012

Archief exemplant

AFSTUDFERVERSTAG No. 99

door

C.G.Koen

Juni 1959-

Warmteoverdracht en spatten bij Filmverdamping

Laboratorium voor PHYSISCHE TECHNOLOGIE der Technische Hogeschool Pri Bernhardlaan 6 - DELFI

Techni sche Physi ca

# AFSTUDEERVERSLAG

# "WARMTEOVERDRACHT EN SPATTEN BIJ

--\_\_\_\_\_\_FILMVERDAMPING".\_\_\_\_\_

C.G.KOEN KOORNMARKT 45 DELFT.

STUDIERICHTING : T.

PERIODE : APRIL 1958 - JUNI -----\_ 1959.

#### INHOUDSOPGAVE.

#### Samenvatting. 1. 1 2. Aanleiding tot dit onderzoek. 1 3. Theoretische inleiding. 2 Stroming van vallende films. a. b. De filmverdamping. 3 c. Het ontstaan van een dampbel en de invloed van het wandmateriaal. 5 d. Het optreden van schuim. 6 De invloed van golven op de verdame. pingssnelheid. 8 f. Het spatten. 8 4. De apparatuur. 9 Schema van de opstelling. a. 9 Beschrijving van de vloeistof- en b. dampstromen in de apparatuur. 9 с. De filmverdamper. 9 5. De metingen en de berekeningen. 13 Keuze van de voeding. a. 13 b. Methoden om het spateffect te meten. 13 с. Het bepalen van de fractie MeOH en de diverse massastromen. 14 Bizondere waarnemingen. d. 15 e. Het principe van de berekeningen. 15 Een uitgewerkte berekening van 🗙 f f. en het percentage spatten. 18 De berekening van $\overline{\mathbf{x}}_{\mathbf{f}}$ bij aanname dat g. de film laminair stroomt. 20 Bespreking van de meetresultaten en con-6. clusie. 21 7. Lijst van gebruikte symbolen. 23 8. Litteratuurlijst. 24 9. Grafieken.

#### PAGINA.

## 1. Samenvatting.

Er werd een filmverdamper gebouwd, waarmee het mogelijk was een studie te maken van de warmte-overdracht en van de bij het koken van de film optredende spatverschijnselen.

Hiermee werd de gemiddelde partiële warmte-overdrachtscoëfficiënt wand-filmoppervlak ( $\overline{\alpha}_{f}$ ) bepaald als functie van het gemiddelde temperatuur verschil wand-film ( $\overline{\Delta}T$ ) en het vloeistofdebiet ( $\Gamma_{m}$ ).

De film, die bestaat uit een mengsel van methylalcohol en water, stroomt aan de buitenkant van een messingpijp. Deze pijp wordt aan de binnenkant verwarmd door condenserende stoom. We meten met thermokoppels de wandtemperaturen op verschillende hoogten en bepalen de enthalpieën van de voeding, het filmconcentraat, de spatjes en de damp. De hoeveelheid spatjes volgt uit een materiaalbalans en de  $\propto_{\rm f}$  berekenen we m.b.v. de enthalpiegegevens.

Uit de metingen volgt, dat bij een verhoging van de wandtemperatuur de verdampingssnelheid sneller toeneemt dan de spatstroom. Verder blijkt het af te hangen van de dampbellenproductie in de film of  $\swarrow_{\mathbf{f}}$  stijgt dan wel daalt bij een verhoging van  $\overline{\Delta T}$ .

## 2. <u>Aanleiding tot dit onderzoek.</u>

<u>Sarukhanian</u> (1) vermeldt metingen van <u>Karetnikoff</u> (2) aan kokende en niet-kokende waterfilms. Deze voerde alle proeven uit bij 60<sup>°</sup>C, d.w.z. de kokende film bij verlaagde druk en de niet-kokende bij 1 ata.

Voor een niet-kokende film stelt hij de overgang laminair-turbulent bij Re = 1400. De overgang naar het turbulente gebied bij een kokende film vindt plaats bij een warmtetoevoer die ligt tussen 2300 en 3500 J/m<sup>2</sup>sec. en bij een Re-getal tussen 400 en 1000. Bij een constante vloeistof belasting ham  $\overline{\alpha}_{f}$  of bij toenemende  $\overline{\Delta T}$ .

Hieronder volgen zijn resultaten in twee grafieken.



Het in dit verslag vermelde onderzoek was begonnen om deze verschijnselen nader te onderzoeken. Tevens werd als doel gesteld na te gaan of het spatten van de kokende film samen zou hangen met de schuimvormende eigenschappen van de vloeistof.

3. Theoretische inleiding.

# a. Stroming van vallende films.

De elementaire vergelijking voor de laminaire film, die langs een verticale wand stroomt, is af te leiden uit de Navier-Stokes vergelijking. Hieruit volgt, dat er in de film een parabolische snelheidsverdeling bestaat. Voor de filmdikte blijkt dan te gelden:

$$S = \left(\frac{3 \, \pi \, \Gamma_{\rm m}}{\rho^2 \, \rm g}\right)^{1/3}$$

 $\mathcal{M}$  $\Gamma_{\mathrm{m}}$ dynamische viscositeit van de film  $(Nsec/m^2)$ vloeistofbelasting per eenheid van = breedte van de wand (kg/m sec.) versnelling van de zwaartekracht  $(m/sec^2.)$ g P dichtheid van de film  $(kg/m^3)$ S filmdikte -(m)

Het getal van Reynolds wordt gedefinieerd als: Re =  $\frac{4 \int_{m}}{2}$  De snelheidsverdeling in de vallende film verandert, indien een gasstroom een schuifspanning veroorzaakt aan de buitenkant van de film. De invloed op de filmdikte wordt eerst merkbaar bij grote gassnelheden (bij 1 ata, ca. 10 m/sec). Bij kleinere gassnelheden kan reeds golfvorming ontstaan.

Indien de film stroomt met een Re > 40, treden aan het oppervlak rimpelingen op. Deze kunnen nog worden versterkt door onregelmatigheden in het wandoppervlak, een gasstroom en een eventueel inloopverschijnsel.

## b. De filmverdamping.

Bij filmverdamping vindt de verdamping plaats vanuit een dunne vloeistoflaag, die langs een verwarmd oppervlak stroomt. In het eenvoudigste geval treedt geen koken op en hebben we slechts te maken met oppervlakte-verdamping.

De warmtetoevoer vindt plaats door de wand. Deze heeft een temperatuur  $T_w$  en het vloeistofoppervlak een temperatuur  $T_B$ , welke behoort bij de heersende dampspanning. In de stationaire toestand en op één bepaalde plaats is bij laminaire stroming van de film de warmtestroomdichtheid te beschrijven met:

$$\emptyset_{w}^{"} = \frac{\lambda}{S} (T_{w} - T_{B})$$

en de dampproductie per eenheid van oppervlak met:

λ		warmtegeleidingscoëfficiënt van de film	$(J/m^{O}C_{SPC})$
r	п	verdampingswarmte	$(J/k\sigma)$
Ø <sub>w</sub> "	п	warmtestroomdichtheid	$(J/m^2 gec)$
$\emptyset_{\rm m}$ "	=	dampstroomdichtheid	$(kg/m^2 sec)$ .

De stromingstoestand, de filmdikte en de concentratie van de film veranderen met de afstand van het punt waar de film begint. (Bij een binair systeem verdampt aan het oppervlak relatief meer van de lichte component dan aan de wandzijde. Dan is aan de wandzijde de concentratie hoger dan de gemiddelde concentratie in de rest van de vloeistof. Dit heeft tot gevolg een afname van de verdampingssnelheid).

Wanneer de wand met condenserende stoom wordt verwarmd, zal i.h.a.  $T_W$  niet over de hoogte constant zijn. Het is niet met zekerheid te voorspellen of  $T_W$  zal stijgen dan wel dalen, want dit hangt af welke van de warmteweerstanden bepalend is voor de totale warmte-overdracht. Er zijn twee grote warmteweerstanden, n.l. de naar beneden toe dikker wordende stoomcondensaatfilm en aan de andere kant van de wand de vallende film.

Meestal hebben we tevens te maken met kookverschijnselen in de film. Het verdampingsmechanisme is nu gecompliceerder, want naast de oppervlakteverdamping hebben we nu ook kookverschijnselen. Hoe en in welke mate dit gebeurt weten we niet, maar we zouden ons t.a.v. het groeimechanisme van de bellen en het mechanisme van de warmte-overdracht het volgende kunnen voorstellen.

## 1. Het groeien van een dampbel.

Een heel klein belletje ontstaat aan het wandoppervlak en wordt zeer snel groter. Deze groei is het gevolg van de hogere temperatuur van de omringende vloeistof. Er vindt verdamping plaats vanuit de vloeistof naar de bel. In het geval van een binair systeem treedt er tevens diffusie op van de lichte component naar het grensvlak vloeistof-dampbel.



In schets III steekt de bel buiten het filmoppervlak en kunnen er twee dingen gebeuren:

- a. De bel gaat stuk.
- b. We krijgen een situatie, zoals in schets IV is weergegeven.

# 2. <u>Tijdelijke bezetting van een deel van het oppervlak</u> door de dampbellen.

Indien we  $\Delta T$  vergroten worden er meer dampbellen gevormd. Er ontstaan dus tijdelijk "droge plekken", die in aantal toenemen bij grotere  $\Delta$  T. Daar in een film de bellen geen roerend effect hebben, neemt de schijnbare warmte-overdrachtscoëfficiënt af met grotere  $\Delta$  T. Echter, de warmtestroom gaat niet alleen rechtstreeks via de vloeistof naar het filmoppervlak, maar ook voor een deel via de vloeistof naar de dampbellen. In het laatste groeistadium heeft de bel geen contact meer met het wandoppervlak en is de situatie zoals in schets IV. In de bel bevindt zich damp en de druk hiervan is slechts een fractie hoger dan de druk in de dampruimte van de filmverdamper. Dus is ook de temperatuur in de bel practisch gelijk aan de damptemperatuur buiten de bel. Er is dan ook geen reden om aan te nemen dat de oppervlakteverdamping wordt verminderd door de aanwezigheid van de bellen. We hebben aangenomen, dat de oververhitting groot genoeg is om de bellen aan het wandoppervlak te vormen.

# 3. Een meer permanente bezetting van een deel van het oppervlak door de dampbellen.

Aan het wandoppervlak ontstaan "droge plekken", die weliswaar van plaats veranderen, maar gemiddeld een bepaalde fractie van het oppervlak bezet houden. Vanaf deze "droge plekken", d.w.z. vanaf het grensvlak dampbel-vloeistof, vertrekken voortdurend nieuwe belletjes naar het filmoppervlak. Bij toename van  $\overline{\Delta T}$  ontstaan meerdere "droge plekken", met als gevolg een afname van  $\overline{\prec_f}$ . We hebben hier te maken met het Leidenfrostverschijnsel in zijn beginstadium.

# c. Het ontstaan van een dampbel en de invloed van het wandmateriaal.

Indien we de vorming van een dampbel <u>in</u> de vloeistof vergelijken met de oppervlakte verdamping, dan zal in het eerste geval een oververhitting nodig zijn voor het vormen van dampkiemen. Volgens <u>Larson</u> (3) kan men bij belletjes van de orde van grootte van enkele moleculen al spreken van kookkiemen.

De overtemperatuur voor het verkrijgen van kookkiemen is des te hoger, naarmate de vloeistof het oppervlak beter bevochtigt. De aanwezigheid van "actieve" plaatsen aan het oppervlak (oneffenheden, geadsorbeerd gas) bevorderen de kiemvorming.

Voor het instand houden van de film maakt het verschil of de film over een al dan niet bevochtigd oppervlak moet stromen. Het is raadzaam het oppervlak bevochtigd en dus vetvrij te houden.

Glas bezit een kleine randhoek en heeft dus goede bevochtigingsmogelijkheden. Het is echter ongeschikt als wandmateriaal, omdat het een slechte warmtegeleider is. Het gunstigste materiaal bezit een zo groot mogelijke waarde van  $G_{\rm GS}$  -  $G_{\rm LS}$  en is tevens een goede warmtegeleider. Messing beantwoordt aan deze eisen. Heertjes (4).

# d. Het optreden van schuim.

Het schijnt, dat de verdampingssnelheid wordt verminderd, wanneer de kokende film in een schuimlaag verandert. T.N.O. (5).

Schuim is een dispersie van dampbellen in de vloeistofphase en het kan ontstaan als de oppervlaktespanning van de film verandert. Deze oppervlaktespanningsverandering is het gevolg van een temperatuur- of concentratie gradiënt in de vloeistof.

We onderscheiden 3 systemen (Zuiderweg en Harmens (6):

1.	Positief	systeem.	Hierbij tijdens	stijgt de vei	de cdar	oppervlakte nping.	spanning
2.	Nagatief	systeem.	Hierbij tijdens	daalt de ver	de dan	oppervlakte	spanning
3.	Neutraal	systeem.	Hierbij	blijft	de	oppervlakte	spanning

systeem. Hierbij blijft de oppervlakte spanning tijdens de verdamping constant.

Tijdens de verdamping is de dikte van de film niet constant. Rimpels in het oppervlak veroorzaken dunne plekken.

Bij een negatief systeem bezit de hoogst kokende component de laagste oppervlaktespanning. De dunne plekken bevatten meer van de zware component en zijn door hun lagere oppervlakte spanning zwakker dan het aangrenzende en dikkere deel van de film.

LAGERE OPP. SP. AFBREKEN VAN DE FILM STABILISEREN VAN EEN STRAALTJE

Bij een positief systeem gaan de dunste plaatsen in de film meer bevatten van de component met de hoogste oppervlaktespanning. Deze plaatsen worden dus versterkt en de film stabiliseert zich.

LAGERE OPP. SP. STABILISEREN VAN DE FILM.

Bij de kokende film kan de levensduur van de dampbellen worden verlengd door versterking van de zwakste plekken. Deze bevinden zich tussen de aangrenzende bellen. In het geval van het positief systeem bevatten de zwakste plekken het meest van de zwaarste component, die met de hoogste oppervlaktespanning. Hierdoor wordt de vloeistof tussen de bellen getrokken, hetgeen dus een versteviging betekent.

7

1.0145

LAGERE OPP. SPANNING DAMP Bei

# e. De invloed van golven op de verdampingssnelheid. T.N.O. (5).

Het filmoppervlak is reeds gerimpeld bij een Re > 40 en de buitenkant van de film is dan zwak turbulent. Bij toename van Re breidt deze turbulentie zich uit over de gehele filmdikte. Wanneer de amplitudo van de rimpels de orde van grootte van de filmdikte bereikt, is

$$\left(\frac{\overline{1}}{\overline{5}}\right) > \frac{1}{\overline{5}}$$

In dit geval is de verdampingssnelheid groter dan we zouden verwachten volgens:

$$\emptyset_{\rm m}^{"} = \frac{\lambda}{\delta r} (T_{\rm w} - T_{\rm B})$$

### f. Het spatten.

Het kookverschijnsel in een film impliceert het afspatten van vloeistof van de wand. Het spateffect is dus ook afhankelijk van de aard van het wandoppervlak en het zal groter worden bij hogere wandtemperatuur.

De schuimvorming is bevorderlijk voor het spatten, want de kans stijgt dan dat vloeistof wordt meegesleurd door de damp.

Onderzoekingen over de druppelvorming bij spatten zijn gedaan o.a. door <u>O'Connel</u> c.s. (7), <u>Vorkauf</u> (8) en <u>Manowitz</u> (9).



4. De apparatuur.

a. Het schema van de opstelling.

b. <u>De beschrijving van de vloeistof- en dampstromen in</u> de apparatuur.

De tot kooktemperatuur voorgewarmde voeding voor de filmverdamper stroomt in een overloopruimte, die boven in de verdamperpijp is aangebracht. Een thermokoppel (chromelalu**me!**) meet op deze plaats de temperatuur van de voeding. Er vormt zich een film aan de buitenkant van de pijpwand. De pijpwand wordt aan de binnenkant verwarmd door condenserende stoom. De hoeveelheid stoomcondensaat kunnen we meten met een meetvat. Achter dit meetvat is een condenspot aangebracht. We kunnen het verdampingsproces gadeslaan, daar de pijp omgeven is door een glazen mantel.

De gevormde damp wordt voor een gedeelte afgevoerd over de top van het apparaat. In een aparte condensor vindt condensatie plaats tot "dampcondensaat".

Indien de film kookt en er spatjes ontstaan, worden deze opgevangen samen met het condensaat van de damp, dat ontstaat aan de binnenkant van de glazen mantel. De glazen mantel is opgesteld in lucht van kamertemperatuur en er zal altijd een deel van de damp aan de wand condenseren. We vangen op de fractie "spatjes + condensaat".

De derde fractie die we apart aftappen is het "filmconcentraat". De drie verschillende massastromen passeren ieder afzonderlijk een glazen meetvat en komen dan weer bij elkaar in een verzameltank. M.b.v. een centrifugaalpompje wordt alle vloeistof weer teruggevoerd naar de beide voedingsvaten. Deze vaten zijn aangesloten op een persluchtleiding, zodat we de voeding onder druk kunnen zetten. Het instellen van een bepaald debiet geschiedt met een naaldafsluiter en een rotameter (P.T.L. 1490).

## c. De filmverdamper.

De verdamperpijp is van messing en heeft een lengte van 720 mm en een doorsnede van 38/42 mm.

De uitstroomopening van de voeding zit onder de vloeistofspiegel in de overloopruimte en een gedeelte van de snelheidsenergie wordt omgezæt in wervels. Een kapje aan de



uitstroomopening voorkomt dat condensaat terecht komt bij het filmconcentraat. Teneinde de vloeistof over de bovenrand van de pijp te verdelen, plaatsen we een messinggaasje in de overloopruimte. De bevochtiging van de bovenkant van de pijpwand wordt echter nog beter, wanneer aan beide kanten van het messinggaasje een hydrophiel (verband)gaasje zit. De wandtemperaturen

worden met thermokoppels op 8 verschillende plaatsen gemeten. Deze thermo-

koppels bestaan uit éénpolige Ni-Cr draden van 0,5 mm uitwendige diameter met steeds als de tweede pool de messingpijp zelf. De meetplaatsen zijn op ongeveer 80 mm afstand van elkaar spiraalsgewijs verdeeld over de pijpwand. De Ni-Cr draden liggen in groeven van 0,7 mm diepte en zijn bedekt met een dun laagje tin-soldeer. Het wandoppervlak is na deze bewerkingen weer glad gepolijst. De 8 draden als beurtelings de ene pool en een messingdraad (zelfde samenstelling als de pijpwand) bevestigd aan de pijpwand als de andere pool, worden m.b.v. een klein messing buisje door de bodem van de verdamper naar buiten geleid.



De glaskraal dient ter ondersteuning van de kern van de draad, die geen contact mag maken met de roestvrij stalen buitenmantel.



Het aanbrengen van een dergelijke glaskraal geschiedt door het blanke uiteinde van de draad te dompelen in gesmolten glaspoeder. Dit materiaal heeft de handelsnaam "Glazing Flux" en wordt veel gebruikt voor het Pyrotenax verwarmingsdraad. Voor het aflezen van de thermospanning gebruiken we een compensator (dr C.E.Bleeker, P.T.L. 1730) met een uitwendige galvanometer (Kipp) Type A 75 (P.T.L. 1217).



Bij het ijken van de thermokoppels is gebleken, dat de thermospanning van de combinatie Ni-Cr/messing slechts 5,7

 $V/^{O}C$  bedraagt. Dit is heel weinig. Een afleesfout in de ijktemperatuur plus een afleesfout bij de compensator en een instelfout van de galvanometer, veroorzaken een grote onnauwkeurigheid bij de bepaling van de wandtemperatuur. Een betere nauwkeurigheid dan <u>+</u> 1<sup>O</sup>C kunnen we zelfs niet verwachten. Niettegenstaande de ongelukkige keuze van deze thermokoppels kan het onderzoek toch nut hebben als een algemene oriëntatie en inleiding.

Het uitvoeren van de ijking is geschiedt door de pijp met de thermokoppels in een lange ijzeren bak te brengen. De bak is gevuld met warme paraffine-olie (Risella 17) en geïsoleerd van de omgevende lucht door een 10 cm dikke glaswollaag. Als ijktemperatuur is genomen de temperatuur van de olie zo dicht mogelijk bij het wandoppervlak en ter hoogte van het te ijken thermokoppel.

### 5. De metingen en de berekeningen.

### a. De keuze van de voeding.

Wanneer we de hoeveelheid spatjes willen bepalen is het noodzakelijk, dat er een verschil bestaat tussen de spatjes en het condensaat. Het ligt dan voor de hand om een binair systeem te kiezen. De eisen die we aan de voeding stellen zijn:

- 1. Een goede bevochtiging van het messingoppervlak.
- 2. Een kookpunt in de buurt van 100°C.
- 3. Bij deze temperatuur mag het niet ontleden.
- 4. Het mag niet corroderend werken op messing.
- 5. Eenvoudig te analyseren.
- 6. Goedkoop.
- 7. Enthalpie gegevens bekend.

Aan deze eisen voldoet het systeem methylalcohol-water. Daar dit systeem als voeding wordt gebruikt voor de Müller filmverdamper in het laboratorium voor Physische Technologie, zijn indertijd al gegevens verzameld over de relatie brekingsindex-samenstelling en over het enthalpie-samenstellingsdiagram.

De uiteindelijke metingen zijn verricht bij een samenstelling van de voeding van 4 gew.% MeOH, d.w.z. een kookpunt van 93<sup>°</sup>C. Zuiver water vormt heel moeilijk een film, maar met enkele procenten MeOH erbij gaat het uitstekend.

De oppervlaktespanning van water bij 100°C bedraagt 58,8 dyne/cm.

De oppervlaktespanning van MeOH bij 100<sup>°</sup>C bedraagt 15,7 dyne/cm.

b. Mogelijke methoden om het spateffect te meten.

b.l. Colorimetrisch.

Een hiervoor veel gebruikte kleurstof is kristalviolet. Dit kan  $100^{\circ}$ C verdragen en is bij deze temperatuur niet vluchtig. De colorimetrische analyse voor het bepalen van het spateffect in een triple-effect filmverdamper is door andere onderzoekers toegepast. <u>Heertjes</u> (4). Echter een groot bezwaar was hierbij de sterke adsorptie van de kleurstof aan de wand van de verdamper. Dit is een foutenbron, die al naar voren kwam tijdens de inleidende proeven met een colorimeter van het type Lumetron.

## b.2. Conductometrisch.

We zouden de geleidbaarheidsmetingen kunnen uitvoeren met een Philoscoop. Deze methode is niet bruikbaar voor het systeem MeOH-water, omdat MeOH geen ionen levert. We kunnen natuurlijk wel ionen aan de oplossing toevoegen, maar deze analyse-methode is toch te onnauwkeurig voor ons doel.

# b.3. <u>Titratie-methode</u>.

Er bestaat niet zonder meer een titratie-methode op MeOH. Wanneer we een vreemd ion, bijvoorbeeld in de vorm van een calciumzout toevoegen, is het mogelijk de Ca-ionen komplexometrisch op snelle wijze te titreren. Al spoedig zouden we een aankorsting op de pijpwand aantreffen en dit is bezwaarlijk.

Wij hebben het spateffect bepaald door in aanmerking te nemen het verschil in molfractie MeOH in de spatjes en in de damp. Hierop wordt nog teruggekomen bij het principe van de berekening.

# c. Het bepalen van de fractie MeOH in de diverse massastromen.

Na het meten van de debieten en de temperaturen van het filmconcentraat, spatjes + condensaat en dampcondensaat, nemen we van elk een monster. In een Zeiss-Abbe refractometer bepalen we de respectievelijke brekingsindices bij 17°C en vinden dan uit de ijkgrafiek de bijbehorende gewichtsfractie. Deze gegevens maken het nu mogelijk om direct de enthalpieën op te zoeken en vervolgens een warmtebalans op te stellen. De warmtebalans wordt behandeld bij het principe van de berekening.

### d. Bizondere waarnemingen.

De dampbellen op het filmoppervlak variëren sterk in



grootte en voor zover het oog betrouwbaar waarneemt bewegen de bellen mee met het filmoppervlak. De spleet onder aan de pijp wordt gevormd door de wand, en een messingkapje en is 3,5 mm breed. De dampbellen, die verder uitsteken dan 3,5 mm van de wand, worden van de film afgestroopt door het kapje. Per definitie rekenen we deze

afgestroopte vloeistof ook tot de spatjes.

Het is niet te zien of er een slechtere bevochtiging ontstaat tengevolge van de aanwezigheid van meer dampbellen. Een moeilijk, maar belangrijk onderdeel van de meting is het nauwkeurig instellen en constant houden van de voedingtemperatuur. We controleren dan ook voortdurend de aanwijzing van het thermokoppel in de overloopruimte. Wanneer de zojuist gevormde film niet de kooktemperatuur bezit, maar wa**û**meer of kouder is, bepalen we een foute <del>av</del>f.

# e. Het principe van de berekeningen.

We meten de molenstromen van de 4 massastromen die de verdamper binnengaan en weer verlaten. Een materiaalbalans luidt: waarin: 

 $\phi_d$  = molenstroom damp (kmolen/sec.).  $\emptyset_{\text{sp.+ cond.}}$  = molenstroom spatjes + condensaat (kmolen/sec.)

x = molfractie MeOH. en

De spatstroom vinden we uit de volgende vergelijkingen:  $\emptyset_{\text{cond.}} \xrightarrow{x_{\text{cond.}}} + \emptyset_{\text{sp}} \xrightarrow{x_{\text{sp}}} = \emptyset_{\text{sp.+ cond.}} \xrightarrow{x_{\text{sp.+ cond.}}}$ 

Indien we aannemen, dat  $x_{cond.} = x_d$  (hetgeen principiëel niet juist is i.v.m. een klein rectificatie-verschijn-sel in de verdamper), en x<sub>sp.</sub> =  $\frac{x_v + x_f}{2}$ , kunnen we schrijven:

$$\emptyset_{\text{cond.}} + \emptyset_{\text{sp.}} = \emptyset_{\text{sp.+ cond.}}$$

Er zijn meerdere veronderstellingen te doen:

1. 
$$x_{sp.} = \frac{1}{2} (x_v + x_f)$$

- x<sub>sp</sub>. is in evenwicht met de damp (door uitwisseling 2. met de druppeltjes). Dan: x<sub>sp</sub>. = x<sub>d</sub>
- 3) xsp.+ cond. is in evenwicht met de damp. Dan: x<sub>sp.+ cond.</sub> = x<sub>d</sub>. Echter de metingen geven steeds een groot verschil.

Wij hebben onze metingen steeds gebaseerd op de eerste veronderstelling.

Definitie: mol.percentage spat =

kmol spat 100 kmol spat + kmol cond. + kmol damp

Het is natuurlijk een gemiddelde waarde over de hoogte

van de pijp, want het spatten is afhankelijk van het temperatuurverschil wand-filmoppervlak.

De warmtestroom  $\boldsymbol{\varnothing}_{W}$  , die van de wand naar de film gaat, bedraagt:

De warmtestroom, die dient voor het verdampingsproces bedraagt:

$$\emptyset_{w} - \emptyset_{sp.}$$
 H<sub>sp.</sub>

In de praktijk blijkt de term  ${\rm \not\! P}_{\rm sp.}$   ${\rm H}_{\rm sp}$  rel. heel klein te zijn.

Het gemiddelde temperatuurverschil △T berekenen we als het rekenkundig gemiddelde van het temperatuurverschil wand – filmoppervlak boven en onder aan de pijp. Hierbij veronderstellen we dus, dat het plaatselijke temperatuurverschil een lineaire functie is van de hoogte van de pijp.

De temperatuur van het filmoppervlak vinden we uit een T-x figuur behorende bij de atmospherische druk. De molfracties van de voeding en het filmconcentraat zijn gemeten. We nemen aan, dat de druk in de kolom gelijk is aan de druk van de buitenlucht en we verwaarlozen dus de invloed van de drukval in de apparatuur. Het meetvat van de condensor staat in verbinding met de buitenlucht.

Formule voor  $\boldsymbol{\prec}_{\mathrm{f}}$  :

$$\overline{\alpha}_{f} = \frac{\varphi_{w}}{A \quad \overline{\Delta T}}$$

waarin A het verticale oppervlak is van de filmverdamper voor zover het zich bevindt beneden de overloopruimte.

We kunnen ter contrôle een warmtebalans opstellen over de gehele filmverdamper, inclusief de stoomzijde van de pijp.

Hiervoor moeten we de hoeveelheid stoomcondensaat corrigeren voor de convectie en stralingsverliezen en we doen dit door het stoomcondensaat te meten in de toestand, dat de buitenwand van de pijp droog is. Eigenlijk meten we zo een te groot verlies. Het verschil tussen de beide hoeveelheden nemen we hier als de gecorrigeerde hoeveelheid stoom. De warmte-balans.

 $\emptyset_{st}$  = stoomdebiet (kg/sec.) gecorrigeerd.  $\emptyset_{st.cond.}$  = stoomcondensaat debiet (kg/sec.)

f. Een uitgewerkte berekening van  $\overline{\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}}$  en het percentage spatten.

Gegevens van een meting d.d. 16-12-1958.

	n <sub>17</sub>	Gew.% MeOH	Molfractie	ke MeOH me	/sec. ngsel
voeding	1,3345	5,25	0,030	14,55	10-3
sp.+ cond.	1,3354	9,0	0,052	0,234	· 10 <sup>-3</sup>
filmcond.	1,3342	4,0	0,022	0,288	10-3
dampcond.	1,3416	32,0	0,210	14,10	10-3

$T_{w}$	boven	=	100,5°C
$T_{w}^{i}$	beneden	=	97,0°C
T	voeding	-	93,0°C
T	filmconc.	=	93,5 <sup>0</sup> 0
Т	stoom	=	100,0 <sup>0</sup> C
Т	st.cond.	=	91,5°C

Stoomdebiet tijdens de meting  $0,556 \cdot 10^{-3}$  kg/sec. Stoomdebiet zonder de film  $0,097 \cdot 10^{-3}$  kg/sec.

# Materiaalbalans.

Invoer  $14,55 \cdot 10^{-3}$  kg/sec. Uitvoer  $14,62 \cdot 10^{-3}$  kg/sec. dus een fout van 0,5 %.

	10 <sup>5</sup> × kmol/sec. MeOH	10 <sup>5</sup> × kmol/sec. water	10 <sup>5</sup> × kmol/sec. mengsel
voeding	2,73	76,00	78,73
damp	0,25	0,86	1,11
sp. + cond.	0,08	1,44	1,53
filmconc.	1,98	74,80	76,78

Materiaalbalans.

Invoer  $78,73 \cdot 10^{-5}$  kmol/sec. Uitvoer  $79,42 \cdot 10^{-5}$  kmol/sec. dus een fout van 0,8 %.

	kmol/sec. mengsel	molfractie MeOH	Enthalpie (kJ/kmol)
voeding	78,73 . 10 <sup>-5</sup>	0,035	7150
damp	1,11 . 10-5	0,225	46550
sp. + cond.	1,53 . 10 <sup>-5</sup>	0,057	
filmconc.	76,78 . 10 <sup>-5</sup>	0,025	7250
spatjes	A	0,030	7200
cond.	В	0,225	46550

 $0,030 \text{ A} + 0,225 \text{ B} = 0,057 \cdot 1,53 \cdot 10^{-5}$  $\text{A} + \text{B} = 1,53 \cdot 10^{-5}$ 

dus  $A = 1,32 \cdot 10^{-5}$  kmol/sec. B = 0,212 \cdot 10^{-5} kmol/sec.

en percentage spatjes = 50 %.

Warmtestroomberekening.

Uit T-x figuur volgt, dat de temperatuur van het filmoppervlak boven 94,3°C is en beneden 95,5°C.

Dus  $\Delta T$  boven is  $100,5 - 94,3 = 6,2^{\circ}C$ . en  $\Delta T$  beneden is  $97,0 - 95,5 = 1,5^{\circ}C$ .

Dan 
$$\Delta T = 3,85^{\circ}C$$
.  
Ingevuld in de formule voor  $\overline{\prec_{f}}$  vinden we  $\overline{\prec_{f}} = 1920 \text{ J/m}^{2} \text{ }^{\circ}C$  sec.

	kg/sec.	Enthalpie (kJ/kg)
		Enable and provide a contract a contract of the analysis of the statement of the second activity of the statement of the second statement of the
stoom ge <b>vorri</b> geerd	0,459 . 10 <sup>-3</sup>	2680
stoomcond.gecorrigeerd	0,459 . 10 <sup>-3</sup>	385

Warmtebalans (kJ/sec.).

5,63 + 1,23 
$$\leftarrow$$
 5,57 + 0,615 + 0,095 + 0,177  
dus een fout van 5,8 %.

g. <u>De berekening van df voor oppervlakte verdamping, als</u> <u>de film laminair stroomt.</u> Gegevens van een meting d.d. 20-2-1959. Rotameterstand is 20, d.w.z. 14,55 . 10<sup>-3</sup> kg/sec. Omtrek van de verdamperpijp is 0,132 m.

De massastroom per eenheid van breedte,  $\Gamma_{\rm m}$  = 0,110 kg/msec.

Gemiddelde filmtemperatuur is  $\frac{1}{2}(95,0+95,9) = 95,4^{\circ}C$ .

Gemiddelde samenstelling van de film is  $\frac{1}{2}(2,2+1,7)$  = 1,95 mol % = 3,4 gew. %.

Gemiddelde dynamische viscositeit van de film (10):

$$2_{95,4} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Nsec/m}^2$$

Gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt van de film (11)

$$\lambda_{95,4} = 0,678 \text{ J/m}^{\circ} \text{C} \text{ sec.}$$

De lijst van tabellen van de Nederlandsche Chemische Vereniging vermeldt voor de dichtheid bij 95,4°C:

 $\mathcal{C}_{95,4} = 0,9787 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

De versnelling van de zwaartekracht bedraagt:

$$g = 9,81 \text{ m/sec}^2$$
.

Deze gegevens ingevuld in de formule voor de filmdikte van een laminaire stroom, zoals vermeld in de theoretische inleiding,

Dus: 
$$\alpha_{f} = \frac{0,678}{0,22 \cdot 10^{-3}} = \frac{3020 \text{ J/m}^{2 \circ} \text{C sec.}}{200 \text{ J/m}^{2 \circ} \text{C sec.}}$$

Bij dezelfde condities zijn 2 metingen verricht. De ene levert een waarde voor  $\overline{\prec_{\rm f}}$  van 3170, de andere van 4215 J/m<sup>2</sup> °C sec.

Deze grote verschillen zijn waarschijnlijk te wijten aan de foute aflezing van de wandtemperatuur.

Een vergelijking van de berekende  $\overline{\mathbf{x}}_{\mathbf{f}} = 3020$  met de beide gemeten waarden heeft dan ook geen refeile betekenis.

Opmerking.

 $\underline{\text{Re}} = 1380$  voor de film van de meting van 20-2-1959. De gemiddelde valsnelheid  $\overline{\text{v}}$  vinden we uit:

$$\overline{v} = \frac{|_{m}}{|\mathcal{C}|\mathcal{S}|}$$

Bij deze film is:  $\overline{v} = 0,50$  m/sec.

6. Bespreking van de meetresultaten en conclusies.

De grafieken I t/m IV geven een beeld van het spateffect.

- <u>Grafiek I.</u> a. Het spatpercentage wordt kleiner met een toename van de wandtemperatuur. I.p.v. de wandtemperatuur gebruiken we de stoomtemperatuur, die wel betrouwbaar is. De wandtemperatuur is echter evenredig met de stoomtemperatuur.
  - b. Bij hogere vloeistofbelasting is het spatpercentage ook hoger.

<u>Grafiek II.</u> De spatstroom neemt minder snel toe met de wandtemperatuur dan de verdampingssnelheid.

<u>Grafieken III</u> <u>en IV.</u> Hierin is i.p.v. de stoomtemperatuur de warmtestroom uitgezet. We zien hier een bevestiging van de conclusie van grafiek II.

Niettegenstaande de onbetrouwbaarheid van  $\overline{\Delta T}$  en dus ook van  $\overline{\prec_f}$ , hebben we beide grootheden in grafiek gebracht.

Grafiek V.Bij deze metingen, die plaats vonden over een<br/>groot tijdsbestek, neemt  $\overline{\alpha}_f$  af met stijgende<br/> $\overline{\Delta T}$ . De metingen van Lettinga (12) zijn een<br/>vervolg op de eigen metingen, zodat  $\overline{\alpha}_f$  mis-<br/>schien kleiner is geworden door een groeiende<br/>vuillaag op de wand.<br/>De film schuimde flink en de foto onder 5 is<br/>genomen tijdens één van deze metingen.

Het zou wel kunnen zijn, dat een toename van de aankorsting een grotere kans impliceerde op een meer permanente bezetting van het wandoppervlak door dampbellen. Zie theoretische inleiding.

Indien we de kookgrafiek van vloeistoffen in een vat bekijken, zien we allereerst een stijging en vervolgens een daling van de warmte-overdrachtscoëfficiënt. De daling treedt op als  $\Delta T$  groter wordt dan 25°C. Het lijkt niet uitgesloten, dat bij de filmverdamper deze aanvankelijke stijging ook optreedt, maar dat dit slechts plaats vindt onder een veel kleinere waarde van  $\Delta T$ .

Symbolen-lijst.

Symbool	Omschrijving	Dimensie
A	warmte-uitwisselend oppervlak	 m <sup>2</sup>
$\overline{\ll}_{\mathrm{f}}$	gem.partiële warmte-overdrachts- coëfficiënt wand-filmoppervlak	J/m <sup>2 o</sup> C sec.
Γ <sub>m</sub> .	vloeistofbelasting per eenheid van breedte	kg/m sec.
S	filmdikte	m
g	versnelling van de zwaartekracht	m/sec <sup>2</sup> .
H	enthalpie per molaire eenheid	J/kmol.
λ	warmtegeleidingsvermogen	J/m <sup>O</sup> C sec.
N	dynamische viscositeit	Nsec/m <sup>2</sup>
P	dichtheid	kg/m <sup>3</sup> .
r	verdampingswarmte per molaire eenheid	J/kmol.
Re	getal van Reynolds	
$T_w$	wandtemperatuur	°C.
$\overline{\Delta^{\mathrm{T}}}$	gem.temperatuursverschil wand- filmoppervlak	°C•
v	gem.valsnelheid	m/sec.
Øw	warmtestroom	kJ/sec.
$\emptyset_{i}$	massastroom van i	kmol/sec.
x <sub>i</sub>	molfractie MeOH in massastroom i	Aur. 2011
6	oppervla kte spanning	N/m

1.	Sarukhanian, G.	Chemie Ing.Techn. <u>29</u> , 623 (1957).
2.	Karetnikoff, J.P.	J.Tech.Phys. (russ.) <u>24</u> , 193 (1954).
3.	Larson, R.F.	Ind.Eng.Chem. <u>37</u> , 1004 (1945).
4.	Heertjes, P.M., Nijman, J., Vogel M.P.	De Ing. <u>65</u> , Ch. 47 (1953).
5.	Intern.Rapport T.N.O. Nr	. 1530-1.
6.	Zuiderweg, F.J., Harmens, A.	Chem. Eng. Sc. 2/3, 89 (1958)
7.	O'Connel, Pettyjohn	Trans.Am.Inst.Chem.Engrs. <u>42</u> , 795 (1946).
8.	Vorkauf, H.	Forschungsheft 341 (1931).
9.	Manowitz	Chem.Eng.Progress <u>51</u> , 313 (1955).
10.	International Critical Ta	ables V, 20.
11.	Bates, O.K., Hazzard, G.	
	Palmer, G.	Ind.Eng.Chem. Anal.Ed. <u>10</u> , 314 (1938).
12	Lettinga	Verslag 4 <sup>e</sup> jaars practicum. Lab.voor Phys.Technologie.

tinte mos kant film kant film burs con jann cant











