassing van onderkoeling: afkoeling van het vloeibare koudemiddel na de condensor door gebruik van bijvoorbeeld bodemkoude. De potentiële besparing is sterk afhankelijk van het gekozen systeem (in de literatuur worden besparingen tussen 5 en 25% genoemd). Een besparing van 10% is realistisch (Van der Sluis, 2009). Terugverdientijd: 3 tot 6 jaar



Figuur 2. Vergroting van koelcapaciteit door onderkoeling

- Verlaging van de condensortemperatuur bijvoorbeeld door gebruik van bodemkoeling, waterkoeling (natte condensor) of een andere duurzame koelmethode.

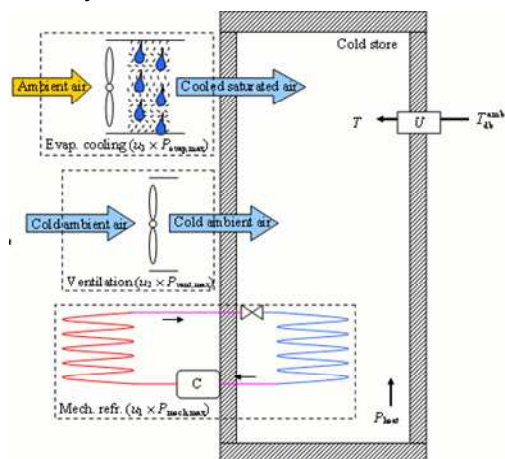
Renewable Cooling

- Een vuistregel: 0,6% energiebesparing per graad temperatuurverlaging. Potentiële energiebesparing tot enkele tientallen procenten.

Duurzame alternatieven voor compressiekoelmachines zijn voor koel- en vrieshuizen nog niet haalbaar:

- Warmte-gedreven koeling heeft bij de vereiste lage temperaturen een laag rendement; ook ontbreekt in de meeste gevallen een voldoende hoogwaardige warmtebron.
- De mogelijkheden van de huidige systemen voor verdampingskoeling zijn in veel gevallen niet geschikt voor het vereiste temperatuurbereik.
- Warmtepijpen (of andere effectieve warmtewisselaars) zijn alleen interessant als een koude bron lokaal beschikbaar is.
- Nachtstraling biedt slechts een gering koelvermogen in een klein deel van het jaar.

Combinaties van duurzame en gangbare koelsystemen?



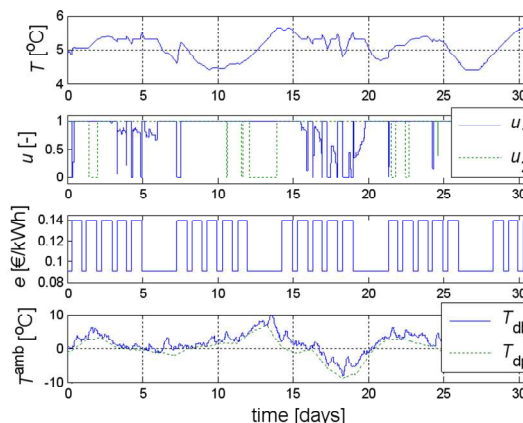
Figuur 1. Combinaties van koelmethoden

Bij toepassingen van duurzame koeling zal in de praktijk combinaties van koeltechnieken worden gekozen.

Als voorbeeld wordt hier gekeken naar een aardappelopslag, te voorzien van mechanische koeling (u_1), ventilatie (u_2) en/of verdampingskoeling (u_3). De voorgeschreven bewaartemperatuur is 5°C (met tolerantie van 0,5). De omgevingstemperatuur zijn van een gemiddeld jaar in de Bilt.

In een ontwerpstudie is geoptimaliseerd naar totale kosten-baten. Daaruit komen de volgende resultaten naar voren:

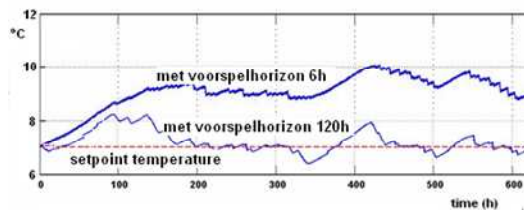
- dauwpuntkoeling is geen van de scenario's haalbaar vanwege de (huidige) hoge investeringskosten;
- als het systeem alleen tijdens wintermaanden wordt gebruikt, is een combinatie van mechanische koeling en ventilatiekoeling het meest aantrekkelijk.
- als het systeem gedurende het hele jaar wordt gebruikt, wordt het optimale systeem alleen van mechanische koeling voorzien. Investerings in duurzame koelmethoden (die alleen tijdens koudere periodes gebruikt worden) zijn niet terug te verdienen tijdens deze koudere maanden.



Figuur 2. Optimal control oplossing voor aardappelopslag klimaatsysteem met natuurlijke ventilatie en compressiekoeling. Geoptimaliseerd voor gebruik tijdens wintermaand.

Verbering kansen duurzaam koelen door maatwerk

Een voorbeeld: door benutting van weersdynamiek en variaties in koudevraag kunnen condities voor duurzame koeling sterk verbeteren. De volgende figuur toont het effect van inspelen op weersvoorspelling voor temperatuurbeheersing door natuurlijke ventilatie.



Figuur 3. Inspelen op dynamiek verbetert de prestaties van duurzaam koelen.

Conclusies

Het toepassen van energie-efficiënte systemen en duurzame koudemiddelen levert grote besparing op broeikasgasemissies. Daarnaast kan met duurzame technieken de efficiëntie van de compressiekoelmachines nog met ongeveer 10% worden verhoogd (is al deels gangbare praktijk).

Alternatieven voor compressiekoelmachines zijn beperkt geschikt voor koel- en vrieshuizen.

Bronnen

- Bot, G. & J. Wildschut (2008): *Deskstudy koeling met minimaal energiegebruik bij bewaring van bloembollenplantgoed*. Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen, Nota 524
- Lukasse, L.J.S., J.E. de Kramer-Cuppen and A.J. van der Voort (2007): A physical model to predict climate dynamics in ventilated bulk-storage of agricultural produce. *International Journal of Refrigeration*, **30**, pp. 195-204.
- van der Sluis, S.M. (2009): Renewable Cooling voor supermarkten, RCC-Koude en Luchtbehandeling, 102: 30-35.

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
Edo Wissink, TNO, Phone +31.88.86622=17 e-mail edo.wissink@tno.nl

Het onderzoeksproject Renewable Cooling wordt uitgevoerd met praktische begeleiding van de NVKL en financiële steun van het ministerie van Economische Zaken (programma *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*) en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit

Renewable Cooling

Infosheet

24 november 2009

Duurzame koeling voor supermarkten

In het kader van Europese afspraken heeft Nederland de volgende doelen:

- 2% energiebesparing per jaar,
- 20% duurzame energie in 2020,
- 30% reductie van broeikasgasemissies in 2020 in vergelijking met 1990.

Het jaarlijks energieverbruik voor koeling in de industrie en dienstensectoren bedraagt in Nederland ongeveer 50PJ.

Daarvan wordt ongeveer 14% verbruikt in supermarkten. Door de stijgende vraag naar koelverse en diepvriesproducten blijft de koelvraag toenemen.

Voor verduurzaming van supermarktkoeling zijn verschillende maatregelen mogelijk:

Toepassing van energie-efficiënte systemen met compressiekoelmachines

- Energie-zuinige koelmeubelen
A-klasse meubelen verbruiken 45% minder energie dan het markt-gemiddelde.
- Duurzame koudemiddelen (zoals natuurlijke koudemiddelen), bij voorkeur met directe systemen. Ongeveer een kwart van de broeikasgasemissies voor koelen en vriezen wordt veroorzaakt door lekkage van koudemiddelen. Doordat duurzame koudemiddelen amper bijdragen aan het broeikas-effect, levert deze stap een grote besparing op!

Keuze voor energie-efficiënte systemen is gangbare praktijk.

Beperken van de koudevraag

- Afdekken van koelmeubelen. Deze maatregel heeft een energiebesparingspotentieel tot rond 40%.
- Veranderen van inrichting van de winkels (bijvoorbeeld met een koelsectie)
- Alternatieve vormen om koelverse producten aan te bieden, bijvoorbeeld met single-product displays.

Deze maatregelen kennen (bij nieuwbouw) theoretisch een korte terugverdientperiode. Echter, ze veranderen ook de presentatievorm aan de consument en zijn daarom omstreden.

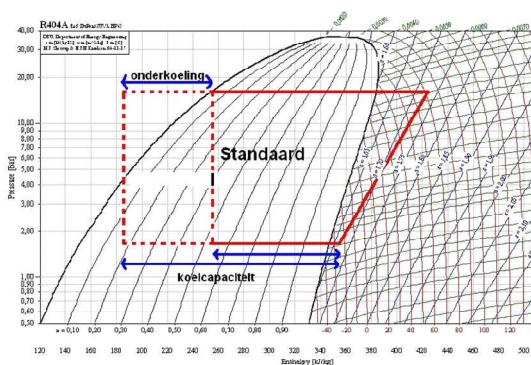


Duurzame koelsystemen

Voor supermarkten liggen duurzame koeltechnieken gekoppeld aan compressiekoelmachines het meest voor de hand:

- Warmteterugwinning van condensoren (bijvoorbeeld voor verwarmingstoepassingen). Hierdoor is een totale energiebesparing rond 10% mogelijk (SenterNovem, 2005)
Terugverdientijd: 3 tot 6 jaar.
- Toepassing van onderkoeling: afkoeling van het vloeibare koudemiddel na de condensor door gebruik van bijvoorbeeld bodemkoude. De potentiële besparing is sterk afhankelijk van het gekozen systeem (in de literatuur worden besparingen tussen 5 en 25% genoemd; Van der Sluis (2009) noemt 10%). Een vuistregel: 0,6% energiebesparing per graad temperatuurverlaging.
Terugverdientijd: 3 tot 6 jaar

Renewable Cooling



Figuur 1. Vergroting van koelcapaciteit door onderkoeling

- Verlaging van de condensortemperatuur bijvoorbeeld door gebruik van bodemkoeling, waterkoeling of een andere duurzame koelmethode. Potentiële energiebesparing tot enkele tientallen procenten. Het volledig koelen van de condensor met bijvoorbeeld bodemkoude of een andere duurzame koelvorm vergt relatief hoge investeringen en kent een lange terugverdientijd.

Duurzame alternatieven voor compressiekoelmachines zijn voor supermarkten voorlopig minder relevant:

- Warmte-gedreven koeling heeft bij de vereiste lage temperaturen een laag rendement;

- De mogelijkheden van de huidige systemen voor verdampingskoeling zijn niet geschikt voor het vereiste temperatuurbereik;
- Warmtepijpen (of andere effectieve warmtewisselaars) zijn alleen interessant als een koude bron lokaal beschikbaar is.
- Nachtstraling biedt slechts een gering koelvermogen in een klein deel van het jaar.

Conclusies

Het toepassen van energie-efficiënte koelmeubelen en duurzame koudemiddelen levert tientallen procenten besparing op broeikasgasemissies. Daarnaast kan met duurzame technieken de efficiëntie van de compressiekoelmachines nog met ongeveer 10% worden verhoogd.

Alternatieven voor compressiekoelmachines zijn nog niet geschikt voor supermarkten.

Bronnen

van der Sluis, S.M. (2009): Renewable Cooling voor supermarkten, RCC-Koude en Luchtbehandeling, 102: 30-35.

SenterNovem (2005): De keuze van koel/vriessystemen in supermarkten (brochure)

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl

Edo Wissink, TNO, Phone +31.88.86622=17 e-mail edo.wissink@tno.nl

Het onderzoeksproject Renewable Cooling wordt uitgevoerd met praktische begeleiding van de NVKL en financiële steun van het ministerie van Economische Zaken (programma *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*) en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit

Renewable Cooling

Infosheet

23 november 2009

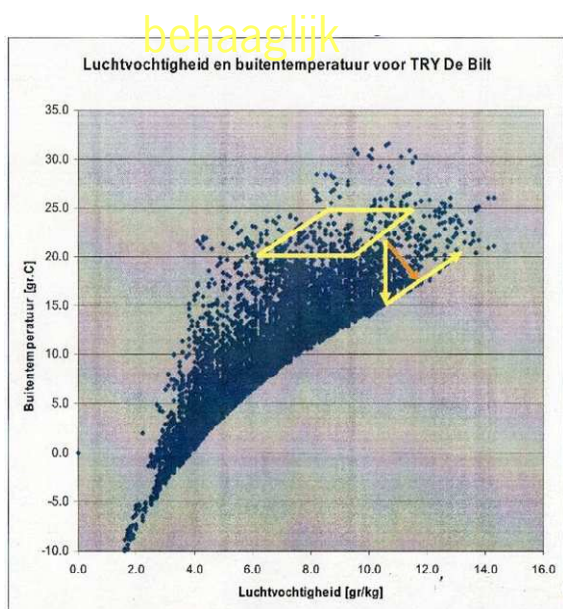
Duurzame koeling voor utiliteiten en woningen

In het kader van Europese afspraken heeft Nederland de volgende doelen:

- 2% energiebesparing per jaar,
- 20% duurzame energie in 2020,
- 30% reductie van broeikasgasemissies in 2020 in vergelijking met 1990.

Het jaarlijks energieverbruik voor koeling van utiliteiten (waaronder kantoorgebouwen en ziekenhuizen) bedraagt rond 4PJ primaire energie.

Utiliteiten worden op relatief hoge temperatuur gekoeld. Voor de meeste dagen van het jaar biedt de buitenlucht voldoende ruimte voor koeling:



Zelfs in de warmste periodes van het jaar ligt de nachttemperatuur behoorlijk onder de gewenste maximale (koel)temperatuur.

Zwakke punten zijn:

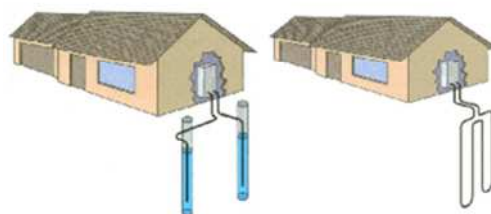
- Koelzekerheid kan niet worden gegarandeerd.
- Als de omgevingstemperatuur slechts licht onder de setpointtemperatuur ligt, is een relatief groot luchtdebiet nodig; een flinke koudebuffer kan niet of gering worden gevuld.

Warmte- en koudeopslag

Dit principe maakt gebruik van warmtepompen, maar met hogere efficiëntie dan gangbare compressiekoelmachines. Zowel open als gesloten systemen zijn mogelijk.

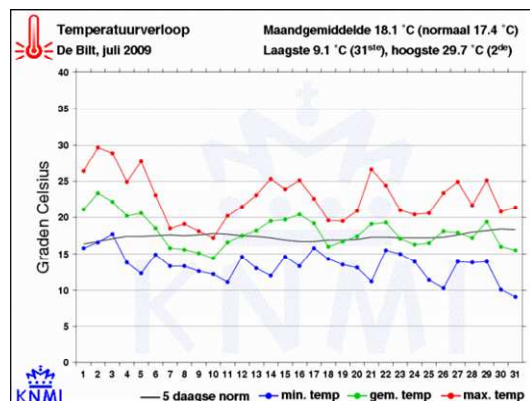
Zwakke punten:

- De bodem is niet overal geschikt.
- Tussen verschillende systemen is voldoende afstand nodig.
- Voldoende schaalgrootte is nodig om investeringen in bodemwarmtewisselaars (of aquifers) terug te verdienen.



Duurzaam koelen: natuurlijke ventilatie

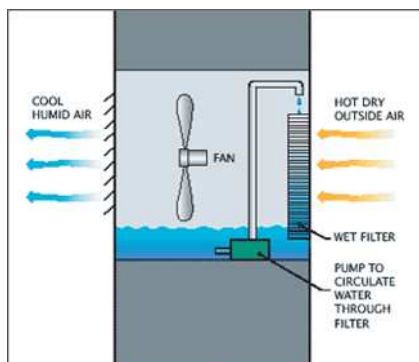
Natuurlijke ventilatie is de meest eenvoudige manier van duurzaam koelen.



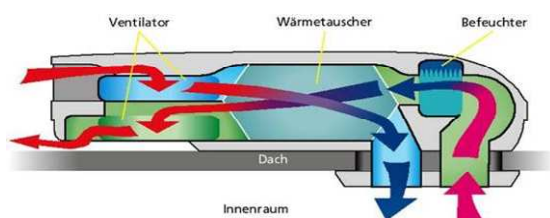
Verdampingskoeling

Verdampingskoeling (dauwpuntskoeling) biedt mogelijkheden om met minimaal energieverbruik onder de omgevingstemperatuur te koelen.

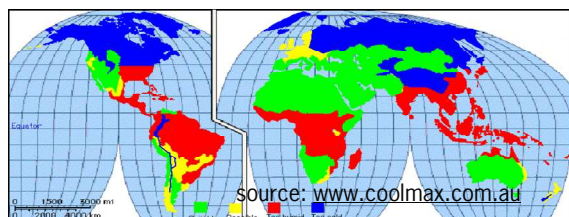
Renewable Cooling



Figuur 1. Directe verdampingskoeling.



Figuur 2. Indirecte verdampingskoeling



Figuur 3. Mondiale toepasbaarheid van verdampingskoeling

Verdampingskoeling vormt een prima aanvulling op natuurlijke ventilatie, omdat met beperkte aanpassingen tot onder de omgevingstemperatuur gekoeld kan worden (vooral overdag; vaak blijft het dauwpunt rond het niveau van de nacht).

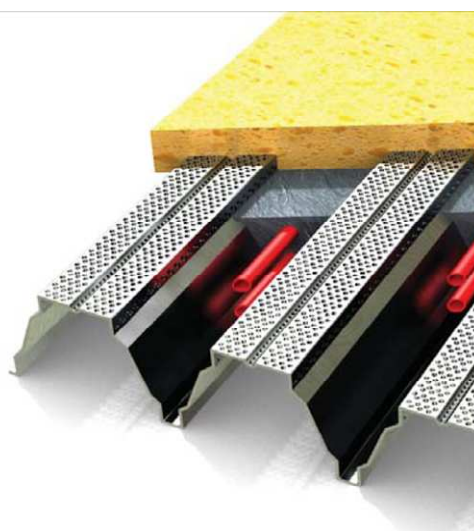
Zwakke punten:

- bij hoge luchtvochtigheden is het effect t.o.v. natuurlijke ventilatie gering;
- toch nog aanzienlijke investeringskosten (zullen wel dalen zodra de markt ontwikkeld is).

Koudebuffering

Door koudebuffering worden mogelijkheden van duurzame koeling aanzienlijk verbeterd. Immers, de beschikbaarheid van duurzame koude en de behoefte aan koeling zijn niet in fase (maximaal 's-nachts resp. overdag).

Voor utiliteiten is koudeopslag in faseovergangsmaterialen in wanden en/of plafonds het meest interessant. Hiervoor komen steeds meer nieuwe systemen beschikbaar.



Figuur 4. Koelplafond materiaal van Corus

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
Edo Wissink, TNO, Phone +31.88.86622=17 e-mail edo.wissink@tno.nl

Het onderzoeksproject Renewable Cooling wordt uitgevoerd met praktische begeleiding van de NVKL en financiële steun van het ministerie van Economische Zaken (programma *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*) en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Renewable Cooling

Infosheet

27 november 2009

Duurzame koeling voor datahotels/rekencentra

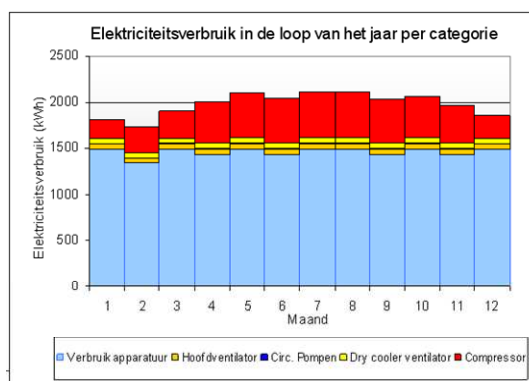
In het kader van Europese afspraken heeft Nederland de volgende doelen:

- 2% energiebesparing per jaar,
- 20% duurzame energie in 2020,
- 30% reductie van broeikasgasemissies in 2020 in vergelijking met 1990.

Het jaarlijks energieverbruik voor koeling van datahotels bedraagt rond 5PJ primaire energie en groeit snel. Dit is nu al 1/10 van het totale energieverbruik voor koeling in Nederland.

		2002	2006	2008
Netto datavloeroppervlak	[m ²]	123.000	130.000	168.000
Gewogen ontwerpvermogen datavloer	[W/m ²]	940	1.050	1.240
Gewogen specifiek elektriciteitsgebruik datacenter	[MWh/jaar/m ²]	2,9	4,9	5,7
Totaal elektriciteitsgebruik datacenters	[TWh/jaar]	0,36	0,63	0,95

Figuur 1. Overzicht van specifieke datacenter gegevens (bron: Tebodin's datacenter database)



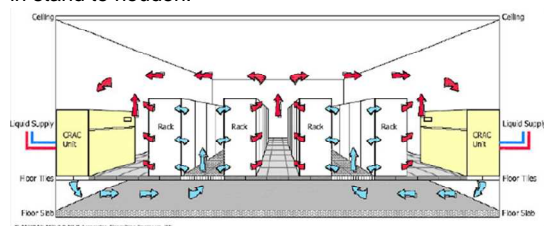
Figuur 2. Overzicht elektriciteitsverbruik van een typisch datacenter

Datacenters worden gekoeld op relatief hoge temperatuur. Ons milde klimaat biedt volop mogelijkheden om deze op duurzame wijze te koelen.

Knelpunten zijn echter de zeer hoge koelbelasting en de hoge eisen die aan de lucht worden gesteld (vuil en vochtgehalte).

Huidige stand van de techniek

In data centers staan vele computer racks opgesteld, die luchtkoeling vereisen om de warmte af te voeren die de elektronica produceert. De lucht wordt aan de voorzijde van het rack toegevoerd, en aan de achterzijde van het rack wordt de opgewarmde lucht uitgeblazen. De racks beschikken over interne ventilatoren om deze luchtstroom in stand te houden.



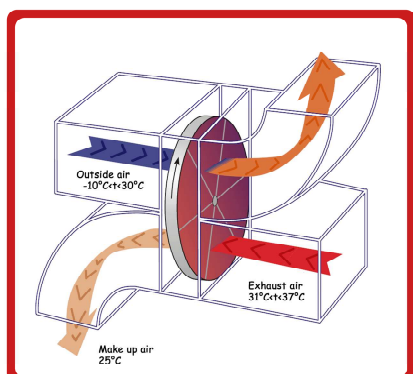
Het af te voeren vermogen van de ICT apparatuur ligt nu tussen 0,4 kW/m² en 1,5 kW/m², de verwachting is dat dit in enkele jaren verder zal stijgen tot 5 kW/m². De temperatuur waarbij de warmte moet worden afgevoerd werd vroeger laag gehouden (aanvoer 10 °C / 20 °C retour), maar tegenwoordig is gelukkig een tendens ontstaan naar hogere temperaturen in data centers (18 °C / 28 °C). Dit levert vanzelfsprekend een beter COP voor de koelmachine op.

Duurzame koeling voor datahotels

Bij een aanvoertemperatuur van 18 °C is het gebruik van buitenlucht voor een groot deel van het jaar een reële optie. Andere natuurlijke koelmethode kunnen daarmee gecombineerd worden om het effect te verbeteren:

- Gebruik maken van de natuurlijke koude in de buitenlucht of in oppervlaktewater. Uitwisseling van lucht kan worden voorkomen door gebruik van effectieve warmtewisselaars (bijvoorbeeld koudepijpen of een warmtewiel).

Renewable Cooling



Figuur 1. Warmtewiel oplossing (bron: www.uptimetechology.nl)

- Met verdampingskoeling (dauwpuntskoeling) kan tot onder de omgevingstemperatuur worden gekoeld. Met het oog op de gewenste luchtvochtigheidsbeheersing ligt een indirect systeem het meest voor de hand.
- Zongedreven (absorptie) koeling is een goed passende koelmethode (immers: vooral wanneer de zon schijnt, is koeling nodig). Dit principe wordt in o.a. Zuid-Oost Azië steeds populairder. Absorptiekoeling vereist een hoge temperatuur van de

thermische bron (bij voorkeur tegen of boven 100°C). De geavanceerde moderne zonnecollectoren zijn steeds beter in staat redelijke rendementen voor die hoge temperatuur te realiseren. Daardoor wordt toepassing van dergelijke systemen steeds realistischer. Helaas blijft een ander koelsysteem voor periodes met weinig zon noodzakelijk. De noodzaak van investering in een dubbel systeem belemmert de financiële haalbaarheid van deze duurzame koeloptie (bij huidige prijzen).

Bronnen

Een deel van bovenstaande tekst is ontleend aan: van der Sluis, S.M. (2009): Renewable Cooling voor datacenters, RCC-Koude en Luchtbehandeling, 102: 49-53.

Contact: Jan Broeze, AFSG Wageningen UR, phone +31.317.480147, e-mail jan.broeze@wur.nl
Edo Wissink, TNO, Phone +31.88.86622=17 e-mail edo.wissink@tno.nl

Het onderzoeksproject Renewable Cooling wordt uitgevoerd met praktische begeleiding van de NVKL en financiële steun van het ministerie van Economische Zaken (programma *Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (EOS-LT)*) en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit

