

Circulatievoud

Inleiding

De temperatuurspreiding in een gekoelde ruimte wordt in belangrijke mate bepaald door het circulatievoud van de lucht. Circulatievoud (in 1/uur) is de verhouding tussen het luchtdebiet van de koelers (in m^3/uur) en het lege volume (in m^3) van de gekoelde ruimte. De uitgeblazen koelerlucht verdeelt zich over drie luchtwegen. De eerste luchtweg keert via de kortste route terug naar de inlaat van de koeler. Deze ongewenste kortsluitstroming is te bestrijden door afsluitingen rondom de koelers en valse, c.q. beweegbare plafonds. De tweede luchtweg gaat door de stapeling in de gekoelde ruimte en wisselt daarbij warmte en vocht uit. De warmteproductie en de vochtafgifte van de producten in de stapeling veroorzaken een berekenbare temperatuurdaling of -stijging. De derde luchtweg stroomt langs de wanden, plafond en vloer en wisselt voornamelijk warmte en soms ook vocht uit.

De berekening gaat uit van het fysiologisch circulatievoud waarbij warmteproductie, vochtafgifte, stapeldichtheid en toelaatbaar temperatuurverschil invoergegevens zijn. Het praktisch circulatievoud is groter dan het fysiologisch circulatievoud als gevolg van de temperatuurregeling en de luchtverdeling. In deze berekening is hiervoor een eenvoudige factor gebruikt. Bij container transport zijn uitgebreidere rekenmethoden mogelijk.

Fysiologisch circulatievoud

Het circulatievoud in een gekoelde ruimte met geringe kortsluitstroming en goede isolatie, hangt af van de warmteproductie van de opgeslagen producten en de afmeting van de stapelenheid. Voor de netto stapeldichtheid $300 \text{ kg}/\text{m}^3$, een relatieve vochtigheid van 97 % en een lage specifieke vochtafgifte van de producten ($< 0.5^{10} \text{ kg}/(\text{kg}.\text{Pa.s})$) is in tabel 1 en tabel 2 het fysiologisch circulatievoud gegeven voor een temperatuurspreiding van 1 respectievelijk 2 K. De temperatuurspreiding van 1 K is te gebruiken bij langdurig (vele maanden) te bewaren producten (appel, peer, kool, wortelen). Voor actieve, kort bewaarbare producten, is een temperatuurspreiding van 2 K praktisch aanvaardbaar.

Het circulatievoud is praktisch recht evenredig met de stapeldichtheid. Bij dichtheid $600 \text{ kg}/\text{m}^3$, warmteproductie $10 \text{ W}/\text{ton}$ en afstand $0,4 \text{ m}$ is het circulatievoud $10,6 \text{ 1}/\text{uur}$. Het circulatievoud is omgekeerd evenredig met de temperatuurspreiding bij doorstroombewaring.

Praktisch circulatievoud

Uit onderzoek is gebleken dat de kortsluitstroming gemiddeld 25 % is van het luchtdebiet. Aangenomen wordt dat 8 % van het luchtdebiet langs de wanden stroomt, zodat 33 % van de lucht niet door de lading stroomt. Daarnaast is de temperatuurregeling van de gekoelde ruimte verantwoordelijk voor regelmatige temperatuurfluctuaties van $0,25 \text{ K}$ tot 2 K .

Tabel 1

Fysiologisch circulatievoud (1/uur) als functie van de warmteproductie van het product en afstand tussen de circulatiekanalen in de stapeling. De temperatuurspreiding in de stapeling is 1 K. De netto stapeldichtheid is 300 kg/m ³ . Het praktisch circulatievoud is 1,5 × groter.				
Warmteproductie W/ton	Afstand tussen circulatiekanalen in m			
	0,8	0,6 langsstroom	0,4	0,2-0 doorstroom
5	3,0	2,5	2,2	2,1
10	9,0	6,0	5,3	4,4
15	22	13	10,0	7,0
20	180	24	16	10,0
25		50	23	13
30		150	32	17
35			44	22
40			61	25
45			85	28
50			126	32
75				52

Dit effect vraagt om een hoger circulatievoud. Het praktisch circulatievoud is daarom minstens 1,5× het fysiologisch circulatievoud voor de constante temperatuurperiode van de bewaring.

Toelichting op de gebruikte termen

Temperatuurspreiding

Fysiologisch actieve producten worden bewaard in pallets of kisten of in bulk. De eerst genoemde bewaarmethode heet langsstroombewaring, de tweede doorstroombewaring. De temperatuurspreiding is het verschil tussen maximum en minimum temperatuur van het product. De plek van de maximum temperatuur bij langsstroombewaring is iets boven het centrum in een pallet of kistenstapeling. De plek van de maximum temperatuur bij doorstroombewaring is circa 30 cm voor het vlak waar de circulatielucht de stapeling verlaat. De minimum temperatuur bij doorstroombewaring is de temperatuur van de lucht die uit de koeler stroomt. Die voor doorstroombewaring is variabel en afhankelijk van de plaatselijke effectieve warmteproductie. Meestal is de laagste temperatuur enkele decimeters na het vlak van de instroming.

Warmteproductie.

Fysiologisch actieve producten verbruiken zuurstof en produceren kooldioxide. Deze levensprocessen gaan gepaard met warmteproductie. De fysiologische warmteproductie is

Tabel 2

Fysiologisch circulatievoud (1/uur) als functie van de warmteproductie van het product en afstand tussen de circulatiekanalen in de stapeling. De temperatuurspreiding in de stapeling is 2 K. De netto stapeldichtheid is 300 kg/m³. Het praktisch circulatievoud is 1,5 × groter.				
Warmteproductie W/ton	Afstand tussen circulatiekanalen in m			
	0,8	0,6 langsstroom	0,4	0,2-0 doorstroom
5	1,2	1,2	1,2	1,1
10	2,9	2,6	2,5	2,3
15	5,3	4,6	4,2	3,5
20	9,3	7,1	6,1	4,8
25	17	11	8,5	6,3
30	36	16	12	7,8
35	155	22	15	9,5
40		32	18	12
45		48	22	13
50		78	26	15
75			62	25
100			175	35
125				45
150				55
200				75

gerelateerd aan de voedingsstof die verbrand wordt in het product. Dit zijn meestal koolhydraten. De vochtafgifte van de producten heeft het effect van een negatieve warmteproductie. De effectieve warmteproductie is dus gelijk aan de fysiologische warmteproductie verminderd met de latente verdampingswarmte.

Stapeldichtheid

De hoeveelheid product die per m³ kan worden opgeslagen hangt af van de soort product en van de verpakking die ervoor gebruikt wordt. In tabel 3 zijn de netto stapeldichtheden (massa product / volume) van een aantal producten opgenomen. De bruto stapeldichtheden (massa product + fust / volume) zijn van belang voor de bepaling van de vloerbelasting, maar niet voor de berekening van het circulatievoud.

Onderzoek en circulatievoud

Het optimale circulatievoud tijdens de bewaarperiode voor appels en peren werd in 1981 vastgesteld op 15 tot 20 1/uur. Geïnstalleerd werd ca. 50 1/uur om tijdens de inkoelperiode voldoende koelcapaciteit te hebben, en een goede warmteoverdracht tussen fruit en lucht te verzekeren, zodat de afkoeltijd 4 tot 5 dagen duurt.

Tijdens de bewaarperiode is het niet nodig de volledig geïnstalleerde ventilatoropbrengst

Tabel 3

Fysiologische warmteproductie in W/ton voor de berekening van het circulatievoud. In de tabel staat de minimum warmteproductie. De warmteproductie varieert afhankelijk van het ras, herkomst en bemesting. De maximum warmteproductie is vaak 2x de minimum waarde. Voor de berekening van het momentaan koelvermogen is het verstandiger om de gemiddelde of maximale warmteproductie te gebruiken.									
Product	Temperatuur in °C				Product	Temperatuur in °C			
	0	2	5	10		0	2	5	10
Aardappel	11	11	12	65	Komkommer	19	19	24	51
Aardbei	34	40	44		Kool, rode- zomer	23	31	46	
Abrikoos	15	19	33		Kool, rode- bewaar	15	15	22	
Ananas	-	-	40		Kool, witte	15	17	22	
Andijvie	107	133	184		Koolraap	15	15	19	
Appel, zomer	11	14	15		Koolrabi, geen blad	23	31	34	
Appel, bewaar	5,5	11	14		Kruisbes	14	19	24	
Asperge	58	69	77		Meloen	14	17	22	41
Banaan, groen	-	-	22		Noot	2,4	2,4	4,8	9,6
Banaan, rijp	-	-	40		Paprika	24	31	56	85
Bes, rood	14	17	24		Peer, zomer	7,7	13	22	
Bes, zwart	20	32	44		Peer, bewaar	7,7	11	17	
Biet (Kroot)	12	15	31		Perzik	13	17	25	
Bleekselderij	19	25	46		Prei, winter	35	58	128	
Bloemkool	24	35	54		Pruim	11	18	29	
Boerenkool	25	34	41		Pruim, geel	18	21	36	
Boon	57	77	104		Rabarber	34	39	46	
Boon, gedroogd	19	35	56		Radijs, geen blad	18	18	20	
Braam	46	58	85		Radijs, met blad	56	63	80	
Broccoli	200	220	250		Savooiekool	46	58	75	
Champignon	114	123	148		Sla	31	34	41	
Citroen, geel	5,8	7,3	11		Sinaasappel	4,8	6,3	11	21
Druif	4,8	12	16		Spinazie	61	77	128	
Erwt, vers	87	116	155		Spruitjes	48	56	96	
Erwt, gedopt	75	250	416		Tomaat, rijpend	14	16	19	
Framboos	47	53	82		Tuinboon	19	35	56	
Grapefruit	4,8	7,3	11	18	Ui, droog	12	13	15	
Kers, zoet	15	17	28		Ui, groen	28	30	46	
Kers, zuur	15	19	31		Witlofwortel	90	90	100	
Knolselderij	15	19	31		Wortel met loof	51	58	62	
					Wortel zonder loof	9,7	22	28	

Tabel 4

Stapeldichtheid van enkele producten in kg/m ³ in stapelkisten of gestort. <i>De stapeldichtheid is netto, dus alleen massa product per volume.</i>					
Product	Kist	Gestort	Product	Kist	Gestort
Aardappel	425	650	Peer	400	600
Andijvie	120	200	Prei	250	400
Appel	320	500	Sla	120	200
Augurk	375	560	Spinazie	120	200
Biet	400	600	Tomaat	350	500
Bloemkool	250	380	Spruitjes	280	420
Boon	250	400	Ui	375	550
Knolselderij	300	450	Wortel	375	500
Komkommer	300	450	Witlofwortel	250	400
Kool, sluit-	300	450			

te benutten. Door ventilatoren uit te schakelen of op toeren te regelen, tot het optimale circulatievoud, kon 40 % bespaard worden aan energieverbruik tijdens de bewaarperiode (zie tabel 5).

In het kader van energiebesparing is geëxperimenteerd met toerenregeling van ventilatoren door middel van frequentieregeling. Het circulatievoud werd lager bij een lagere frequentie (zie tabel 6). Het circulatievoud voor een koelerblok met 6 ventilatoren (maximum 42000 m³/uur) die, naar wens, vol of half-toeren draaien in een fruitcel van 800 m³, heeft een logische relatie met het circulatievoud.

De circulerende lucht in een gekoelde ruimte verdeelt zich nooit homogeen over die ruimte. Dit wordt veroorzaakt door de stapelwijze, de plaatsing van de koelers, enz. Het plaatselijk circulatievoud in de lading is gemeten bij enkele gekoelde ruimten (zie tabel 7). Onder de koelers heerst het hoogste plaatselijke circulatievoud.

De lucht die uit de koeler stroomt verdeelt zich over drie luchtwegen. Tabel 8 toont het

Tabel 5

Circulatievoud en energieverbruik		
Koelcel	Circulatievoud 1/uur	Energie kWh/(ton.week)
Sluitkool A	10	2,0
Sluitkool B	20	2,2
Sluitkool C	40	4,0

Tabel 6

Invloed netfrequentie of toerental op het circulatievoud	
Frequentie Hertz	Circulatievoud 1/uur
appelcel 50 30	47 25
perencel 6× vol 4× vol + 2× half 2× vol + 4× half 6× half 4× half 2× half	35 27 24 17 14 13

resultaat van metingen. De kortsluitstroming kan zeer aanzienlijk zijn. Als gevolg van een verschil in snelheid van de lucht die stroomt door kanalen in de stapeling, ontstaan drukverschillen over kisten en pallets (fust). Daardoor treedt circa 5 % van de lucht die door de stapeling stroomt, in contact met de producten in het fust. Het totaal van het percentage hoeft niet 100 % te zijn. Een krachtige worp zuigt lucht aan uit de stapeling waardoor de rondwentelende lucht meer dan 100 % kan zijn.

Tabel 7

Plaatselijk circulatievoud in een koelcel			
<i>De koelers hangen aan het plafond en blazen de lucht uit over de lading naar de andere kant van de koelcel. Bij voldoende worp buigt de lucht daar de stapeling in en stroomt door de stapeling terug naar de aanzuigruimte onder de koeler.</i> <i>Voor = onder de koeler, achter = aan einde worp.</i>			
Gekoelde ruimte	Plaatselijk circulatievoud		
	voor	midden	achter
Appelcel, 50 Hertz	47	35	30
Appelcel, 30 Hertz	25	19	13
Appel 70 cm tussen plafond en stapeling	72	43	15
Appel 160 cm tussen plafond en stapeling	18	9	0

Tabel 8

Verdeling van de circulatielucht in % van het luchtdebiet van de koelers over de gekoelde ruimte.				
Koelcel	Lading	Wanden	Kortsluit	Aanzuig
150 ton appel	70	10	20	
peren, 160 cm	39		61	
tussen lading en plafond				
peren, in midden	13	26	61	
geen lading				
appel	67		38	29

Model berekening circulatievoud

Naam product			
.....	°C	Temperatuur bewaring	
.....	W/ton	Fysiologische warmteproductie	Tabel 3
.....	m	Afstand tussen circulatiekanalen	
.....	a 1/uur	Fysiologisch circulatievoud	Tabel 1 of 2
.....	b K	Temperatuurspreiding volgens	Tabel 1 of 2
.....	c kg/m ³	Netto stapeldichtheid	Tabel 4
.....	d K	Gekozen temperatuurspreiding, gelijk of dicht bij b	
$\frac{a \times 1,5 \times b \times c}{300 \times d} = e$ 1/uur Praktisch circulatievoud.			
.....	f m ³	Volume van gekoelde ruimte	
e × f = m ³ /uur Circulatiedebiet			

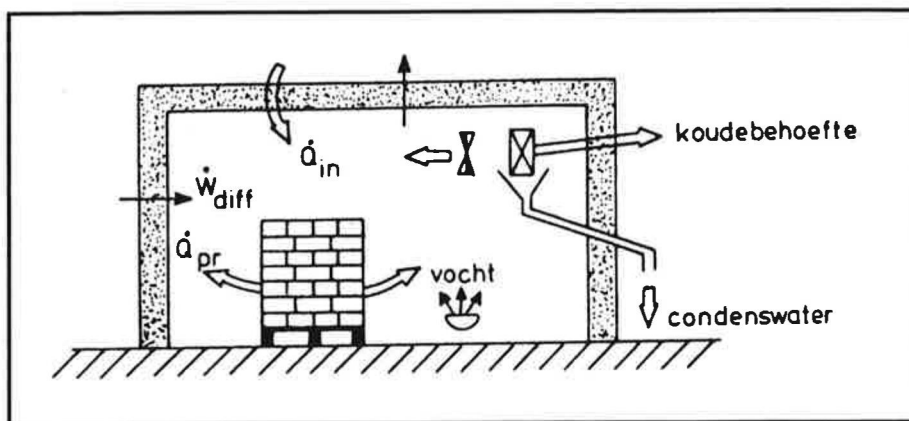
Bruto momenteel koelvermogen van een gekoelde ruimte

De norm NEN 1876 definieert diverse koelvermogens. Tabel 1 somt 7 definities op waarbij gelet moet worden op de trefwoorden koudemEDIUM versus luchtkoeler, gemiddeld versus momenteel (momentaan). Capaciteitsopgaven van luchtkoelers door fabrikanten worden meestal opgegeven als het bruto momenteel koelvermogen.

Tabel 1

Definities van koelvermogens	
$\dot{Q}_{om}$	Bruto gemiddeld koelvermogen: de gemiddelde warmtestroom die door het koudemEDIUM in de luchtkoeler wordt opgenomen gedurende een bepaalde tijd.
$\dot{Q}_o$	Bruto momenteel koelvermogen: de warmtestroom die door het koudemEDIUM in de luchtkoeler wordt opgenomen op een bepaald tijdstip.
$\dot{Q}_{oo}$	Nominaal koelvermogen: het bruto momentele koelvermogen op het tijdstip dat een half uur na het begin van de koelperiode ligt.
$\dot{Q}_{nm}$	Netto gemiddeld koelvermogen: de gemiddelde warmtestroom die de luchtkoeler gedurende een bepaalde tijd opneemt uit de lucht in de gekoelde ruimte.
$\dot{Q}_n$	Netto momenteel koelvermogen: de warmtestroom die de luchtkoeler op een willekeurig tijdstip opneemt uit de lucht in de gekoelde ruimte.
$\dot{Q}_{o*}$	Droog koelvermogen: het bruto momentele koelvermogen zonder rijp- of condensvorming.
$\dot{Q}_e$	Effectief koelvermogen: het netto gemiddeld koelvermogen gedurende de koelcyclus inclusief het effect van de schadelijke ontdooiwarmte.

Het bruto momenteel koelvermogen is af te leiden uit een enthalpiebalans over de vochtige lucht in de gekoelde ruimte. Deze methode wordt gebruikt in de 'Leergang ontwerpen van koelinstallaties', uitgegeven door uitgeverij P. C. Noordervliet, Zeist, en wordt gedoceerd in de post-HBO opleiding 'Koudetechniek' georganiseerd door de Hogeschool



Figuur 1
Model van een
gekoelde ruimte

's-Hertogenbosch. Dit is de reden waarom hier het koelvermogen wordt berekend uit een enthalpiebalans over de vochtige lucht in de gekoelde ruimte.

De enthalpiebalans is, in de stationaire toestand en als geen productie van enthalpie in de lucht plaats vindt, stroom in = stroom uit. Het koelvermogen is een van de stromen uit (tabel 2) en is berekenbaar als alle andere stromen berekend of geschat kunnen worden:

$$\text{Koelvermogen} = \text{Stroom in} - \text{Rijp en/of condensvorming} - \text{Ventilatie uit.}$$

Tabel 2

Naam van stromen betrokken bij de berekening van het koelvermogen	
Stroom in	Stroom uit
Instraling Warmteproductie Ventilatorarbeid Ventilatie in Bevochtigers Verwarmers Vochtafgifte Vochtdiffusie Afkoeling	Koelvermogen Rijpvorming Condensvorming Ventilatie uit

Een korte omschrijving van de 'stromen in' en 'stromen uit' bij een gekoelde ruimte staat in tabel 3. Per stroom wordt een enthalpie-vergelijking gegeven in tabel 4. De enthalpie-vergelijkingen gelden voor de stationaire toestand. Ook de veldwarmte wordt beschouwd als een stationaire stroom, alhoewel tijdens het inkoelproces de veldwarmte nogal veranderlijk is.

Tabel 3

Korte omschrijving van de termen in de enthalpiebalans	
Naam	Omschrijving
Stromen in	
<i>Instraling</i>	Warmtestroom door wand, plafond en vloer als gevolg van een temperatuurverschil tussen omgeving en cellucht.
<i>Warmteproductie</i>	Bederfelijke producten, zoals verse onbehandelde tuin- en akkerbouwproducten en sommige chemicaliën, produceren warmte.
<i>Ventilatorarbeid</i>	De aan een ventilator toegevoerde energie komt in de vorm van warmte vrij in de cellucht.
<i>Ventilatie in</i>	Warme vochtige omgevingslucht kan de koelcel instromen en neemt enthalpie (warmte en vocht) mee.
<i>Bevochtiger</i>	Dit apparaat brengt vocht als waterdamp of water in de cellucht.
<i>Verwarmer</i>	Voorbeelden van verwarmers zijn: lichtbronnen, heaters, vloerverwarming en deurverwarming.
<i>Vochtafgifte</i>	Producten die water bevatten geven vocht af als de verpakking doorlaatbaar is. Het waterdampdrukdeficit is de drijvende kracht voor de berekening van deze stroom.
<i>Vochtdiffusie</i>	Vocht diffundeert door de wanden van de gekoelde ruimte als gevolg van een waterdampdrukverschil tussen omgeving en cellucht.
<i>Afkoeling</i>	Warm ingebrachte producten koelen af, als de stapelwijze dat toelaat, naar de temperatuur van de cellucht. De term <i>veldwarmte</i> – tuinbouwproducten nemen hun warmte mee van het veld naar de koelcel – wordt ook vaak gebruikt.
Stromen uit	
<i>Koelvermogen</i>	De warmtehoeveelheid die door het koudemedium dat door de koeler stroomt wordt opgenomen. De warmtecapaciteit van de koeler wordt meestal verwaarloosd in de stationaire toestand.
<i>Rijpvorming</i>	De temperatuur van het oppervlak van de koeler is lager dan die van de cellucht. Als de temperatuur aan het oppervlak veel lager is dan 0 °C zal waterdamp als rijp op de koeler neerslaan. Rijp blijft hechten aan het oppervlak totdat een ontdooicyclus volgt.
<i>Condensvorming</i>	Indien de temperatuur van het oppervlak van de koeler boven 0 °C is, slaat waterdamp uit de cellucht neer op de koeler in de vorm van condens. Condens loopt van de koeler af.
<i>Ventilatie uit</i>	Cellucht stroomt de gekoelde ruimte uit als er ook ventilatie in is.

Tabel 4

Vergelijkingen die de stromen in en uit beschrijven	
	Enthalpie
Stroom in	
instraling	$\dot{Q}_{in} = k \cdot A \cdot (T_u - T_i)$
warmteproductie product	$\dot{Q}_{pr} = m_{pr} \cdot q_{pr}$
ventilatorarbeid	$\dot{Q}_{circ}$
ventilatie in	$\dot{Q}_{vent.in} = \dot{m}_{vent} \cdot h_u$
bevochtigers $\left\{ \begin{array}{l} \text{damp} \\ \text{water} \end{array} \right.$	$\dot{Q}_{bev.damp} = (c_d \cdot T_d + r) \dot{W}_{bev}$ $\dot{Q}_{bev.water} = c_w \cdot T_w \cdot \dot{W}_{bev}$
verwarmers	$\dot{Q}_{verw}$
vochtafgifte product $\left\{ \begin{array}{l} T > 0^\circ\text{C} \\ T < 0^\circ\text{C} \end{array} \right.$	$\dot{Q}_{vocht.pr} = c_w \cdot T_{pr} \cdot \dot{W}_{pr}$ $\dot{Q}_{vocht.pr} = (c_{ijs} \cdot T_{pr} - r_o) \dot{W}_{pr}$
vochtdiffusie door wanden	$\dot{Q}_{diff} = (c_d \cdot T_u + r) \dot{W}_{pr}$
afkoeling	$\dot{Q}_{veld} = (m \cdot c)_{pr} \left(- \frac{dT_{pr}}{dt} \right)$
Stroom uit	
rijpvorming	$\dot{Q}_{rijp} = (c_{ijs} \cdot T_{opp} - r_o) \dot{W}_{rijp}$
condensvorming	$\dot{Q}_{condens} = c_w \cdot T_{opp} \cdot \dot{W}_{condens}$
ventilatie uit	$\dot{Q}_{vent.uit} = \dot{m}_{vent} \cdot h_i$
koelvermogen	$\dot{Q}_o$

Uit tabel 4 blijkt dat ook een waterbalans opgesteld moet worden om de hoeveelheid rijp of condens die op de koeler neerslaat, te berekenen. Het gaat om de factoren rijp-/condensvorming. De waterbalans over de vochtige lucht in de gekoelde ruimte is in woorden:

stroom in	stroom uit
bevochtigers vochtafgifte diffusie ventilatie in	ventilatie uit rijpvorming condensvorming

Uitgedrukt in symbolen wordt de waterbalans

$$\dot{W}_{bev} + \dot{W}_{pr} + \dot{W}_{diff} + \dot{W}_{vent.in} = \dot{W}_{vent.uit} + \dot{W}_{rijp/condens}$$

De hoeveelheid rijp of condens die per tijd op de koeler neerslaat is dus:

$$\dot{W}_{rijp/condens} = \dot{W}_{bev} + \dot{W}_{pr} + \dot{W}_{diff} + \dot{W}_{vent(in-uit)}$$

In tabel 5 zijn de gebruikelijke vergelijkingen opgenomen, waarmee de vochtstromen berekend worden. Ontvochtigers komen niet vaak voor in een gekoelde ruimte.

Tabel 5

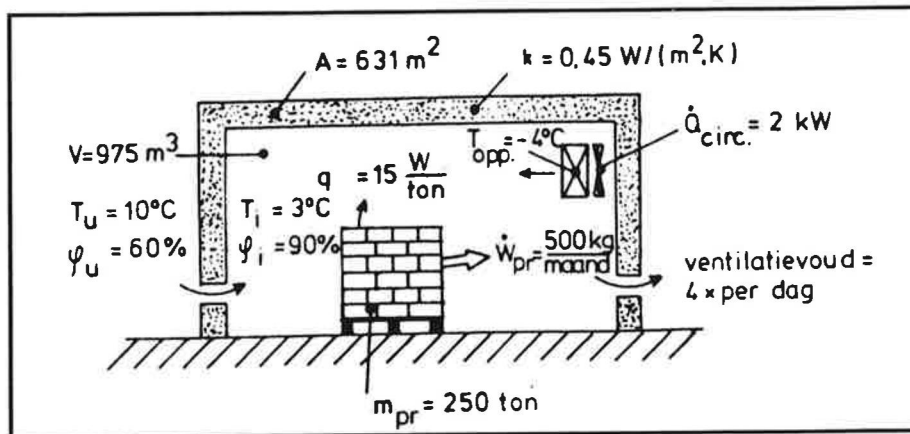
Vergelijkingen van vochtstromen in en uit	
	vocht
Stroom in bevochtigers $\left\{ \begin{array}{l} \text{damp} \\ \text{water} \end{array} \right.$ vochtafgifte vochtdiffusie ventilatie in	$\dot{W}_{bev}$ $\dot{W}_{bev}$ $\dot{W}_{pr} = m_{pr} \cdot \dot{m}_{spec} \cdot \Delta p$ $\dot{W}_{diff} = k_{diff} \cdot A \cdot (P_u - P_i)$ $\dot{W}_{vent.in} = \dot{m}_{vent} \cdot x_u$
Stroom uit rijpvorming condens ventilatie uit	$\dot{W}_{rijp}$ $\dot{W}_{condens}$ $\dot{W}_{vent.uit} = \dot{m}_{vent} \cdot x_i$

→

Voorbeeldberekeningen

Voorbeeld 1

Bereken het koelvermogen van een koelcel voor appels tijdens de bewaarperiode (dus niet tijdens de afkoelperiode). De gegevens zijn in figuur 2 vermeld.



Figuur 2 – Een appelkoelcel

Enthalpiestromen in:

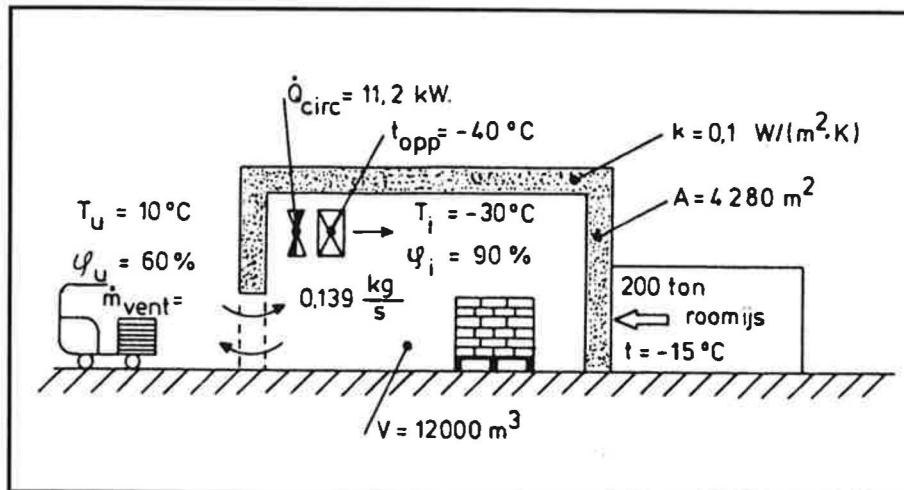
$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{in} &= k \cdot A \cdot (T_u - T_i) = 0,45 \times 631 \times 7 &= 1,988 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{pr} &= m_{pr} \cdot q_{pr} = 250 \times 15 &= 3,750 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{circ} &= &= 2,000 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{vent.in} &= \dot{m}_{vent} \cdot h_u = \frac{4 \times 975 \times 22 \times 1,24}{3600 \times 24} &= 1,231 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{vocht} &= c_w \cdot t_{pr} \cdot \dot{W}_{pr} = 4,19 \times 3 \times \frac{500}{30 \times 24 \times 3600} &= 0,002 \text{ kW} \\
 &\text{som stromen in} &= 8,971 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Enthalpiestromen uit:

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{vent(in-uit)} &= \dot{m}_{vent} \cdot \Delta x = 0,0559 \times 0,0002 = 0,073 \times 10^{-4} \text{ kg/s (uit=in)} \\
 \dot{Q}_{vocht} &= (c_{ijs} \cdot T_{opp} - r_o) (\dot{W}_{pr} + \dot{W}_{vent})_{(in=uit)} = \\
 &= (2,1 \cdot -4 - 335) (1,929 \times 10^{-4} + 0,073 \times 10^{-4}) = -0,0687 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{vent.uit} &= \dot{m}_{vent} \cdot h_i = \frac{4 \times 975 \times 14 \times 1,24}{3600 \times 24} = 0,784 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_o &= \Sigma \cdot Q(in) - \dot{Q}_{vocht} - \dot{Q}_{vent.uit} = \\
 &= 8,971 + 0,0687 - 0,784 = 8,26 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Voorbeeld 2

Bereken het koelvermogen van een vriescel behorende bij een roomijsfabriek (zie fig. 3)



Figuur 3 – Een vriescel voor roomijs

Per dag wordt 200 ton roomijs, met een temperatuur van -15°C , in de fabriek geproduceerd en opgeslagen in een vriescel waarvan de temperatuur van de lucht -30°C bedraagt. Tevens wordt per dag 200 ton roomijs (van -30°C) met vorkhefwagens uit de vriescel gereden, waardoor de deur 1 uur per dag open staat. Er stroomt gemiddeld $0,139 \text{ kg/s}$ droge lucht door de deur van buiten naar binnen en natuurlijk ook in tegengestelde richting.

Oplossing:

Enthalpie stromen in:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{in} &= 0,1 \times 4280 \times [10 - (-30)] &= 17,1 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{circ} &= &= 11,2 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{vent} &= 0,139 \times 22 &= 3,1 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{afkoeling} &= \frac{200000 \times 2,11 \times 15}{24 \times 3600} &= 73,3 \text{ kW} \\
 & &= 104,7 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Enthalpie stromen uit

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{vent} &= 0,139 \times (-25) &= -3,5 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{ijs} &= (2,1 \times -40 - 335) 5,56 \times 10^{-4} &= -0,23 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

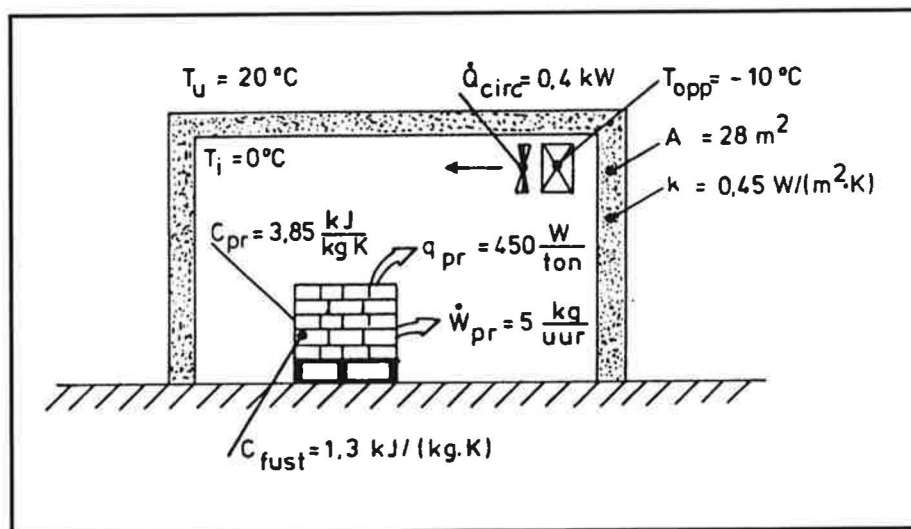
Koelvermogen

$$\dot{Q}_o = 104,7 - (-0,23) - (-3,5) = 108,4 \text{ kW}$$

N.B.: $\dot{W}_{ijs} = \dot{m}_{vent} \cdot \Delta x = 0,139 \times (0,0045 - 0,0005)$

Voorbeeld 3

Bereken het koelvermogen in een kleine champignon-inkoelcel, waarin 100 kg champignons van 20°C (+ 25 kg fust) in 1 uur wordt afgekoeld tot 3°C (zie figuur 4)



Figuur 4 – Een inkoelcel voor champignons

Enthalpie stromen in

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{in} &= 0,45 \times 28 \times 20 &= 0,25 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{pr} &= 0,1 \times 0,45 &= 0,045 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{circ} &= &= 0,4 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{veld.pr} &= \frac{100 \times 3,85 \times 17}{3600} &= 1,32 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{veld.fust} &= \frac{25 \times 1,3 \times 17}{3600} &= 0,15 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_{vocht.pr} &= 4,19 \times 12 \times 1,39 \times 10^{-3} &= 0,069 \text{ kW} \\
 & & \hline
 & & 2,734 \text{ kW} +
 \end{aligned}$$

Enthalpie stromen uit

$$\dot{Q}_{ijs} = (2,1 \times -10 - 335) 1,39 \times 10^{-3} = -0,495 \text{ kW}$$

Koelvermogen

$$\dot{Q}_o = 2,734 + 0,495 = 3,23 \text{ kW}$$

Symbolen en eenheden

A	m^2	oppervlak
c	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	soortelijke warmte
h	kJ/kg	enthalpie
k	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	warmtedoorgangscoefficiënt
m	kg	massa
$\dot{m}$	kg/s	massastroom
$\dot{m}_{\text{spec}}$	$\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{Pa}\cdot\text{s})$	specifieke vochtafgifte
P	Pa	dampdruk
q_{pr}	W/kg	warmteproductie
Q_{ds}	kJ	schadelijke ontdooiwarmte
$\dot{Q}$	kW	warmtestroom
r	kJ/kg	verdampingswarmte
r_0	kJ/kg	smeltwarmte
t	s	tijd
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatuur
V	m^3	volume
$\dot{W}$	kg/s	vochtstroom
x	kg/kg	absolute vochtigheid