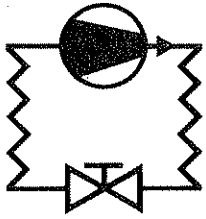


Leergang

Ontwerpen van koelinstallaties



Curatorium: Prof. ir. A. L. Stolk (voorzitter)
 Ir. W. G. Alexander
 Ir. L. M. Hamaker
 Dr. ir. S. Touber
 Prof. dr.-ing. L. Váhl

Met medewerking van directie en docenten applicatie-cursus Koudetechniek, HTS, den Bosch

In fig. 8.7 is de theoretische beschermingsgraad opgenomen bij 10 en 5% ventilatie-openingen ($H = 6 \cdot 10^{-4}$ en $H = 4 \cdot 10^{-4}$ m/s) voor afmetingen tussen $0 < X < 0,5$. Soms blijkt de vorm en de plaatsing van de ventilatie-openingen een belangrijker invloed op de relatieve vochtigheid uit te oefenen dan het percentage ventilatie-openingen.

\dot{m}	kg/s	massastroom
M_d	kg/kmol	molecuulgewicht van water (= 18)
n	kmol	hoeveelheid stof
p	Pa	waterdampdruk
p_s	Pa	verzadigde waterdampdruk
R	J/(kmol · K)	gasconstante (= 8316)
T_k	K	temperatuur
V	m ³	volume
λ	W/(m · K)	warmtegeleidingscoëfficiënt
μ	—	dampdiffusieweerstandsfactor

1 VOCHTDIFFUSIE DOOR WANDEN

Indeling

- 9.1 Inleiding
- 9.2 Berekening van waterdampstromen
- 9.3 Condensatie in de isolatie

Symbolen en eenheden

A	m ²	oppervlak
C	kg/m ³	concentratie
d	m	dikte
D	m ² /s	diffusiecoëfficiënt
m	kg	massa

9.1 Inleiding

Vochtdiffusie door wanden van een gekoelde ruimte heeft geen belangrijke invloed op het koelvermogen (zie hoofdstuk koelvermogen), omdat de betrokken enthalpiestromen zeer gering zijn. Toch is het verschijnsel van belang voor een correcte werking van de isolatie, want ergens in de isolatie ligt de temperatuur beneden het dauwpunt zodat condensatie of ijsvorming kan optreden. Water en ijs in de isolatie vernietigen de isolatiewaarde, terwijl bovendien de isolatieplaten veel zwaarder worden wat kan leiden tot instortende plafonds.

Vochtdiffusie door wanden moet dus voorkomen worden door het aanbrengen van dampwerende lagen of het toepassen van dampdichte isolatiematerialen. Tot nu toe is de tweede mogelijkheid alleen te realiseren met foamglas.

9.2 Berekening van waterdampstromen

Bij waterdampdiffusie door een wand is de stofoverdrachtscoëfficiënt zo groot dat de overdracht van lucht naar wand geen weerstand oplevert. De waterdampstroom volgt met deze voorwaarde uit

$$\dot{m} = A \cdot \frac{D}{d} (C_u - C_i) \quad (9.1)$$

Het h, x -diagram is gebaseerd op absolute vochtigheid of waterdampspanning. De concentratie wordt daarom omgerekend naar waterdampspanning met behulp van de algemene gaswet

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T_k \quad (9.2)$$

De hoeveelheid stof n wordt met het molecuulgewicht van water omgezet in massa

$$n \cdot R \cdot T_k = \frac{n \cdot M_d}{1} \cdot \frac{R}{M_d} \cdot T_k = m \cdot R_d \cdot T_k = pV \quad (9.3)$$

waarbij R_d de gasconstante van water voorstelt. Hergroeperen van de laatste vergelijking levert op

$$\frac{m}{V} = C = \frac{p}{R_d \cdot T_k} \quad (9.4)$$

De stromingsvergelijking wordt dus (zie fig. 9.1)

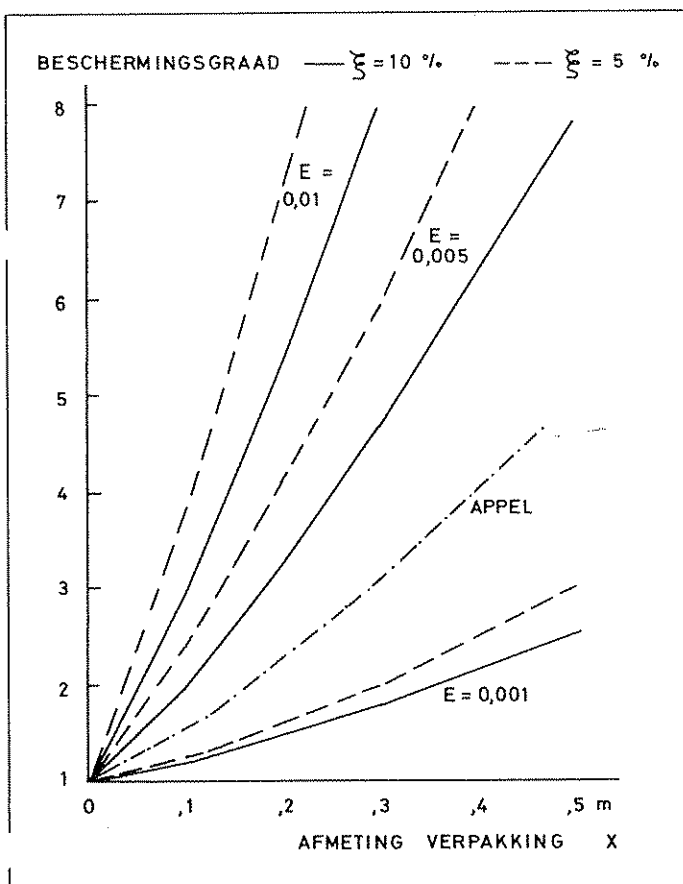


Fig. 8.7 De theoretische beschermingsgraad

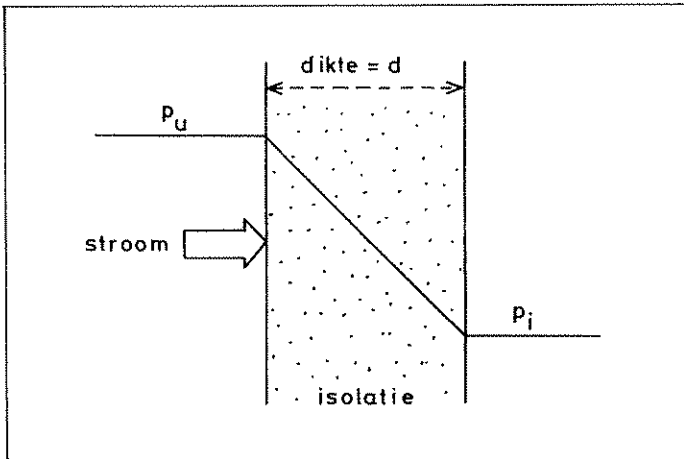


Fig. 9.1 Het dampdrukprofiel in een wand

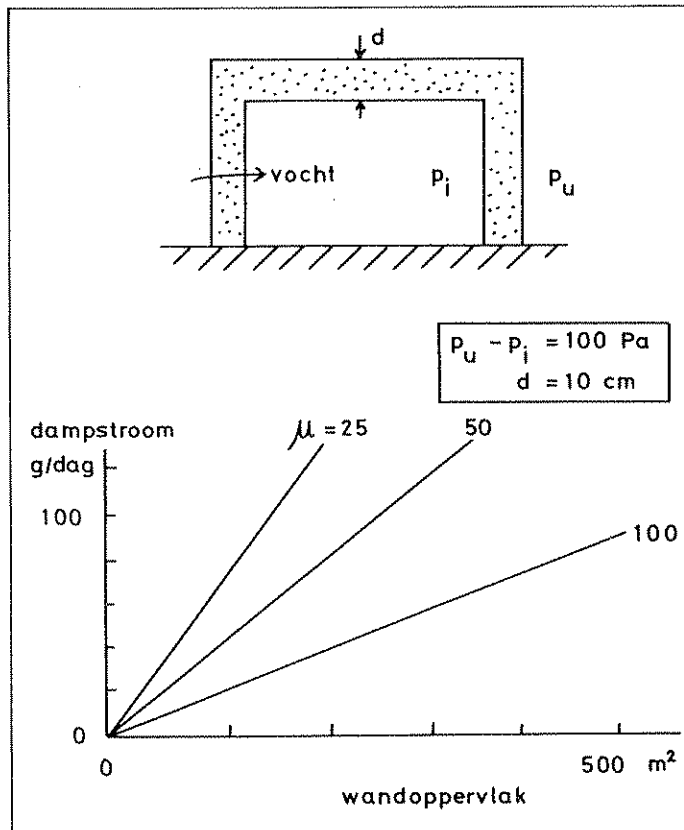


Fig. 9.2 De dampstroom door een wand met gegeven dampdiffusieweerstandsfactor

Tabel 9.1
Dampdiffusieweerstandsfactor van enkele materialen van belang voor gekoelde ruimten.

materiaal	μ
foamglas	∞
kurk	4
polystyreen schuim	25–75
polyurethaan schuim	30–40
steenwol	1,0–1,5
baksteen	8,0
beton	28
bitumen	$92 \cdot 10^3$
aluminium folie	$135 \cdot 10^6$

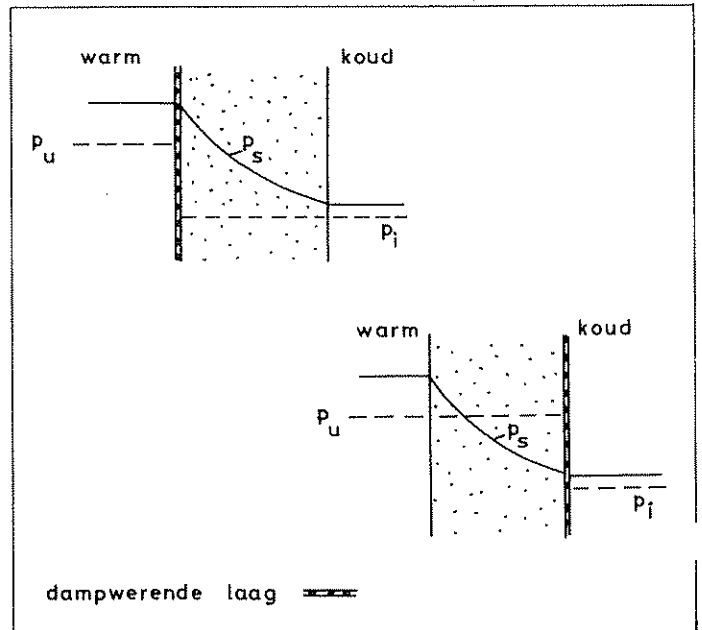


Fig. 9.3 In de rechter constructie treedt condensatie of ijsvorming in de isolatie op

$$\dot{m} = \underbrace{A}_{\text{oppervlak}} \underbrace{\frac{D}{d}}_{\text{constante}} \underbrace{\frac{1}{R_d \cdot T_k}}_{\text{drijvende kracht}} (p_u - p_i) \quad (9.5)$$

De vergelijking mag alleen worden toegepast als sprake is van diffusie van waterdamp in een wand. Vaak bestaat het wandmateriaal uit kleine luchtkanalen waarin condensatie en capillaire opstijging van water kan optreden. De onderstaande beschouwing geldt slechts voor pure diffusie.

Een tweede probleem is de keuze van de diffusiecoëfficiënt D . Bij wanden van vast materiaal wordt D berekend als een fractie van de waarde ervan in lucht

$$D = \frac{D_{w-a}}{\mu} \quad (9.6)$$

De dampdiffusieweerstandsfactor μ voor enkele materialen is in tabel 9.1 gegeven. In figuur 9.2 is de vochtstroom door diffusie uitgezet als functie van het oppervlak en μ . De vochtstroom is te klein om van invloed te zijn op het koelvermogen, maar algemeen geldt dat bij gekoelde ruimten — koelcel en vriescel — de isolatie binnen 3 jaar verzadigd is met water, indien de dampremmende laag aan de foutieve zijde aangebracht is.

Figuur 9.3 toont dat de dampremmende laag aan de warme zijde van de isolatie aangebracht moet worden, omdat dan de waterdampdruk altijd lager is dan de verzadigde waterdampdruk zodat zich geen condens of ijs vormen in de isolatie.

9.3 Condensatie in de isolatie

De isolerende werking van isolatiematerialen berust op de lage waarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht (of een ander gas) dat in de holten van het materiaal wordt vastgehouden. De holten zijn zo klein dat daarin geen luchtstroming ontstaat, waardoor de warmteoverdracht zou worden bevorderd. Naarmate de lucht in het materiaal meer door water wordt vervangen, gaat de isolerende werking achteruit: $\lambda_{\text{lucht}} = 0,025 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ en $\lambda_{\text{water}} = 0,6 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Bovendien kan water de constructie

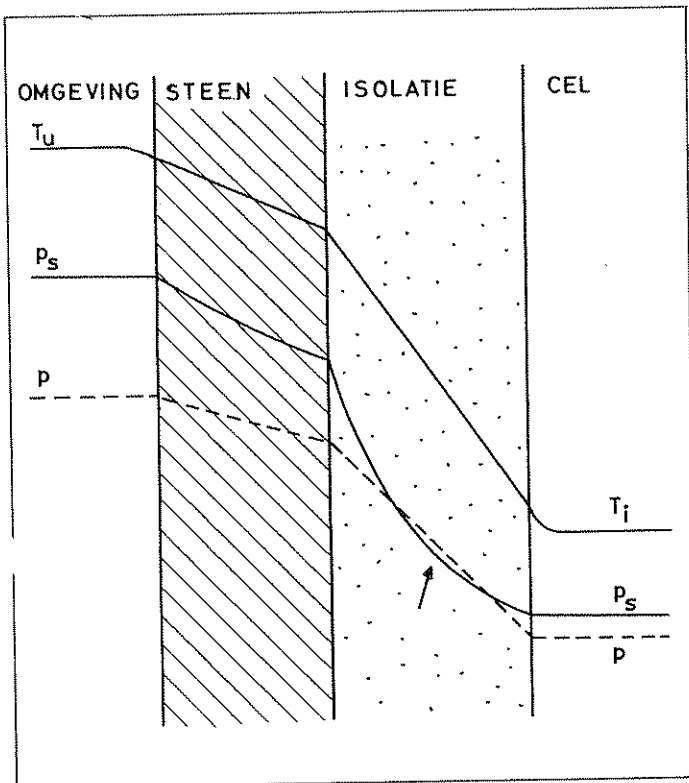


Fig. 9.4 Temperatuur- en dampprofielen in een samengestelde wand moeten berekend worden om te controleren of condensatie of ijsvorming mogelijk is

beschadigen, de lijmverbinding tussen de isolatielaag en de dragende constructie of de bekleding kan loslaten. Bij temperaturen beneden 0°C kan door de vorming van ijs, de wandconstructie zelfs mechanisch beschadigen. Er dient dus voor gewaakt te worden dat geen condensatie van waterdamp in de isolatie kan optreden.

Daarvoor is het noodzakelijk dat op iedere plaats in de wandconstructie de waterdampspanning lager is dan de verzadigingsspanning die behoort bij de temperatuur op die plaats. De gang van zaken bij een controle-berekening is als volgt:

- 1 het verloop van de temperatuur in de wandconstructie wordt berekend en getekend in figuur 9.4;
- 2 het verloop van de verzadigingsspanning p_s kan nu ook ingetekend worden;
- 3 daarna wordt het verloop van de werkelijke dampspanning p berekend en getekend in dezelfde figuur. Er wordt daarbij aangenomen dat er geen condensatie optreedt;
- 4 blijkt uit de figuur dat ergens in de wand $p \geq p_s$ dan treedt condensatie op; anders niet.

Ad 1 De wijze van berekenen van het temperatuurverloop is in het hoofdstuk 'Instraling' behandeld.

Ad 3 Het verloop van de waterdampspanning wordt op overeenkomstige wijze als het temperatuurverloop berekend. Voor elke constructielaag (1 m²) wordt vergelijking (9.5) als volgt herschreven

$$\Delta p = \frac{\dot{m} \cdot \mu \cdot d \cdot R_d \cdot T_k}{D} \quad (9.7)$$

Voor n lagen geldt:

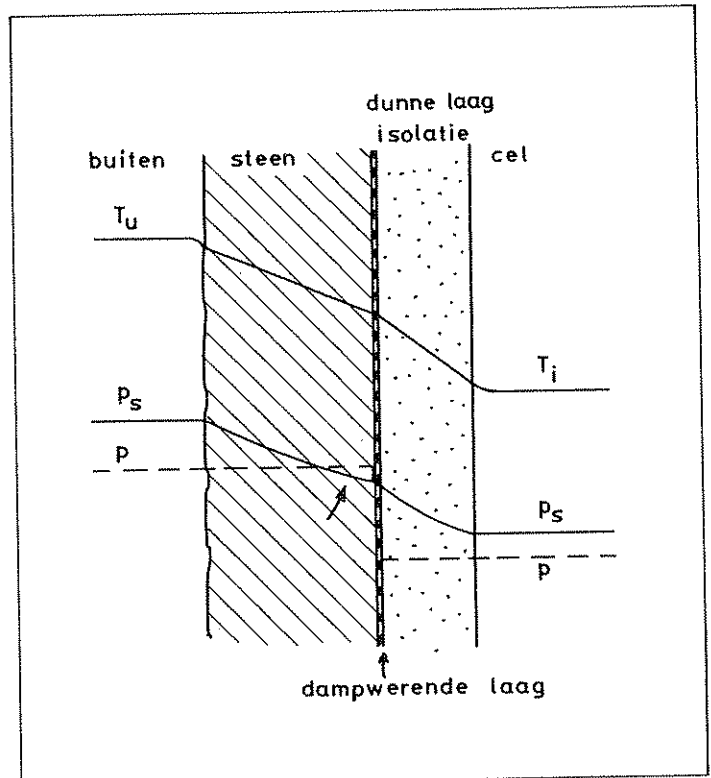


Fig. 9.5 Soms treedt onverwachte condensatie op

$$p_u - p_i = \dot{m} \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i \cdot d_i \cdot R_d \cdot T_k}{D} \quad (9.8)$$

Uit vergelijking 9.8 is de waterdampstroom te berekenen. Invullen van deze waarde van \dot{m} in de vergelijkingen 9.7 levert de gezochte waarden voor de waterdampdrukken op.

Figuur 9.5 toont aan dat ondanks de gulden regel om de dampremmende laag aan de warme zijde van de isolatie aan te brengen, toch condensatie kan optreden. In dit geval niet in de isolatie, maar in de stenen muur als de isolatie te dun is. Zeer ongunstige isolatieconstructies treft men aan bij CA-cellen. Aan de warme zijde van de isolatie wordt een dampremmende laag aangebracht. Het aanbrengen van deze laag is een eenmalige zaak en controle en herstel is moeilijk vanwege de slechte bereikbaarheid. Maar aan de binnenzijde van de CA-cel wordt de gasdichte laag aangebracht. Deze laag wordt jaarlijks gecontroleerd en indien nodig vernieuwd. Het onvermijdelijke resultaat is dat de k -waarde van CA-cellen snel stijgt als gevolg van condensatie in de isolatie.

10 AFKOELEN

De enthalpie die vrijkomt bij het afkoelen van levensmiddelen of producten in een gekoelde ruimte heeft meestal een grote invloed op de berekening van het koelvermogen.

Bij tuin- en landbouwproducten die gekoeld worden van oogsttemperatuur tot circa 2°C spreekt men van veldwarmte. De algemene vergelijking van de enthalpie bij afkoelen is

$$\dot{Q}_{afkoeling} = m \cdot \left(\frac{dh}{dt} \right) \quad (10.1)$$

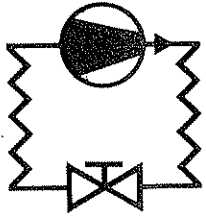
of als de soortelijke warmte constant is

$$\dot{Q}_{\text{veldwarmte}} = (mc) \cdot \left(-\frac{dT}{dt}\right) \quad (10.2)$$

waarin:

m	kg	massa produkt
h	kJ/kg	enthalpie produkt
t	s	tijd
c	kJ/(kg·K)	soortelijke warmte
T	K	temperatuur

In een volgende gedeelte van de leergang 'Apparatuur voor afkoe-
len en bevriezen' wordt uiteengezet hoe dh/dt of dT/dt gemeten
of berekend wordt.



Leergang

Ontwerpen van koelinstallaties

Curatorium: Prof. ir. A. L. Stolk (voorzitter)
Ir. W. G. Alexander
Ir. L. M. Hamaker
Dr. ir. S. Touber
Prof. dr.-ing. L. Vahl

Met medewerking van directie en docenten applicatie-cursus Koudetechniek, HTS, den Bosch

Hoofdstuk 7 Apparatuur voor het afkoelen van produkten

Een overzicht en samenvatting van de constructie van rekenmodellen

Ir W. A. Quekel

Inhoud

- 1 Overzicht
- 2 Produktwarmte
- 3 Warmtestroom uit produkten
- 4 Warmtestroom in koelende materie
- 5 Afkoelen van produktstromen
- 6 Apparatuur
- 7 Symbolen

1 OVERZICHT

Bij produktie en afzet van vele produkten is het noodzakelijk dat de produkttemperatuur lager is dan de omgevingstemperatuur. Het afkoelen kan men vaak combineren met bijvoorbeeld transporteren, bufferen of etaleren.

Toepassingen van produktkoeling vindt men o.a. bij:
— het verduurzamen van voedings- en geneesmiddelen
— het afvoeren van produktie- of bereidingswarmte.

Principe warmtestroom

Wordt een produkt in warmtecontact gebracht met materie met een lagere temperatuur dan treedt er warmte-overdracht op van produkt naar koelende materie middels een warmtestroom \dot{Q} . De produkttemperatuur daalt (zie fig. 1).
Produkten en koelende materie kunnen in eerste instantie onderscheiden worden in vaste, vloeibare en gasvormige stoffen. Een voor de hand liggende manier om warmtecontact tot stand te brengen is vermengen (bijvoorbeeld vis en scherfijs). Ook kan men vluchtige materie laten verdampen op een produkt (bijvoorbeeld water op bladgroente in een vacuüm-tunnel). Warmtecontact betekent fysiek contact tussen produkt en koelende materie. Er is een uitzondering voor warmte-overdracht door *straling*. Binnen het kader van deze cursus vindt straling geen toepassing vanwege de relatief kleine temperatuurverschillen. In de meeste gevallen wil men geen rechtstreeks contact tussen produkt en koelende materie om wederzijdse beïnvloeding te voorkomen. Het produkt is vaak een voedingsmiddel en de koelende materie bestaat vaak uit verdampende ammoniak of freon. Een warmte-doorlatende scheidingswand is dan gewenst. Het warmtetransport door deze wand vindt plaats door *geleiding*. Is het af te koelen produkt stromend dan is intensief warmtecontact met de koude scheidingswand goed te realiseren (bijvoorbeeld geroerde melktank met koelmantel). Het warmtetransport in de geroerde vloeistof vindt plaats door convectie (combinatie van geleiding en menging). Is het af te koelen produkt vast dan is intensief warmtecontact met de koude scheidingswand vaak goed te realiseren met een stromend medium (bijvoorbeeld koude lucht). Het warmtetransport in het vaste produkt vindt plaats door geleiding en in het medium door convectie.

Bij het afvoeren van warmte uit vaste produkten daalt de temperatuur geleidelijk tot de gewenste produkteindtemperatuur. De warmtestroom uit het produkt is dan een functie van de *tijd* omdat het temperatuurverschil tussen produkt en koelende materie steeds kleiner wordt.

Bij vloeibare produkten, die apparatuur doorstromen, zal de warmtestroom uit het produkt evenwel een functie zijn van de *plaats* in de apparatuur, omdat de temperatuur van het stromend produkt daalt van intrede- tot eindtemperatuur.

Principe produktstroom

De apparatuur voor het afkoelen van produkten kan door het schema worden weergegeven (zie fig. 2).
Bij vaste produkten is de produktstroom meestal discontinu (bijvoorbeeld appels, drank in flessen). Het produkt wordt dan in charges als bulk of op pallets in de apparatuur gebracht. Er is tevens sprake van produktbuffercapaciteit. Een bandvriezer heeft echter een continue produktstroom. Bij vloeibare produkten (bijvoorbeeld dranken, vloeibare zuivelprodukten) is de produktstroom meestal continu. Een melkkoeltank heeft echter een discontinu produktstroom en heeft daarvoor tevens produktbuffercapaciteit.

Principe apparatuur

Men kan de apparatuur voor het afkoelen van produkten overzichtelijk weergeven door een indeling te maken naar de aard

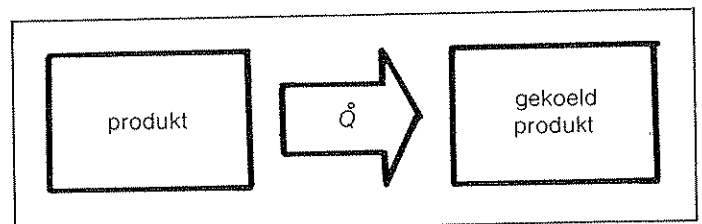


Fig. 1 Warmtestroom

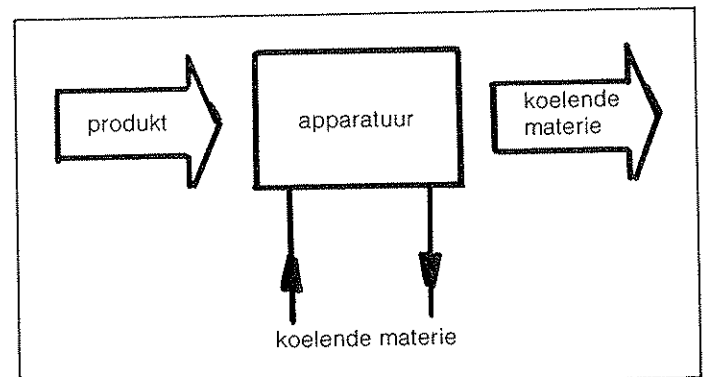


Fig. 2 Produktstroom

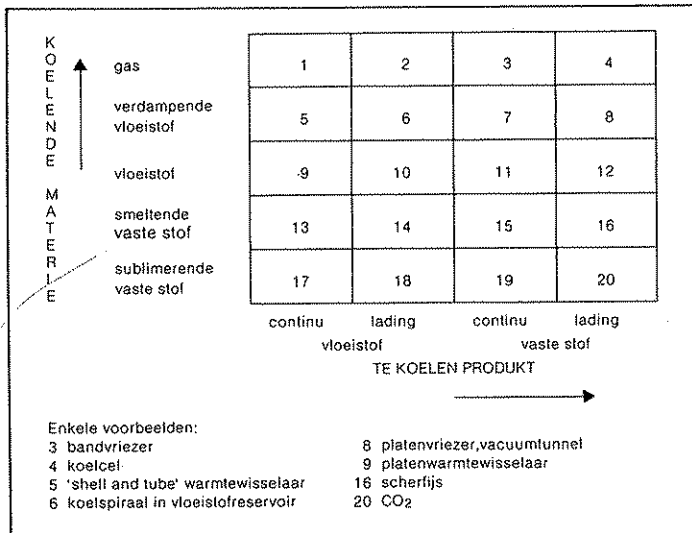


Fig. 3 Overzicht apparatuur

van de te koelen produkten en de koelende materie (zie fig. 3). Wat betreft de te koelen produkten is het onderscheid vast of vloeibaar van belang alsmede de produktstroom: ladingsgewijs of continu. De koelende materie kunnen we indelen naar de aggregatietoestand.

Opmerking:

Zoals gesteld kan men het afkoelen vaak combineren met bijvoorbeeld transporteren, bufferen of etaleren.

2 PRODUKTWARMTE

De hoeveelheid warmte, die uit een produkt afgevoerd moet worden bij afkoeling van begin naar eindtemperatuur, zonder fase overgang, is evenredig met de massa en het temperatuurverschil.

De evenredigheidsfactor is de soortelijke warmte. De afkoeling vindt meestal plaats bij een constante druk. Bij vaste en vloeibare produkten wordt de soortelijke warmte dan voorgesteld door c .

dus

$$Q = m \cdot c \cdot (T_{p_{begin}} - T_{p_{eind}}) \quad (I)$$

Q	hoeveelheid afgevoerde warmte	J
m	massa van het produkt	kg
c	soortelijke warmte produkt	J/kg.K
T_p	temperatuur van het produkt	K

Indien het produkt *ladingsgewijs* wordt afgekoeld, dan is de massa tijdens het koelen constant. De produkttemperatuur is dan afhankelijk van de afkoeltijd. De warmtestroom uit het produkt wordt dan:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = m \cdot c \cdot \frac{dT_p}{dt} \quad (II)$$

\dot{Q}	warmtestroom	W
t	tijd	s

Bij een *continue* produktstroom \dot{m} wordt de warmtestroom:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{p_{begin}} - T_{p_{eind}}) \quad (III)$$

\dot{m}	produktstroom	kg/s
-----------	---------------	------

Bij samengestelde produkten kan de soortelijke warmte berekend worden uit de bijdrage van alle componenten: ¹⁾

¹⁾ zie Handboek voor Koudetechniek '82, hoofdstuk 5.6

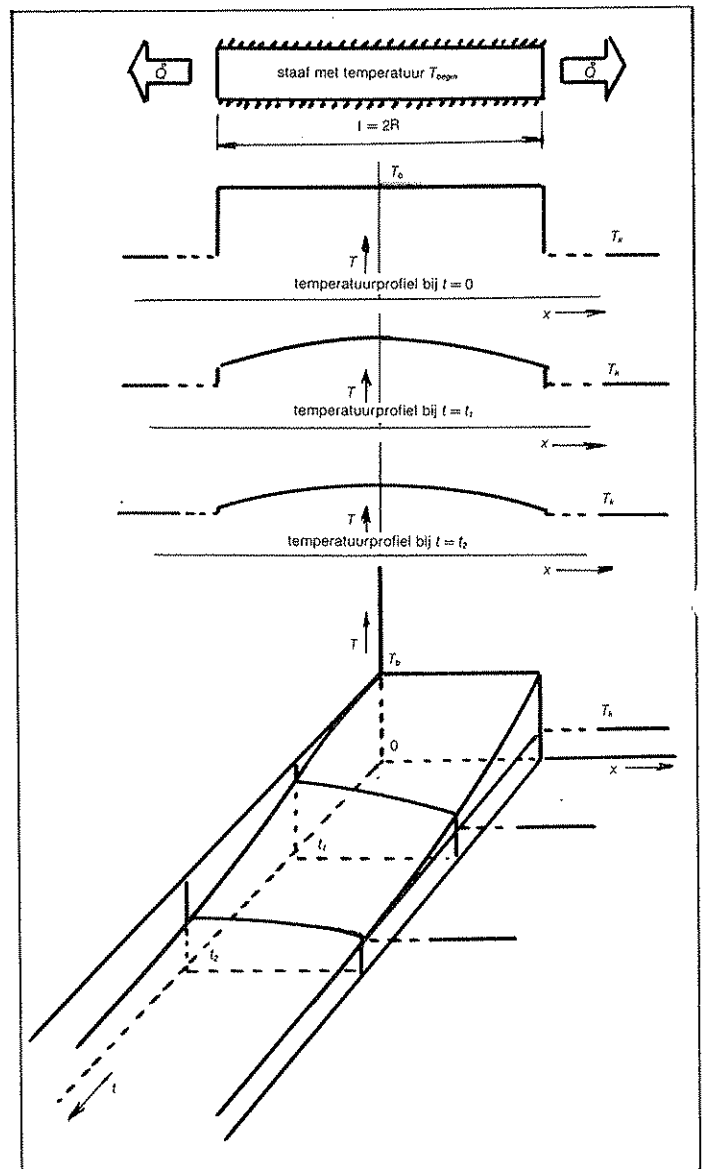


Fig. 4 Temperatuur-tijd-plaats grafiek

$$c = \sum_{i=1}^n c_i \cdot m_i \quad (IV)$$

c_i	soortelijke warmte van component i	J/kg.K
m_i	massapercentage van component i	kg/kg
n	aantal componenten	

Bij fase-overgang van het afkoelende produkt, zoals bijvoorbeeld bij bevriezing, is het makkelijker om in plaats van met soortelijke warmte en stollingswarmte te rekenen met de soortelijke enthalpie.

De enthalpie is bij vloeibare en vaste produkten gelijk aan de produktwarmte.

De warmtestroom uit het produkt wordt dan:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (V)$$

h	soortelijke enthalpie	J/kg
-----	-----------------------	------

Vele produkten hebben een vriestraject in plaats van een stolpunt. ¹⁾

Voorts zij opgemerkt, dat levende produkten warmte produceren. ¹⁾

3 WARMTESTROOM UIT PRODUKTEN

3.1 Warmtestroom uit vaste en stromende produkten zonder fase-overgang

3.1.1 Geleiding bij vaste produkten

Bij afkoeling van een vast produkt wordt het buitenoppervlak in warmtecontact gebracht met koelende materie.

Er treedt een warmtestroom op en de produkttemperatuur daalt. Dichter bij het buitenoppervlak is de daling eerder merkbaar dan in de kern, omdat de warmte vanuit de kern eerst nog naar het koelend buitenoppervlak moet worden getransporteerd. Bij vaste produkten vindt dit warmtetransport plaats van laag tot laag door *geleiding*.

De temperatuur in een afkoelend produkt varieert derhalve van plaats tot plaats. De kerntemperatuur is hoger dan de oppervlakte temperatuur. We spreken dan van een *temperatuurprofiel*. Dit profiel is een *momentopname*.

Een aantal van deze momentopnamen kan men weergeven in een drie-dimensionale grafiek. Er ontstaat dan een grafische voorstelling van de temperatuur als functie van de plaats in het produkt en als functie van de tijd. In figuur 4 is een temperatuur, plaats, tijd-grafiek weergegeven voor een homogeen isotroop 'aafvormig lichaam, waarbij aan de beide eindvlakken warmte wordt onttrokken.

De flankoppervlakte is hierbij geïsoleerd gedacht.

Voorts is aangenomen dat de materiaaleigenschappen van deze staaf niet temperatuurafhankelijk zijn (λ , ρ , c zijn constant)

λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	W/m.K
ρ	soortelijke massa produkt	kg/m ³
c	soortelijke warmte produkt	J/kg.K
\dot{Q}	warmtestroom	W
T_k	temperatuur van de koelende materie	K
T_p	temperatuur op een bepaalde plaats en tijd van het produkt	K

Uit de figuur blijkt duidelijk dat de afkoeling van de staaf vanuit de eindvlakken plaats vindt. De afkoeling heeft een geleidelijk karakter. Een tweede opmerkelijk verschijnsel is dat de temperatuurprofielen in het midden van de staaf een horizontale raaklijn hebben, vanwege de symmetrische afkoeling. Het verband tussen temperatuur, plaats en tijd wordt beschreven door de differentiaalvergelijking van Fourier: (een-dimensionaal).

$$\frac{\delta T}{t} = a \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (VI)$$

In woorden: de temperaturodaling op een bepaalde plaats en op een bepaald moment is evenredig met de verandering van het temperatuurprofiel.

$$a = \text{temperatuurvereffeningscoëfficiënt} \frac{\lambda}{\rho \cdot a}$$

Een belangrijke randvoorwaarde voor de differentiaalvergelijking is de mate van afkoeling aan de eindvlakken van het staafvormige produkt (\dot{Q}). Deze afkoeling wordt bepaald door het temperatuurverschil tussen het buitenoppervlak van het produkt en de omgeving alsmede door α .

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_{p_{opp}} - T_k) \quad (VII)$$

α	warmte-overdrachtscoëfficiënt	W/m ² .K
A	buitenoppervlak van het produkt	m ²
$T_{p_{opp}}$	produkt-oppervlakte temperatuur	K

De oplossing van de differentiaalvergelijking van Fourier levert:

$$T = f(x, t)$$

Geometrisch gelijkvormige lichamen hebben gelijkvormige temperatuur profielen op vergelijkbare tijdstippen:

$$\theta = g(Fo, Bi)$$

met θ dimensieloze temperatuurverhouding

$$= \frac{T_p - T_k}{T_{p_{begin}} - T_k} \quad (VIII)$$

Fo	dimensieloze getal van Fourier	= $a \cdot t / R^2$
Bi	dimensieloze getal van Biot	= $\alpha \cdot R / \lambda$
ξ	dimensieloze plaats	= x / R
R	afstand kern tot oppervlak produkt	= m

Voor drie *standaard* gevallen namelijk plaat, cylinder en bol bestaan oplossingen in grafiek-vorm met de volgende gedaante (zie fig. 5).

Hieruit kan de kerntemperatuur, de oppervlaktetemperatuur alsmede de gemiddelde produkttemperatuur als functie van de tijd bepaald worden, bijvoorbeeld voor de constructie van een temperatuurprofiel (zie fig. 6).

De raaklijn aan het temperatuurprofiel in de kern van het produkt loopt uit symmetrie overwegingen horizontaal. Aan de rand is de helling van de raaklijn;

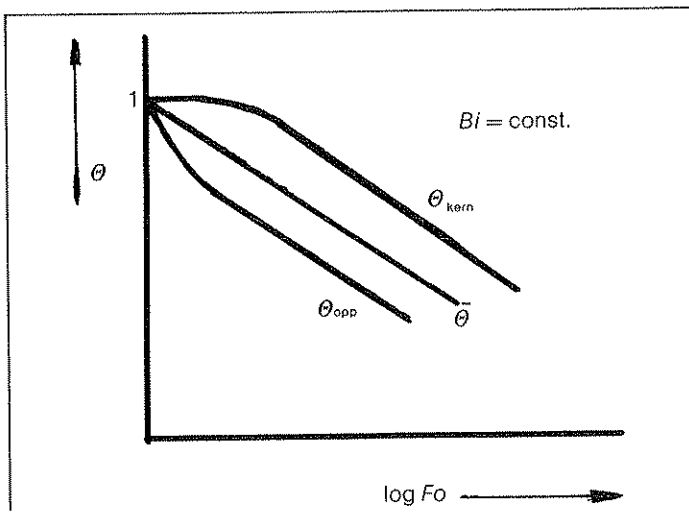


Fig. 5 Dimensieloze afkoelcurven

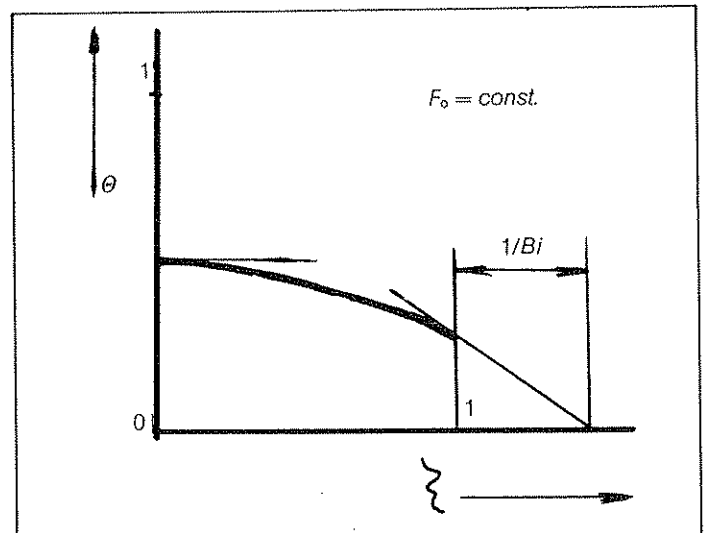


Fig. 6 Dimensieloze temperatuurprofiel

$$\frac{\theta}{1/Bi}$$

Deze raaklijn is derhalve eenvoudig te construeren. Voor *niet-standaard* produktvormen is een benaderingsmethode mogelijk gebaseerd op overeenkomstige oppervlakte/inhoud verhoudingen.

3.1.2 Convectie bij stromende produkten

Een stromend produkt wordt omsloten door een wand. Bij afkoeling van een stromend produkt wordt het buitenoppervlak (gevormd door deze begreningswand) in warmtecontact gebracht met koelende materie.

Er treedt een warmtestroom op uit het stromend produkt naar de begreningswand.

Dit warmtetransport vindt bij laminaire stroming plaats door geleiding van laag naar laag en bij turbulente stroming tevens door onderlinge verplaatsing van deeltjes. Dit is *convectie*.

De warmtestroom uit het af te koelen stromende produkt zal uiteindelijk door de begreningswand plaats vinden.

Op een bepaalde plaats in de stroming, langs de begreningswand geldt dan:

$$\dot{Q}_x = \alpha_x \cdot A_x \cdot (T_p - T_k)_x \quad (IX)$$

α_x warmte-overdrachtscoëfficiënt op de plaats x W/m²K

α_x wordt bepaald door het *snelheidsprofiel* en het *temperatuurprofiel* ter plaatse. Stroomopwaarts en afwaarts zullen deze profielen zich wijzigen. Bij een *gedwongen* stroming worden het snelheids- en temperatuurprofiel bepaald door

u, L, η, λ, c_p en q .

u	snelheid stromend produkt	m/s
η	dynamische viscositeit	Pa.s
L	karakteristieke lengte (meestal diameter)	m
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	W/mK
q	soortelijke massa	kg/m ³
c_p	soortelijke warmte	J/kg.K

Nemen we aan dat α in een beperkt gebied afhankelijk is van deze variabelen volgens:

$\alpha = C \cdot u^a \cdot L^b \cdot \eta^c \cdot \lambda^d \cdot c_p^e \cdot q^f$ met C en a tot f constanten, dan is volgens een dimensie-analyse:

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^e \quad (X)$$

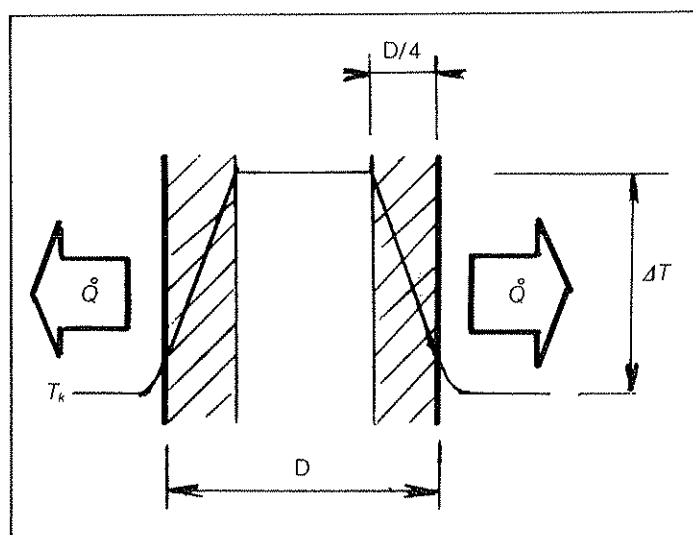


Fig. 7 Model bevriezend produkt

Nu	getal van Nusselt	$\alpha \cdot L / \lambda$
Re	getal van Reynolds	$q \cdot u \cdot L / \eta$
Pr	getal van Prandtl	$\eta \cdot c_p / \lambda$

Zijn de constanten C, a en e gemeten of voor zeer speciale eenvoudige gevallen berekend, dan is de waarde voor α bekend voor vergelijkbare situaties (situaties met dezelfde kengetallen).

Bij vrije of *natuurlijke* stroming wordt het snelheidsprofiel en het temperatuurprofiel bepaald door:

ΔT	temperatuurverschil tussen wand en stromend produkt	K
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s ²
β	kubieke uitzettingscoëfficiënt van het stromend produkt	1/K

Een dimensie-analyse leidt dan tot

$$Nu = C \cdot Gr^a \cdot Pr^e \quad \text{met} \quad (XI)$$

$$Gr = \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot g}{\nu^2} \quad \text{m}^2/\text{s}$$

3.2 Warmtestroom uit produkten met fase-overgang

3.2.1 Bevrozen van produkten

Bij vele produkten treedt een diepvrieskorst op.

Een analyse van het model van een bevrozende vlakke plaat (zie fig. 7) levert bij beschouwing van de gemiddelde situatie:

$$t_v = \frac{q \cdot \Delta h}{8 \cdot \Delta T \cdot \lambda} D \left(D + \frac{4 \cdot \lambda}{\alpha} \right) \quad (XII)$$

Voor een cylinder of bol is de constante 8 resp. 16 en 24.

t_v	vriestijd	s
q	soortelijke massa	kg/m ³
Δh	soortelijke enthalpiedaling van produkt van onbevroren naar bevroren toestand	J/kg
D	dikte van het produkt	m
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt van het bevroren produkt	J/mK
α	warmte-overdrachtscoëfficiënt tussen produkt en omgeving	J/m ² K
ΔT	temperatuurverschil tussen onbevroren produktkern en koelende materie	K

Opm. Betreffende de invloed van de diverse parameters op de vriestijd kan men stellen:

α	heeft een beperkte invloed
D^2	heeft een grote invloed
λ	heeft een vrij zware invloed.

3.2.2 Verdampen van produkten (uitdroging)

Vindt bij het afkoelen van bepaalde produkten tevens verdamping plaats van produktvocht dan zal uiteraard de massa van het gekoeld produkt verminderen (uitdroging).

Tevens levert de verdampende fractie een bijdrage aan de afkoeling van het produkt.

De totale warmte-overdracht (α_{total}) vanuit het produktoppervlak bestaat dan uit convectie door de langsstromende koelende materie (α_{droeg}) en warmte-overdracht door verdampend produktvocht.

Bij koeling met koude lucht wordt deze lucht door het produkt opgewarmd en bevochtigd.

In het Mollier-diagram voor vochtige lucht verandert derhalve h

en x via $\frac{dh}{dx}$ (zie fig. 8).

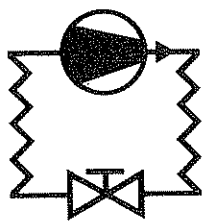
Een momentopname levert dan:

$$\left(\frac{dQ}{dm} \right)_t = \left(\frac{dh}{dx} \right)_t \quad \text{of:} \quad dm = \frac{1}{\left(\frac{dh}{dx} \right)_t} \cdot m \cdot c \cdot d\bar{T} \quad (XIII)$$

$\frac{dh}{dx}$ is niet constant over het hele koeltraject maar is een functie van de tijd. (wordt vervolgd)

Leergang

Ontwerpen van koelinstallaties



Curatorium: Prof. ir. A. L. Stolk (voorzitter)
 Ir. W. G. Alexander
 Ir. L. M. Hamaker
 Dr. ir. S. Touber
 Prof. dr.-ing. L. Váhl

Met medewerking van directie en docenten applicatie-cursus Koudetechniek, HTS, den Bosch

In figuur 8 is de situatie weergegeven op $t = 0$ en $t = t_1$. Als $t = t_1$ zal de temperatuur van het produktoppervlak gedaald zijn, en de waarde van $\frac{dh}{dx}$ is dan veranderd. De integraal van formule (XIII) kan met goede benadering berekend worden door in enkele stappen te sommeren over het hele koeltraject. Aldus is de massavermindering (uitdroging) van het gekoeld produkt bekend.

4 WARMTESTROOM IN KOELLENDE MATERIE

De koelende materie is meestal ammoniak of freon. Deze koelende materie verdampt ten gevolge van de warmtestroom uit het produkt. De warmte-overdrachtscoëfficiënt α wordt dan sterk bepaald door de mate van verdamping. Er zijn in principe drie gradaties te onderscheiden (fig. 9):

- 1 convectie koken (berekening via convectie van een stromende vloeistof)
- 2 belLEN koken
- 3 film koken (niet van toepassing in deze leergang).

Bij het belLEN koken treden gecompliceerde snelheids- en temperatuurprofielen op.

- Voor de verdamping aan de buitenzijde van een pijp bestaat de volgende empirische formule voor de warmte-overdrachtscoëfficiënt:

$$\alpha = C \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{A} \right)^{0,75} \cdot \epsilon_n \quad (\text{XIV})$$

C is afhankelijk van de soort en omstandigheden van de verdampende materie. ϵ_n wordt bepaald door het aantal horizontale pijpen boven elkaar (versterkingsfactor belvorming). Deze berekening is iteratief. De berekening wordt gestart door een aanname te doen voor de warmteflux. (\dot{Q}/A)

- Voor de verdamping aan de binnenzijde van een pijp kan men de warmte-overdrachtscoëfficiënt bepalen uit resultaten van metingen. ²⁾

5 AFKOELEN VAN PRODUKTSTROMEN

Warmtestroom is koelbelasting

5.1 Afkoelen van vaste produkten

Wordt een vast produkt aan de oppervlakte afgekoeld door koelende materie met een constante lagere temperatuur dan de produkttemperatuur, dan is voor enkele standaard produktgeometrieën de gemiddelde produkttemperatuur bekend als functie van de tijd.

$$\bar{\theta} = \bar{g}(Fo, Bi)$$

Uit deze afkoelcurve is de warmtestroom te bepalen (zie fig. 10)

$$\dot{Q} = m \cdot c \cdot \frac{d\bar{T}_p}{dt} \quad (\text{XV})$$

De warmtestroom op een bepaald moment is evenredig met de

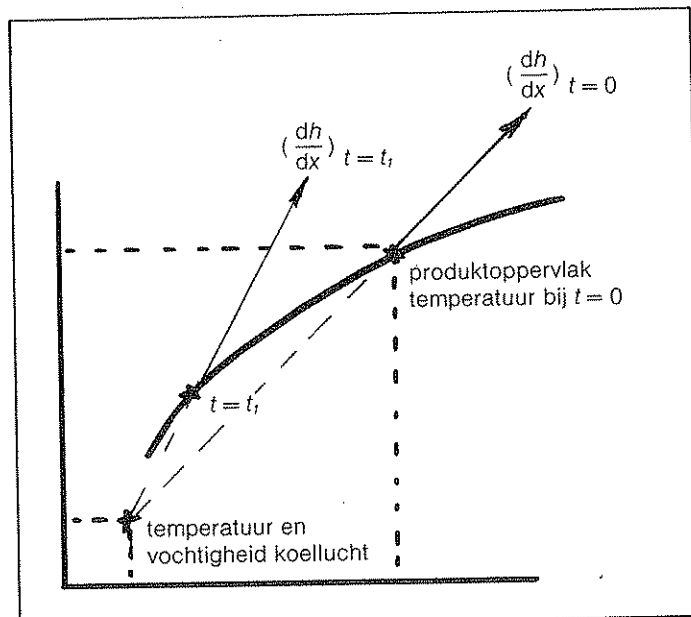


Fig. 8 Mollier-diagram voor verdampend produkt

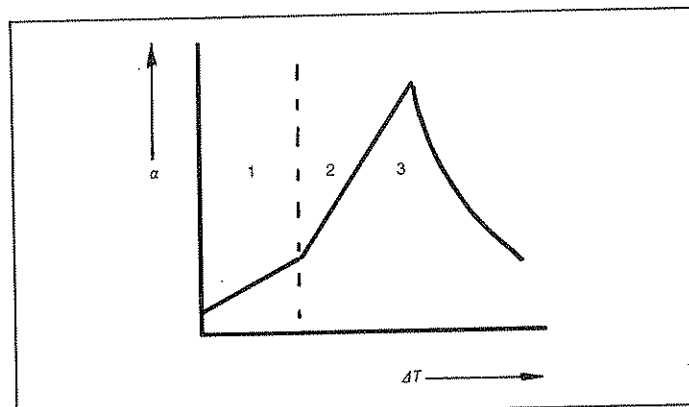


Fig. 9 De warmte-overdrachtscoëfficiënt bij verdamping

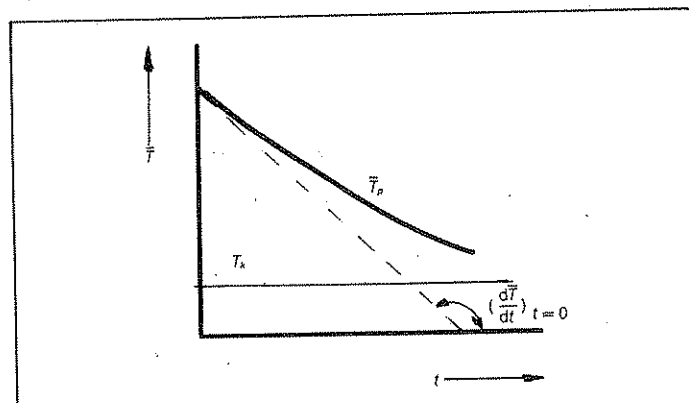


Fig. 10 Afkoelcurve en maximale warmtestroom

²⁾ VDI Wärmeatlas Hb1

helling van de afkoelcurve.

Bij het begin van de afkoeling is de warmtestroom het grootst, en de koelbelasting derhalve maximaal.

Opm. 1 Een belangrijke vereenvoudiging ontstaat bij situaties met een 'vlak' temperatuur-profiel: de kerntemperatuur is dan praktisch gelijk aan de oppervlakte temperatuur. Dit verschijnsel doet zich voor bij 'kleine' produkten en lage α -waarde. Dus $\bar{T}_p = T_p$.

Dan geldt:

$$\dot{Q} = m \cdot c \cdot \frac{dT_p}{dt} \quad (II)$$

$$\text{en } \dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_p - T_k) \quad (VII)$$

De oplossing van deze differentiaalvergelijking levert:

$$T_p = (T_{p_{\text{begin}}} - T_k) \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot A}{m \cdot c} \cdot t} + T_k$$

of met (VIII):

$$\theta = e^{-\frac{\alpha \cdot A}{m \cdot c} \cdot t} \quad (XVI)$$

De warmtestroom op een bepaald moment is nu evenredig met de helling van een e-macht functie.

Gebruikelijk is dit afkoelproces te karakteriseren met:

$$\tau = \text{tijdconstante} = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot A}$$

$$\text{en dus: } \theta = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (XVII)$$

Voorts kan men de halfafkoeltijd definiëren:

de halfafkoeltijd $t_{0,5}$ is die afkoeltijd waarbij $\theta = 0,5$

$$\text{Dus } t_{0,5} = \ln 2 \cdot \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot A} \quad (\text{zie fig. 11}) \quad (XVIII)$$

Opm. 2 Bij lineaire afkoeling is de afkoelcurve lineair. De temperatuur van de koelende materie is dan echter niet constant.

Een combinatie van lineair en exponentieel afkoelen leidt tot de situatie in fig. 12. Er ontstaat dan een belangrijke reductie van de maximale warmtestroom en dus van het benodigd koelvermogen. De afkoeltijd neemt evenwel toe. Deze toeneming is doorgaans echter een fractie van de totale bewaartijd.

5.2 Afkoelen van vloeibare producten

Wordt een vat vloeistof geroerd afgekoeld door koelende materie met een constante temperatuur dan is het temperatuurprofiel vlak. De afkoeling verloopt dan ook exponentieel volgens (XVII).

$$\theta = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

De tijdconstante is dan $\frac{m \cdot c}{k \cdot A}$ met k als warmtedoorgangscoeffi-

ciënt van de begrenzingswand tussen vloeibaar produkt en koelende materie.

Vaak zal men echter het stromende produkt *continu* langs een koude begrenzingswand leiden. In een stationnaire situatie met een constante wandtemperatuur is dan de produkttemperatuur een functie van de plaats in de apparatuur. De produktintrede-temperatuur daalt tijdens de doorstroming tot de uitredetempe-
ratuur (zie fig. 13).

Bij een continue produktstroom \dot{m} geldt (III):

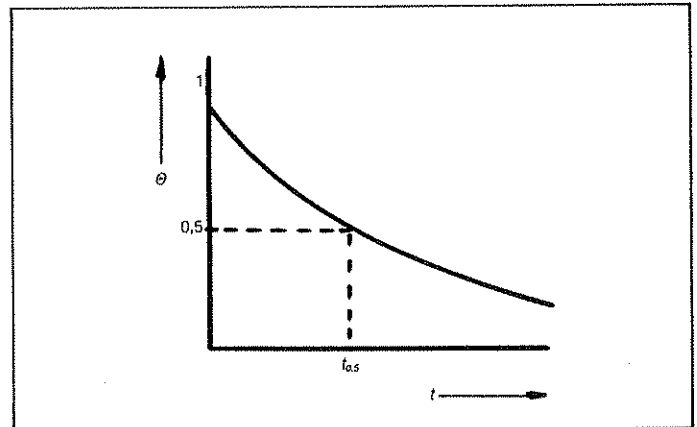


Fig. 11 Afkoelcurve en halfafkoeltijd

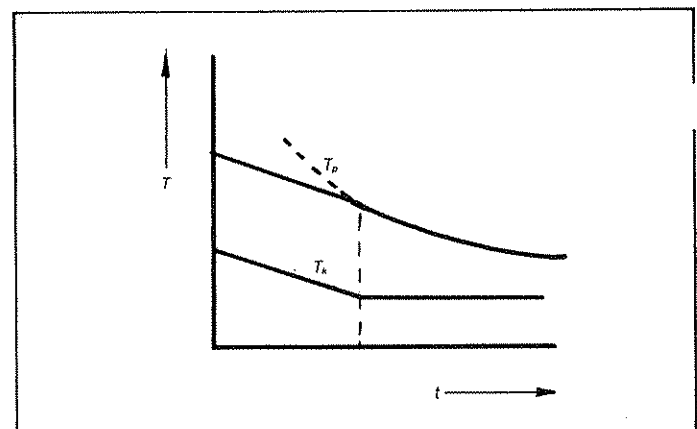


Fig. 12 Lineaire en exponentiële afkoeling

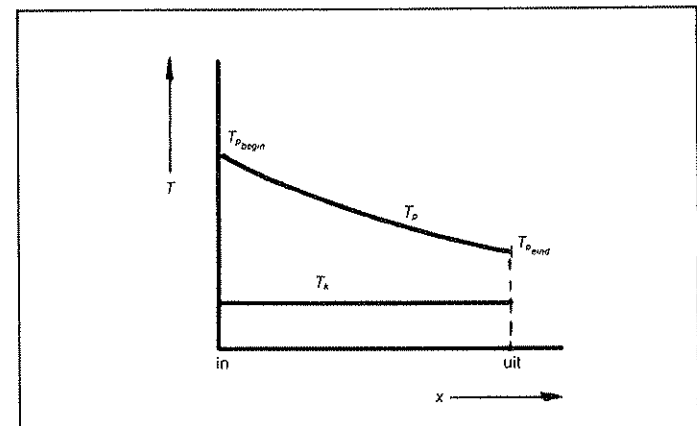


Fig. 13 Afkoeling produktstroom

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{p_{\text{begin}}} - T_{p_{\text{eind}}})$$

Ook geldt voor deze apparatuur op de plaats x :

$$d\dot{Q} = k \cdot dA \cdot (T_p - T_k)_x$$

De oplossing van deze differentiaalvergelijking levert:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_{in} \quad (XIX)$$

$$\text{met } \Delta T_{in} = \frac{(T_{p_{\text{begin}}} - T_k) - (T_{p_{\text{eind}}} - T_k)}{\ln \frac{(T_{p_{\text{begin}}} - T_k)}{(T_{p_{\text{eind}}} - T_k)}} \quad (XX)$$

6 APPARATUUR

In het overzicht van figuur 3 zijn reeds enkele voorbeelden vermeld van apparatuur voor het afkoelen van produkten.

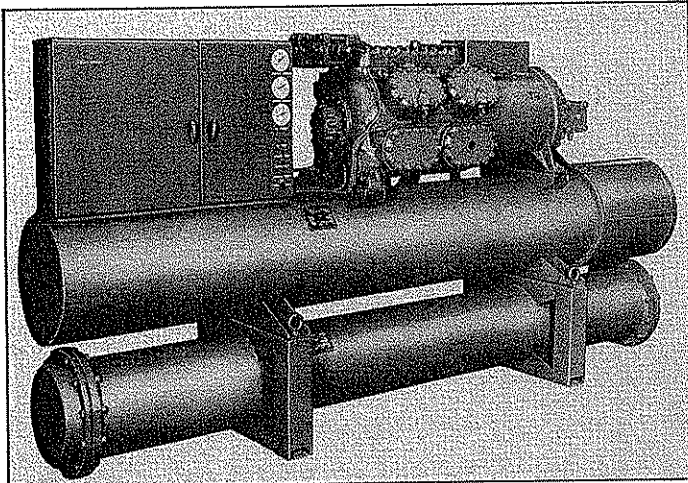


foto 1

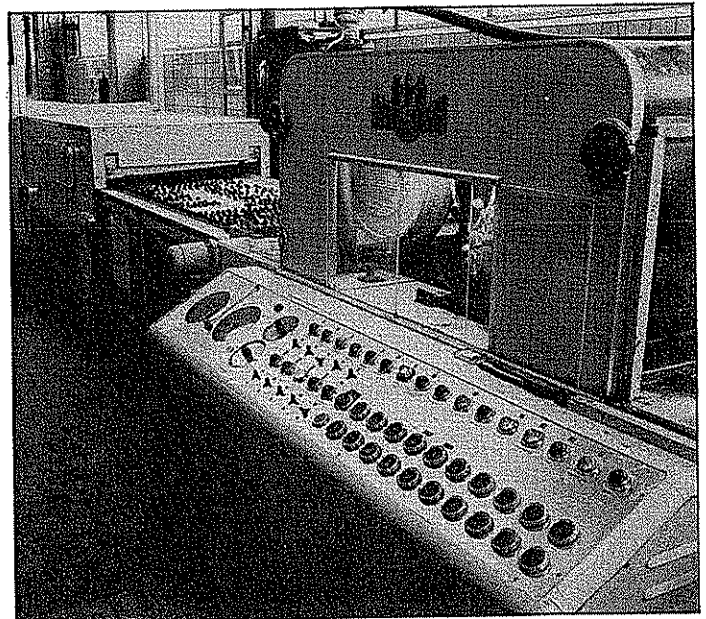


foto 3

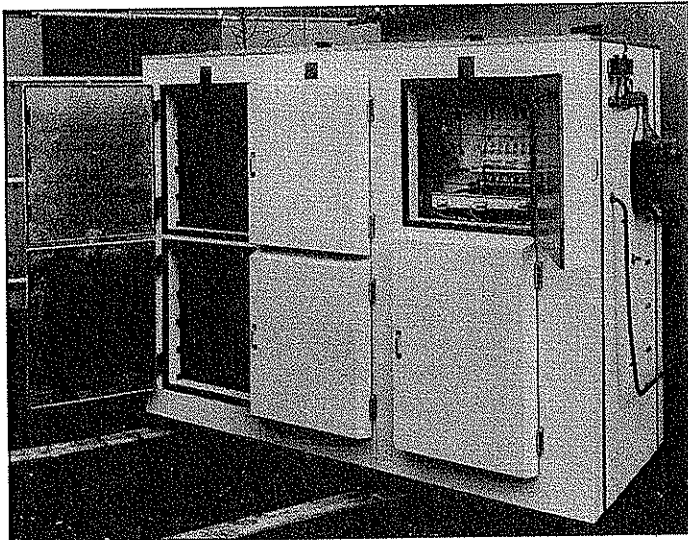


foto 2

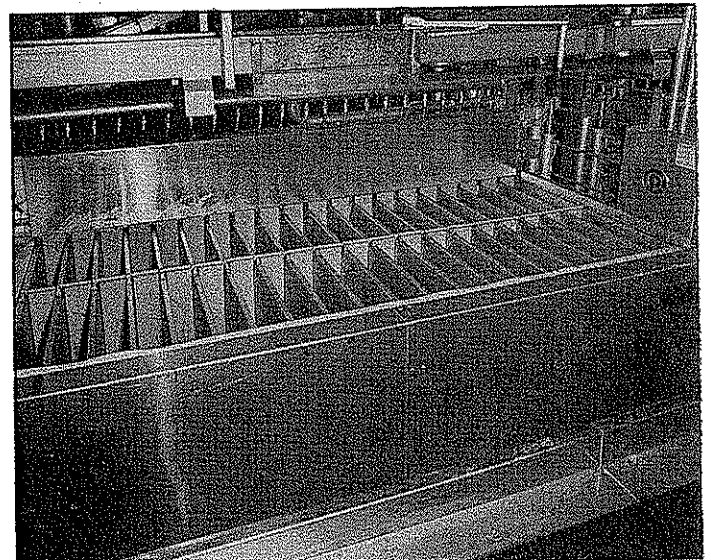


foto 4

Aan de hand van een vijftal producten wordt de apparatuur nu verder besproken.

- De producten zijn:
- 1 water
 - 2 brood
 - 3 suikerwerk
 - 4 vis
 - 5 bier

Voor de bijbehorende apparatuur zie foto's 1 t/m 5.

In onderstaand overzicht zijn de belangrijkste gegevens vermeld.

produkt	water	brood	suikerwerk	vis	bier (wort)
apparatuur	shell and tube	vriescel	bandkoeler	platen-vriezer	koelplaat
lading of continu	continu	lading	continu	lading	lading
begin-temperatuur	12°C	25°C	40°C		10°C
eind-temperatuur	8°	-18°	15°	-18°	0°
massa of massa-stroom	18 kg/s	100 kg	200 kg/uur	1800 kg	100 m ³
afkoeltijd		< 4 uur		3 uur	24 uur
warmte-stroom	300 kW	1500 W	10 à 15 kW	40 kW	50 kW
koelende materie	R22	R12/lucht	R12/lucht	R22/NH ₃	koudedragers
temperatuur materie	0°	-25/-18°	0°/10°	-35 à -40°	-5°

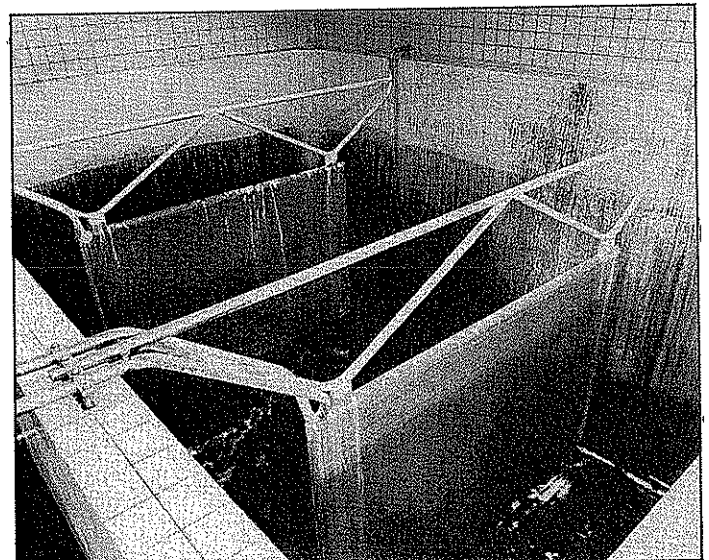


foto 5

ad 1 Water

Vele luchtbehandelingsinstallaties hebben behoefte aan een koud water toevoer met een temperatuur van circa 8°C. Na gebruik in luchtbehandelingsinstallatie is de watertemperatuur opgelopen tot circa 12°C. Op foto 1 is een koud water aggregaat weergegeven die een waterstroom afkoelt van 12° tot 8°C.

Bij dit aggregaat, waarbij het te koelen produkt bestaat uit een continue vloeistofstroom, is de koelende materie verdampende R22. Als constructie is gekozen voor een 'shell and tube' warmtewisselaar (op de foto is dat de bovenste horizontale cylinder). De freon verdampt *in* de pijpen en het te koelen water stroomt *om* de pijpen. Voorts bestaat dit koud water aggregaat uit een compressor en schakelkast; de onderste horizontale cylinder is een watergekoelde condensor.

ad 2 Brood

Op foto 2 is een invriescel voor brood weergegeven. Het produkt wordt ladingsgewijs toegevoerd. Bij dit voorbeeld circa 100 kg. De inbrengtemperatuur is 25°C. Het invriezen vindt plaats door koude lucht (-25°C) geforceerd te laten circuleren. In de invriescel is een luchtkoeler zichtbaar. In de pijpen verdampt R12; om de pijpen die voorzien zijn van lamellen stroomt de koude lucht. Middels eenventilator wordt de luchtstroom tussen de lamellen en langs het produkt gevoerd.

ad 3 Suikerwerk

De bandkoeler van foto 3 koelt een continue produktstroom van bijvoorbeeld 200 kg per uur af van de produkttemperatuur van circa 40°C naar circa 15°C teneinde het suikerwerk vormvast te maken.

De verdampingstemperatuur in de koeler is circa 0°C, de luchttemperatuur in de ventilatorkasten bedraagt circa 10°C.

ad 4 Vis

In de verticale platenvriezer van foto 4 wordt per lading circa 1800 kg vis ingebracht. In de platen heeft de koelende materie (NH₃, R22 of koudedragers) een temperatuur van -35° à -40°C. Na een vriestijd van circa 3 uur bedraagt de temperatuur van de bevroren vis circa -18°C.

De afgebeelde platenvriezer is onderlossend.

ad 5 Bier(wort)

Foto 5 toont een koelplaat in een vergistingskuip van een bierbrouwerij. Deze plaat houdt de wort op de gewenste vergistingstemperatuur. Na enige tijd koelt de plaat de wort snel af omde vergisting tot stilstand te brengen. Het proces verloopt bij een temperatuur van circa 10°C. De afkoeling vindt in circa 1 dag plaats tot circa 0°C. Bij de vergisting is de warmtestroom circa 10 kW, bij het afkoelen 50 kW. Door de plaat stroomt een koude drager van circa -5°C.

7 SYMBOLEN

<i>A</i>	koelend oppervlak	m ²
<i>a</i>	temperatuurvereffeningscoëfficiënt	m ² /s
<i>c</i>	soortelijke warmte	J/(kg.K)
<i>D</i>	diameter of dikte	m
<i>e</i>	grondtal natuurlijke logaritmie	—
<i>g</i>	versnelling van de zwaartekracht	m/s ²
<i>h</i>	enthalpie	J/kg
Δh	enthalpieverschil	J/kg
<i>i</i>	component	—
<i>k</i>	warmtedoorgangscoefficiënt	W/(m ² .K)
<i>L</i>	karakteristieke lengte	m
<i>ln</i>	natuurlijke logaritmie	—
<i>m</i>	massa	kg
\dot{m}	massastroom	kg/s
<i>n</i>	aantal componenten	—
<i>Q</i>	warmte	J
\dot{Q}	warmtestroom	W
<i>R</i>	afstand van kern tot oppervlakte	m
<i>T</i>	temperatuur	K
<i>T_p</i>	produkttemperatuur	K
<i>T_k</i>	temperatuur van de koelende materie	K
ΔT	temperatuur verschil	K
\bar{T}	gemiddelde temperatuur	K
<i>t</i>	tijd	s
<i>t_v</i>	vriestijd	s
<i>u</i>	snellheid	m/s
<i>x</i>	absolute vochtigheid of plaatscoördinaat	kg/kg m
α	warmte-overdrachtscoëfficiënt	W/(m ² .K)
β	cubieke uitzettings coëfficiënt	K ⁻¹
ϵ_n	versterkingsfactor	—
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	W/(m.K)
η	dynamische viscositeit	Pa.s
ν	kinematische viscositeit	m ² /s
<i>q</i>	soortelijke massa	kg/m ³
Θ	dimensieloze temperatuur	—
τ	dimensieloze tijd of tijdconstante	— s
ξ	dimensieloze plaats	—
<i>Bi</i>	getal van Biot	—
<i> Fo</i>	Fourier	—
<i> Gr</i>	Grashof	—
<i> Nu</i>	Nusselt	—
<i> Pr</i>	Prandtl	—
<i> Re</i>	Reynolds	—