Archieferemplanie (129)

CONSTRUCTIE VAN EN METINGEN LAN

EÉN KOELER-CONDENSOR.

129

J.J. Slechte oktober 1961

Laboratorium voor PHYSISCHE TECHNOLOGIE der Technische Hogeschool Pr. Bernhardlaan 6 - DELFT CONSTRUCTIE VAN EN METINGEN AAN EEN KOELER-CONDENSOR.

Waaron v. belong Maaron BDa, Kan 2

	INHOUD:	PAGINA:
I	Algemeen.	1
	1. Inleiding.	1
	2. Samenvatting.	1
	3. Ontwikkeling van het onderzoek.	2
II	De koeler-condensor.	3
	1. Inleiding.	3
	2. Filmcondensatie.	4
	3. De glazen buis.	4.
	4. Bevestiging van de vulstukken.	5
	5. Meesleuring.	6
	6. De gevolgde werkwijze.	6
III	Veranderingen aan de apparatuur.	8
	1. Niveau-instelling.	8
	2. Koelwatercircuit.	8
	3. Temperatuurmeting van het koelwater.	9
	4. Regeling van de koelwatertemperatuur.	9
	5. Koolzuur-toevoer.	10
IV	Het werken met de koeler-condensor.	11
•	1. Het aanzetten van de koeler-condensor.	11
	2. Het afzetten van de koeler-condensor.	12
	3. Het verrichten van proeven met de koeler-	,
	condensor.	12
	4. Bepaling van de molfractie in het condensaat.	13
V.	IJkingen.	
	1. IJking CO ₂ rotameters.	14
	2. IJking van de koelwaterrotameters.	14
•	3. IJking van de stoomrotameters.	14

14 15 15
15 15
15
15
15
16
16
17
17
17
18
19
23
24
25

I. Algemeen.

1. Inleiding.

Een veel voorkomende physische bewerking is het scheiden van een mengsel van gassen in de samenstellende componenten. Eén van de bruikbare scheidingsmethoden is de partiële condensatie met behulp van een koeler-condensor. De koeler-condensor kan alleen dan worden toegepast, als de omstandigheden zodanig zijn, dat één van de componenten (de damp) practisch volledig condenseert, terwijl de andere vrijwel niet condenseren (gassen), doch alleen worden afgekoeld.

Bij de condensatie hoopt het gas zich aan het koelend oppervlak op, waardoor de condensatiesnelheid van de damp afneemt. De diffusieweerstand van de gevormde gaslaag is voor een groot deel bepalend voor de condensatiesnelheid.

Onze koeler-condensor is gebouwd om de bestaande, min of meer omslachtige, berekeningsmethoden in de praktijk op hun juistheid te onderzoeken en zo mogelijk een betere methode aan te geven.

De koeler-condensor waaraan de metingen zijn verricht is een horizontale één-pijps condensor, waaraan allerlei voorzieningen zijn getroffen om de omstandigheden van punt tot punt nauwkeurig te kennen. Zijn al deze gegevens, zoals gassamenstelling, temperatuur van het fasengrensvlak en condensatiesnelheid bekend, dan kan men daaruit de diffusieweerstand berekenen en vergelijken met de theoretisch gevonden waarden.

2. Samenvatting.

Door <u>Blanken</u> en <u>van Nederveen</u>, <u>v.d.Mey</u> en <u>Schuringa</u> is zeer veel voorbereidend werk, zowel theoretisch als praktisch gedaan. Hierdoor was het mogelijk na het aanbrengen van slechts enkele verbeteringen direkt te beginnen met een serie oriënterende metingen. Als hieruit blijkt, dat er nog enige verbeteringen noodzakelijk zijn, zullen deze worden aangebracht en daarna zal een begin worden gemaakt met de metingen, die tot doel zullen hebben, de theorie van <u>Roozendaal</u> (4) aan de praktijk te toetsen.

3. Ontwikkeling van het onderzoek.

In 1955 besloot de werkgroep Condenseren en Verdampen van de Sectie voor Warmtetransport de invloed van een oncondenseerbaar gas op condensatie te onderzoeken.

In april van het volgend jaar bracht <u>Roozendaal</u> (4) een rapport uit, waarin hij theoretisch deze invloed behandelde voor een buis waarin hij over de gehele lengte een uniforme condensatiesnelheid aannam.

Naar aanleiding van dit rapport besloot de werkgroep de theorie te toetsen in een semi-technische opstelling. Eind 1957 werd een ontwerp voor deze opstelling ingediend door <u>Blanken en van Nederveen</u> (1), waarbij werd voorgesteld de condensor te verdelen in 35 hele en 2 halve secties met behulp van een vulstuk in de condensatieruimte; dit zou dan uit evenzoveel segmenten (condensaat opvangkamers) worden opgebouwd. Voor het niet-condenseerbare gas werd CO₂ gekozen, daar men door analyse van het condenswater met behulp van een T-x diagram de omstandigheden aan het fasen-grensvlak zou kunnen afleiden. Het apparaat werd zodanig geconstrueerd, dat technisch zeer veel mogelijkheden zou kunnen worden geeffectueerd.

Het onderzoek werd door <u>van der Mey</u> (2) voortgezet, die zich bezig hield met het probleem van de afdichting van de vulstukken onderling en tegen de pijpwand. Gezien de vele bewerkingen die de glazen buitenbuis zou moeten ondergaan, werd besloten de pijp uit drie secties te maken.

Dit introduceerde hiermee samenhangende nieuwe afdichtingsmoeilijkheden. <u>Van der Mey</u> (2) deed tevens een uitgebreid literatuuronderzoek naar de bestaande berekeningsmethoden voor een koeler-condensor.

De constructie werd vervolmaakt door <u>Schuringa</u> (3), die er in slaagde het apparaat in zijn geheel te laten werken. Na het probleem der druppelcondensatie te hebben onderzocht vond hij tevens de praktische oplossing voor de afdichtingsproblemen. (Zie II). Na nog vele andere technische moeilijkheden te hebben overwonnen slaagde hij er tenslotte in enige oriënterende metingen te verrichten.

2

II. De koeler-condensor.

1. Inleiding.

De koeler-condensor bestaat uit een roestvrij stalen koelwaterpijp en een glazen buis, die coaxiaal en horizontaal zijn opgesteld. Aan de onderkant van de metalen pijp zijn 35 hele en 2 halve vulstukken gemonteerd. Het ontstane condensaat staat tot de hoogte van de pijp-as, terwijl het grootste deel van het condensoroppervlak door vulstukken wordt weggenomen. Men kan afleiden, dat, indien de condensatie slechts op de bovenste halve pijpontrek plaats heeft, de filmdikte in een doorsnede vrijwel constant is. Hierdoor worden de berekeningen over de koeler-condensor zeer vereenvoudigd.

De vulstukken zijn zodanig gemonteerd, dat het niet mogelijk is, dat condenswater van het ene in het andere vulstuk kan overlopen. Hierdoor is het mogelijk om in de koeler-condensor voor een buissegment ter grootte van een vulstuk de condensatiesnelheid te meten.

Werkt men met een CO₂-stoom mengsel, dan kan men door analyse van het condensaat tevens de omstandigheden aan het fasengrensvlak bepalen. Door dit voor alle vulstukken te doen kan men het verloop van de omstandigheden aan het fasengrensvlak beschrijven.

On tot een verantwoorde berekening van deze gegevens te kunnen komen dienen aan de koeler-condensor de volgende eisen te worden gesteld:

A. Eisen ten aanzien van de constructie.

 $\underline{1}^{e}$ de constructie moet van dien aard zijn, dat storingen eenvoudig kunnen worden verholpen.

 2^{e} de afdichting tussen de vulstukken onderling en de vulstukken en de koelpijp moeten goed zijn.

<u>3^e</u> de niveau-instelling moet gemakkelijk zijn.

B. Eisen ten aanzien van de meet-omstandigheden.

 1^{e} de stoom moet als film condenseren.

 $\frac{2^{e}}{2}$ het stromingsbeeld mag niet door meetinstrumenten worden verstoord.

 3^{e} de gassnelheid moet zodanig zijn, dat geen hinderlijke meesleuring kan optreden.

2. Filmcondensatie.

Om berekeningen aan de koeler-condensor te kunnen uitvoeren moet de stoom op de koelpijp als film condenseren. Bij druppelcondensatie is de warmteweerstand niet gedefinieerd. Daar deze de grootste warmte-overdracht geeft is dit voor de praktijk de meest gewenste condensatievorm.

<u>Schuringa</u> kreeg ongewenste condensatievormen met gladde buizen van koper, aluminium en messing. Ook het staalstralen van deze materialen gaf naar zijn bevindingen weinig verbeteringen.

Tenslotte viel de keus op een roestvrij stalen pijp die met aluminiumoxyde werd gestraald. Dit bleek inderdaad een zeer goede bevochtiging te geven.

Enige ervaringen, die op een vergadering van de werkgroep Condenseren en Verdampen naar voren kwamen luidden echter geheel anders. Zij noemden het feit, dat de roestvrij stalen pijp geen druppelvorming maar een film gaf, een groot toeval. De ervaring was, dat het eenvoudigst een geroeste ijzeren pijp kon worden gebruikt. Men moest echter tot iedere prijs voorkomen, dat er vet op de pijp zou komen. Mocht dit wel het geval zijn, dan zou door veel met de pijp te werken het vet vanzelf worden verwijderd. Het voordeel van het gebruik van andere metalen, zoals koper, ijzer en aluminium boven roestvrij staal is, dat zij een kleinere warmte-weerstand hebben.

3. De glazen buis.

De glazen buis (fig.1) bestaat uit drie delen (twee delen van 880 mm en een deel van 775 mm lang, inwendige diameter 49,3 \pm 0,4 mm. De koeler-condensor is 2538 mm lang). Bij een eventuele breuk behoeft nu meestal slechts één deel te worden vervangen. Een buis van $2\frac{1}{2}$ m is door de glasblazer ook bijna niet te bewerken.

De delen zijn recht afgezaagd. De afdichting tussen de delen bestaat uit een afsluitende teflon ring en een rubber manchet om de verbinding.

In de buis zijn aan de bovenzijde gaten voor de samenstellingsmetertjes en aan de onderkant voor de condensaataftap aangebracht. Het was de bedoeling deze gaten te boren om het stromingsbeeld zo weinig mogelijk te verstoren. Hiertoe zijn met een paar glazen buizen, die door uitgloeien spanningsvrij gemaakt zijn, de volgende mogelijkheden onderzocht:

1^e boren met een diamantboor.

2^e slijpen met een ijzeren cylinder en amaril.

Beide methoden geven echter bij het doorkomen van de boor aan de binnenzijde van de buis afbrokkelen van de gatrand. Bij het verdere onderzoek is aan de binnenzijde van de buis een goed passend stuk glas geplakt om enige tegendruk te kunnen geven bij het doorkomen van de boor. Als lijmmiddelen zijn gebruikt: schellak, piceïne en was. Het lijmen met de gewenste dunne lijmlaag is moeilijk. Het is met beide methoden mogelijk gebleken een paar gaten goed te boren, doch de kans, dat per deel alle gaten goed worden, is uitermate klein. Door het boren komen er weer spanningen in het glas, die gemakkelijk aanleiding tot afbrokkelen kunnen geven. De buis noet dus eigenlijk na het boren van elk gat spanningsvrij worden gemaakt. Ultrasonoor boren heeft dezelfde bezwaren.

Verstoring van het stromingsbeeld treedt echter door het afdichten van de gaten of het aanbrengen van de meter-

tjes toch op.

De gaten in de buis zijn nu door uittrekken en opruimen gemaakt. De diameters van de gaten en de onderlinge afstanden zijn echter niet zo nauwkeurig, als met boren mogelijk was geweest.

4. Bevestiging van de vulstukken.

Blanken en van Nederveen (1) zijn uitgegaan van vulstukken met twee overlangse gaten, waardoor trekstangen liepen. De afdichting tussen de vulstukken bestond uit een halve rubber ring, die aan beide zijden iets uitstak. De constructie was eenvoudig. Het was echter niet mogelijk zowel tegen de koelpijp als tegen de glazen buis af te dichten. Door de krachten, die het rubber op de pijp uitoefende, ging de pijp krom staan. <u>v.d.Mey</u> (2) heeft op een kort stuk nagegaan, dat een totaal gewicht van 200 kg verdeeld over de gehele lengte van de pijp noodzakelijk was om de koelpijp te kunnen centreren. De bevestiging van de gewichten aan de onderzijde van de pijp is zeer moeilijk uit te voeren. Het is dan nog maar de vraag of de afdichting bij de 37 vulstukken volledig is.

Een voorstel om de vulstukken op de pijp te lijmen heeft de bezwaren, dat men de pijp niet meer met Al₂0₃ behandelen en de vulstukken niet meer kan vervangen.

Eenvoudiger is het om de vulstukken met draadstangetjes op de pijp te bevestigen (fig.1). Met tin aangesoldeerde draadstangetjes laten gemakkelijk los. Door gebruik te maken van zilversoldeer bestaat door plaatselijke oververhitting, ongeveer 700°C, een grote kans op krontrekken van de pijp. De draadstangetjes zijn nu bevestigd in getapte gaatjes. Afdichting vindt plaats door een weinig tinsoldeer.

5. Meesleuring.

Om een juist beeld te krijgen van wat er geschiedt in de buis, is het noodzakelijk, dat al het condens, dat wordt gevormd op de koelpijp over de lengte van een vulstuk ook inderdaad door het betreffende vulstuk wordt opgevangen. Werkt men met grote invoersnelheden van de stoom (4 - 10 g/s), dan bestaat er de mogelijkheid, dat er condensaat wordt meegesleurd en in een verder gelegen vulstuk wordt opgevangen. Om na te gaan welke gassnelheden nog toelaatbaar zijn werd een blauwe kleurstof op de koelwand geïnjecteerd en gekeken hoever deze kleurstof nog werd meegesleurd. Het bleek, dat alleen voor de debieten van de kleine rotameter (tot 3 g/s).

6. De gevolgde werkwijze.

Bij de aanvang van het onderzoek van het laatste jaar werd besloten na te gaan in hoeverre met de bestaande apparatuur verantwoorde metingen konden worden gedaan. Allereerst werd daartoe de condensor gedemonteerd om hem schoon te maken en de afdichtingen te controleren. De spreiding, die bij de allereerste metingen werd gevonden, werd toegeschreven aan vuil in de apparatuur. Later bleek, dat deze spreiding een andere oorzaak had.

De eerste proeven waren er op gericht een inzicht te

krijgen in de mate van meesleuring (II-5).

Toen hierover voldoende bekend was werden de eerste condensatieproeven gedaan. Hierbij werd het gas-dampmengsel gekoeld door koelwater, dat in gelijk-stroom liep, het stoomdebiet en CO₂-debiet werden gevariëerd. Al spoedig bleek hoe moeilijk het was het niveau in te stellen (III-1). De gevonden waarden van de condensatiesnelheid vertoonden onder overigens gelijk gehouden omstandigheden enorme verschillen.

Na deze moeilijkheden te hebben overwonnen werd nog een serie metingen gedaan om de reproduveerbaarheid te controleren (zie tabel I).

Daar het de bedoeling was de theorie van Roozendaal te testen, werd nu een aanvang gemaakt met de metingen met uniforme condensatiesnelheid, waarbij het koelwater in tegenstroom liep. Weldra bleek, dat, wilde men alle omstandigheden goed kennen, er nog enige veranderingen in de apparatuur moesten worden aangebracht. Daartoe ging men over van het grote- naar het kleine-koelwatercircuit en tevens werden enige rotameters ingebouwd (III-2). De temperatuurmeting van het koelwatercircuit werd verbeterd (III-3) en tenslotte werd een temp.regeling in dit circuit aangebracht (III-4). Ook de rotameter van de CO₂-toevoer bleek niet te voldoen, waarna deze werd vervangen door enige anderen (III-5).

Men was nu in staat een aanvang te maken met de metingen aan proeven met uniforme condensatie-snelheid. Er zijn vier variabelen bij deze metingen, te weten:

> het CO₂-debiet het stoomdebiet het koelwaterdebiet de koelwatertemperatuur.

De invloed van deze variabelen werd onderzocht (VI-3). Uit deze proeven bleek, dat men uniforme condensatiesnelheid slechts kreeg binnen een beperkte verandering van bovengenoemde variabelen. De uitbreiding van het stoomdebiet wordt aan de bovenkant begrensd door het feit, dat men liever geen meesleuring heeft. Het koelwaterdebiet aan de onderkant, door de eis, dat de stroming in de koelwaterpijp turbulent moet zijn. De koelwater-temperatuur is aan de onderkant begrensd door de technische mogelijkheden van de warmtewisse-

7

laar en aan de bovenkant door het feit, dat het koelwater niet te dicht het kookpunt van water moet benaderen, daar anders het verpompen ernstige moeilijkheden gaat opleveren.

De volgende proeven waren er op gericht, deze grenzen af te tasten. Tenslotte werden in dit gebied enige metingen gedaan waaraan de theorie van Roozendaal werd getoetst.

III. Veranderingen aan de apparatuur.

1. Niveau-instelling.

Voor de niveau-instelling waren een overloopvaatje en een variabele weerstand geconstrueerd. Na een groot aantal proeven bleek echter, dat op deze manier bij een bepaalde niveau-instelling de hoeveelheid afgetapt condensaat van een bepaald aftappunt bij een bepaalde instelling een enorme spreiding vertoonde. De oorzaak hiervan werd gezocht in het feit, dat het onmogelijk was de afsluitertjes die voor de weerstand moesten zorgen reproduceerbaar in te stellen. Het niveau werd daarna alleen ingesteld met de stand van de overloopvaatjes. De resultaten van de metingen, die hierna werden gedaan om de reproduceerbaarheid te testen zijn verzameld in tabel (I). Verdere details over de niveau-instelling zijn te vinden onder (VI-1).

2. Koelwatercircuit.

Men kan in de opstelling eigenlijk 2 verschillende circuits onderscheiden, n.l. het zogenaamde "grote koelwatercircuit" en het "kleine koelwatercircuit". Het grote koelwatercircuit is aangesloten op de centrale koelwaterleiding van het laboratorium. Het voordeel hiervan is, dat men over zeer grote debieten kan beschikken; het nadeel, dat men de temperatuur van dit water niet in de hand heeft.

Het kleine koelwaterdebiet heeft naast een zeer behoorlijk variabel debiet (2 tot 100 l/min.) een warmtewisselaar, waarmee men het koelwater kan opwarmen met lage-druk stoom of afkoelen met het koelwater van de centrale koelwaterleiding. Daar vooral de temperatuur van het koelwater van groot belang was, werd uitsluitend met het kleine koelwatercircuit gewerkt. Om lekken uit de centrale koelwaterleiding te voorkomen, werd deze door middel van blindflensen van het kleine koelwatercircuit gescheiden. In het kleine koelwatercircuit werden verder nog enige veranderingen aangebracht. O.a. een omloop, waardoor men, indien gewenst, de warmtewisselaar kan kortsluiten. Hierop wordt nog teruggekomen in (III-4).

Daar men voor de metingen nauwkeurig het koelwaterdebiet diende te kennen,werden in het koelwatercircuit parallel twee rotameters, één voor kleine (2-34 l/m) en één voor grote (10-100 l/m) debieten, ingebouwd. De bestaande meetflensen hadden een te gering meetgebied en de aflezing was te onnauwkeurig.

(Voor veranderingen: zie tekening van de opstelling).

3. Temperatuurmeting van het koelwater.

Bij de proeven met uniforme condensatiesnelheid was het voor de berekeningen noodzakelijk de temperatuursstijging van het koelwater over de lengte van de condensor te weten. Met dit doel werden voorlopig twee thermometers ingebouwd, één aan het begin van de condensor en één aan het einde. Deze thermometers werden tegen elkaar geijkt, omdat vooral het temperatuursverschil belangrijk was. Voor een nauwkeuriger meting zal een thermozuil moeten worden ingebouwd, die zal worden beschreven onder (VI 2).

4. Regeling van de koelwatertemperatuur.

Daar het voor de proeven nodig was een goed instelbare koelwatertemperatuur te hebben, was het noodzakelijk een zodanige voorziening te treffen, dat ondanks de opwarming door de condensatie en de afkoeling door warmte-uitwisseling met de omgeving men het koelwater steeds met een gefixeerde temperatuur in de condensor zou kunnen leiden. Hiertoe werd in het circuit een intermitterende regelaar opgenomen. In de omloopleiding van de warmtewisselaar werd een pneumatische klep ingebouwd. Deze klep is aangesloten op de perslucht en wordt gestuurd door twee magneetkleppen, die via een relais zijn verbonden met een contactthermometer. De contactthermometer werd in de open bak direct na de warmtewisselaar geplaatst. Hierin werd ook een roerder aangebracht. Werkt men nu bij een lage koelwatertemperatuur van bijvoorbeeld 30°C, dan zal tengevolge van de condensatie het koelwater steeds warmer worden. Het koelwater loopt nu voor het grootste deel door de omloop en een klein gedeelte door de warmtewisselaar, waar in dit geval wordt gekoeld. Is deze koeling niet voldoende, dan zal de temperatuur in de openbak stijgen, waardoor het kwik in de thermometer zal stijgen tot er contact wordt gemaakt. Via de magneetklep zal nu perslucht de membraanklep dicht-duwen. Nu wordt al het koelwater door de warmtewisselaar gestuwd en het koelwater daalt snel in temperatuur. Het blijkt in de praktijk, dat deze regeling de koelwatertemperatuur beheerst tot op 1°C nauwkeurig.

Werkt men bij hoge koelwatertemperaturen, dan zal het warmteverlies door uitwisseling groter zijn dan de opwarming door condensatie. Nu zal de warmtewisselaar moeten worden gebruikt om op te warmen. Dit wordt gedaan met lage-druk stoom.

Het bezwaar van deze regeling is, dat als de klep sluit de weerstand in het koelwatercircuit verandert. Als gevolg hiervan krijgt men bij grote stroomsnelheden van (50 - 100 l/m)variaties in het debiet. Bij de stroomsnelheden waarbij de uiteindelijke proeven werden gedaan (2 - 25 l/min) was de weerstand van de andere afsluiters al zó groot, dat een verandering in de weerstand tengevolge van het sluiten van de pneumatische klep geen invloed op het debiet had.

5. Koolzuur-toevoer.

De debieten van de rotameter (1-3 g/s) die aanvankelijk in de CO₂-toevoerleiding was gemonteerd, waren zo groot, dat hiermee geen zinvolle metingen konden worden gedaan. Hier werden twee parallel geschakelde rotameters ingebouwd $(2 \cdot 10^{-3} - 36 \cdot 10^{-3} \text{ g/s})$ en 0,1 - 1,5 g/s); één voor zeer kleine en één voor grotere debieten. Met deze opstelling is het mogelijk CO₂-stoom mengsels in te voeren waarbij het CO₂gehalte variëert van 0,01 % tot 40 %.

IV. Het werken met de koeler-condensor.

1. Het aanzetten van de koeler-condensor.

Men brengt de kast met hete lucht op temperatuur en zorgt voor verzadigde stoom in het watervat (tijd ongeveer luur). Door gebruik te maken van de omloopleiding wordt de rotameterstand en de druk daarin ingesteld, waarna men omschakelt op de koelercondensor.

Puntsgewijs is de werkwijze: (zie figuur A)

- <u>1</u>^e De afsluiters: K_5 , K_6 , K_7 , K_8 , H D₁, A₃, M₁, M₄, S₃, S₇ staan open. De andere staan dicht.
- 2^e Bij verstuivingsdroger klep naar droogruimte dichtzetten en klep naar koeler-condensor geheel openen. Drijfriemen van de hoofdventilator verwijderen.
- 3^e Luchtventilator aanzetten.
 4^e Bij verstuivingsdroger inse
- 5^e HD₃ open zetten, HD₂ een beetje open, om te sterke condensatie in het watervat tegen tegaan. Bij stijging van
 P₂ HD₂ langzaam verder openen.
- $\frac{6^{e}}{Veer}$ Met A₁ zoveel condensaat aftappen, dat het niveau ongeveer 10 cm onder de bovenkant van het peilglas staat. Watervat op druk laten komen. Ontluchten bij P₂. K₃ en K₄ openen.
- $\frac{7^{e}}{2}$ De kast is nu op temperatuur. S₂ een weinig openen. S₁ geheel open zetten.
- $\underline{8^{e}}$ S₂ sluiten. S₄ openen. Door langzaam openen van S₅ druk P₄ instellen, eerst lucht afblazen via afsluiter onder manometer. Met S₄ en S₈ bepaald debiet instellen. Bij condenseren in tegenstroom K₁₁ en K₁₀ openen. Met K₁₀ en P₆ bepaald koelwater debiet instellen.

- 9^{e} CO2 debiet instellen. De druk in de CO2 rotameter moet minstens 100 mm hoger zijn dan die in de stoom rotameter om de CO2 vlotter te kunnen stabiliseren.
- 10^E M_3 en M_2 openen. M_1 en M_4 dicht zetten. Met de regelkraantjes de niveau's instellen.

Bij het werken met het kleine koelcircuit staan K7 en K8 dicht en K₁₃ en K₁₄ open.

Opmerking: Bij het werken met een klein stoomdebiet kan men beter eerst een groot debiet inleiden om de filmcondensatie te vergemakkelijken.

2. Het afzetten van de koeler-condensor.

De opeenvolgende handelingen zijn hier stoom, CO2, koelwater, verwarming van de lucht en lucht uitzetten.

Puntsgewijs:

16 S_1 en C_1 sluiten. Terugschakelen op 15 KW. Openen M_4 , M_1 , S_7 , kraan onder manometer P_4 . Dichtzetten: K_3 , K_4 , HD_2 , HD_3 , K_{10} , K_{11} , M_2 , M_3 , S₄, S₅. CO2-bombe dichtdraaien. CO2-verwarming afzetten.

9

2^e Verwarming afzetten. Bij de verstuivingsdroger alles af-

zetten.

Bij een temperatuur $T_1 = 30^{\circ}C$ luchtventilator afzetten.

De afsluiters staan nu alle weer zoals ze in het begin van IV.1 beschreven zijn.

3. Het verrichten van proeven met de koeler-condensor.

Na de koeler-condensor op de hierboven beschreven wijze in werking te hebben gesteld, dient men er allereerst op te letten of zich een goede film heeft gevormd. Mocht dit niet het geval zijn, dan voert men gedurende enige tijd een groter stoomdebiet (bijv. 6 g/s) door de condensor.

Als de film goed is, bekijkt men of de druppelsnelheid van ieder overloopje voldoet aan de verwachting. Dus bij gelijkstroom moet de druppelsnelheid 1 > 2 > 3 > 4 enz. zijn. Is dit niet het geval, dan zit er in het verbindingsslangetje hoogstwaarschijnlijk een luchtbel. Deze moet dan eerst

worden verwijderd door met water deze bel er uit te drukken.

Indien dit is gedaan plaatst men de rekken met maatglazen op plank (K) en doet men de slangetjes van de overloopjes met tussenpozen van bijv. 3 sec. in deze maatglazen. Als de meettijd (meestal 10 min.) voorbij is haalt men de slangetjes met hetzelfde tijdsinterval uit de maatglazen. Het voordeel van het gebruik van maatglazen boven wegen is, dat men zeer snel het volume kan aflezen. De bepaling van de condensatiesnelheid op deze manier heeft bovendien een nauwkeurigheid van ± 1 %.

Voor het bepalen van het CO_2 -gehalte in het condenswater plaatst men een Erlenmeyer onder de daarvoor speciaal aangebrachte aftap. De Erlenmeyer is afgesloten men een rubber stop die op twee plaatsen is doorboord.

Het condenswater wordt door de ene ingevoerd en in de ander wordt een natronkalk-buisje geplaatst. Op deze manier kan het condenswater, zonder dat het in contact met de buitenlucht komt, worden afgetapt. Het natronkalk immers belet het CO_2 van de buitenlucht de Erlenmeyer binnen te dringen. Als men ongeveer 60 gr condenswater heeft opgevangen in de reeds in de Erlenmeyer aanwezig overmaat NaOH kan men door terug te titreren met HCl, het CO_2 -gehalte bepalen.

4. Bepaling van de molfractie in het condensaat.

Op de hierboven beschreven wijze wordt in een 250 ml wijdmond-stopflesje, waar 15 ml 0,1 N NaOH is geburetteerd, ongeveer 60 gram condensaat opgevangen. De hoeveelheid NaOH in het stopflesje is afhankelijk van de te verwachten hoeveelheid CO_2 . In ieder geval moet er een behoorlijke overmaat NaOH zijn om te verhinderen, dat het CO_2 uit het condenswater wordt geabsorbeerd door de natronkalk, die er overigens is om te vermijden, dat CO_2 van de buitenlucht naar binnendringt.

Heeft men voldoende condenswater opgevangen, dan wordt de doorboorde rubberstop vervangen door een glazen stop. De hoeveelheid afgetapt condenswater wordt nu gewogen. De overmaat NaOH wordt met 0,1 N HCl met behulp van een thymolblauw indicator teruggetitreerd. Uit de totale hoeveelheid condensaat en de hoeveelheid CO₂ berekent men de molfractie.

V. IJkingen.

1. IJking CO₂ rotameters.

Deze zijn in opstelling geijkt met CO_2 en een natte gasmeter (temp. 25°C). Grafieken 3 en 4 (p'_m - h) en omrekeningsgrafiek 5.

2. IJking van de koelwaterrotameters.

Deze zijn in opstelling geijkt door weging van de doorgestroomde hoeveelheid. Gelijk- en tegenstroom geven de zelfde waarden. De temperatuur heeft geen invloed. Grafieken 1 en 2 $(\not \! p_m - h)$.

3. IJking van de stoom-rotameters.

Deze zijn in de opstelling door weging van het condensaat geijkt. De ijking komt binnen de foutgrens overeen met die, opgegeven door Fischer - en van Winkel N.V. Deze laatste ijking is verder aangehouden. Grafieken 6 en 7 (\emptyset - h) en omrekeningsgrafiek 8.

VI. Nog aan te brengen veranderingen.

1. Niveau-instelling en monstername.

Het niveau wordt thans ingesteld door alle overloopjes even hoog te stellen ten opzichte van de rand van de balk waaraan ze thans zijn bevestigd en deze balk dan afhankelijk van de druk hoger of lager te stellen. Men kan nu de condensatiesnelheid meten. Om echter monsters voor de CO_2 -analyse te nemen dient men onderaan af te tappen, hetgeen enige behendigheid eist, maar tevens de moeilijkheid geeft, dat men dan het niveau heel moeilijk constant kan houden. Ook het gescheiden meten van de condensatiesnelheid en het CO_2 -gehalte geeft een onnodig tijdverlies en wellicht onnauwkeurigheden.

Met de constructie zoals die in figuur 4 is weergegeven kunnen al deze moeilijkheden worden ondervangen. Men is nu zeker, dat alle niveau's even hoog zijn. Het afgetapte condens kan nu zowel gebruikt worden om de condensatiesnelheid als om het CO_2 -gehalte te bepalen. Immers het condensaat is niet in contact met de buitenlucht geweest en kan dus geen CO_2 hebben opgenomen. (het afstaan kan slechts worden voorkomen door het in loog op te vangen !).

2. Temperatuurmeting van koelwatercircuit.

Mocht men in de toekomst er behoefte aan gevoelen de temperatuurval in de condensorpijp nauwkeuriger te meten, dan kan men een thermozuil inbouwen. Om echter tot een verantwoorde temperatuurmeting te komen is het noodzakelijk gebruik te maken van een mengblok waarin vele thermokoppels zijn ingebouwd. Ook dient men de thermokoppels van de twee mengblokken direct met elkaar te verbinden om te vermijden, dat men lassen op constante temperatuur moet houden.

3. <u>Het stoomcircuit</u>.

Daar de stoom die door de verzadiger is gegaan, nog een aanmerkelijke drukverlaging ondergaat tengevolge van de stromingsweerstand van leidingen en afsluiters raakt hij oververhit. Derhalve verdient het aanbeveling om vlak voor de ingang van de koeler-condensor nog een verzadiger in te bouwen, tenzij men genoegen neemt met het feit, dat de stoom in een relatief kort deel van de condensor weer wordt verzadigd door afkoeling. De waarnemingen gedaan bij de eerste meetpunten zijn dan echter niet meer **p**orvikbaar voor berekeningen.

VII. Metingen.

1. Metingen met gelijkstroom met CO2.

Deze metingen werden verricht, nadat de meesleuring was onderzocht en de moeilijkheden met de niveau-instelling waren overwonnen. Ze werden dus eigenlijk alleen gedaan om de reproduceerbaarheid en de stroming te onderzoeken. De strooiing die door <u>Schuringa</u> was gevonden is hoogstwaarschijnlijk te wijten aan het feit, dat er zich van tijd tot tijd bellen in de rubber verbindingsslangetjes tussen het vulstuk en de overloop vormden. Deze veroorzaken een extra stromingsweerstand, waardoor minder condens kan worden afgetapt. Het condenswater loopt dan over naar daarnaast gelegen vulstukken, die dan weer te veel condenswater geven. Dit euvel kan eenvoudig worden verholpen door bij aanvang van de meting de rubberslangetjes vol met water te drukken, waardoor eventueel zich daarin bevindende bellen worden verdreven.

De condensatiesnelheid werd gemeten aan de eerste 15 vulstukken. Het stoomdebiet was 3,16 g/s; het CO_2 -debiet 0,20 g/s. De condensatiesnelheden van de punten 8 tot en met 12 werden m.b.v. een Metlerbalans gemeten, terwijl tevens een CO_2 analyse van deze punten werd gedaan. De resultaten zijn weergegeven in tabel I.

Het blijkt dus, dat de hoeveelheden condenswater reproduccerbaar zijn binnen een nauwkeurigheid van ongeveer 2 %, daarentegen is de reproduceerbaarheid van de CO₂-analyse 10 %.

2. Metingen met gelijkstroom zonder CO2.

Deze metingen werden gedaan om te controleren of de condensatiesnelheid kwalitatief aan de verwachtingen beantwoordde. De resultaten zijn in tabel II en de grafieken 9 en 10 weergegeven.

Het blijkt dus, dat inderdaad bijv. bij minder stoom minder condenseert en bij een hoger koelwaterdebiet ook inderdaad meer condenseert. In het bijzonder zeer duidelijk is de scherpe daling als al de stoom is gecondenseerd.

3. Metingen met tegenstroom.

Deze metingen werden verricht om een inzicht te krijgen in de invloed van de variabelen op het condensatieverloop. Derhalve werden de volgende series metingen gedaan.

A. variatie koelwater debiet.

- B. variatie stoomdebiet.
- C. variatie CO2-debiet.

D. variatie koelwatertemperatuur.

Ten overvloede werden nog enkele metingen gedaan om de reproduceerbaarheid bij deze proeven te testen. Deze proeven werden op verschillende dagen gedaan, zodat dus telkens alles opnieuw moest worden ingesteld. Ook uit deze resultaten blijkt de grote reproduceerbaarheid van de waarden van de condensatiesnelheid-

E. proeven ter contrôle van de reproduceerbaarheid.

II ,

De resultaten zijn te vinden in de tabel

en in de grafieken 11, 12, 13, 14.

4. Metingen met uniforme condensatiesnelheid.

Het gebied waarin uniforme condensatiesnelheid kan worden gemeten kan men schetsmatig in een grafiek aangeven ($\emptyset_{m \ stoom}$ - temp.). zie tekening.

Er zijn voor de berekeningen een zevental metingen gedaan, zes in de buurt van de uiterste grenzen en één er midden in.

De waarnemingen zijn terug te vinden in de tabellen III

VIII. Berekeningen.

1. Berekening van de warmtebalansen.

Men kan een warmtebalans opstellen voor de afvoer van de condensatiewarmte van het CO₂-stoommengsel, n.l.:

s.w.water · ΔT · $\phi_{m_{koelwater}} = Q$ · $\phi_{m_{condensaat}}$

 ΔT = verschil tussen begin- en eindtemperatuur van het koelwater in de condensorbuis.

Q = het te berekenen enthalpieverschil.

Q ₁	щ	$\frac{24.44}{36.53.5}$	H	0,548	o .	10 ³	cal/gr.	+	4	%
Q2	æ		40-005	0,599	8	10 ³	cal/gr.	*	4	1%
Q3	Ħ		ingen Birip	0,563	0	10 ³	cal/gr.	+	30	%
Q_4	13			0,571	9	10 ³	cal/gr.	+	10	%
Q5	dave b			0,499	٥	10 ³	cal/gr.	+	4	%
Q ₆	40-03 6-43		=	0,546	6	10 ³	cal/gr.	+	12	%
$^{ m Q}_7$	ł		त्राध्य भोदान	0,511	ø	10 ³	cal/gr.	+	7	%

De waarde van Q moet ongeveer 535 cal/gr zijn, waaruit men dus mag concluderen, dat de warmtebalans klopt binnen 10 %.

en IV.

2. Berekening van de stofoverdrachtscoëfficiënt uit de metingen.

Bij de berekening van de stofoverdrachtscoëfficiënt voor het fasengrensvlak werd gebruik gemaakt van de filmtheorie (<u>Roozendaal</u>) (4). De formule die men voor ons geval kan afleiden luidt:

$$k = \phi_{m}'' \cdot \frac{RT}{p} \cdot \left[\ln \frac{c_{w}}{c_{m}} \right]^{-1}$$

Hierin is p_m'' de condensatiesnelheid per oppervlakteeenheid. Deze wordt berekend door de gemiddelde condensatiesnelheid te delen door het condenserend oppervlak van een segment (π rl). Daar de druk overal in de buis 1 atmosfeer is, is de factor $\frac{R}{p}$ een constante.

Voor T neemt men de gemiddelde temperatuur tussen die van de bul \mathbf{k} van het gas en die van het fasengrensvlak.

De concentratie van het CO_2 aan de wand van het condenserend oppervlak c_w bepaalt men met behulp van een T-x diagram uit de concentratie van het CO_2 in het condenswater. Hiervoor werd de T-x figuur (D₁ en D₂) gebruikt, die door <u>van der Mey</u> werd samengesteld. Deze figuur geldt bij een druk van 760 mm Hg. Bij de gedane proeven kan de druk echter enigszins afwijken en wel \pm 20 mm H₂O. Daar echter voor een variatie van 1°C in de verzadigingstemperatuur een drukverandering van 200 mm H₂O nodig is kan men zonder een grote fout te maken voor het vaststellen van de evenwichtstemperatuur en de samenstelling van het gas-dampmengsel deze figuur gebruiken.

De concentratie van het CO_2 in de bulk van het gas (c_m) berekent men door de plaatselijke hoeveelheid CO_2 te delen door de plaatselijke stoom-stroom. De ingangswaarden, die men kan herleiden uit de rotameter-standen, vermindert met de afname tot het punt waarvoor men de k wenst te berekenen geven deze waarden.

De waarden van deze plaatselijke k's uitgezet tegen de lengte van de buis vindt men in grafieken 15, 16, 17 en 18 als getrokken lijnen. Een voorbeeld van een berekening van de plaatselijke k-waarde volgt hieronder.

Uit de CO₂ analyse volgt voor de concentratie van het
 CO₂ in het condenswater op punt 25 van proef zeven.

$$C_{25} = 8,70 \cdot 10^{-5} \text{ grol/em}^3$$

Uit de T-x figuur volgt dan, dat

$$C_w = 0,473$$
 en $T_w = 84,625$ °C.

2.

$$2,16 - 1,22 = 0,94$$
^g/₈

De CO_2 -stroom ter plaatse is 36.10⁻³ g/s. Hieruit volgt voor de CO_2 concentratie in de bulk van het gas $C_m = 15,7 \cdot 10^{-3} (\text{grol}/\text{grol})$.

3.
$$\left[\ln \frac{c_{\rm w}}{c_{\rm m}}\right]^{-1} = \left[\ln \frac{0,473}{15,7\cdot10^{-3}}\right]^{-1} = 0,294$$

4.
$$\frac{RT}{p}$$
 voor T berekent men $T_{gen} = \frac{1}{2} (84,6 + 100,0) = 92,3 °C$

$$\frac{\text{RT}}{\text{p}} = 3,028 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{grol}.$$

5.
$$p'_{m} = 2, 8.10^{-3} \text{ grol/s m}^{2}$$

 $p''_{m} = \frac{p'_{m}}{T \text{ rl}} = 0.91 \text{ grol/s m}^{2}$
 $k = p''_{m} \cdot \frac{RT}{p} \cdot \left[\ln \frac{c_{w}}{c_{m}}\right]^{-1} = 8,24 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec.}$

3. <u>Berekening van de stofoverdrachtscoëfficiënt volgens</u> uit de literatuur bekende semi-empirische correlaties.

Om een goed beeld te krijgen van zuivere warmte-overdrachtsmetingen die gedurende de laatste jaren door vele onderzoekers zijn gedaan werd een literatuuronderzoek gedaan.

Verondersteld werd volledige analogie tussen warmte- en zuurstofoverdracht als $Pr \approx Sc \approx 1$, zoals bij de gedane metingen het geval was. Hierdoor kon men gebruik maken van de warmte-overdrachtsmetingen, die o.a. ook waren gedaan in ringvormige buizen . Het bleek namelijk, dat de formule van Nusselt:

$$Nu = C \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3}$$

de warmte-overdrachtverschijnselen in een ringvormige buis niet juist omschreef. Diverse correcties werden achtereenvolgens ingevoerd. Allereerst voerde <u>Sieder</u> en <u>Tate</u> (25) een correctiefactor in voor het verschil in viscositeit van het stromende fluïdum in de bulk (γ) en die aan de warmteoverdragende wand ($\gamma_{\rm W}$). Dit werd een factor ($\frac{\gamma}{\gamma_{\rm W}}$)^{0.14}. Vervolgens werd een correctiefactor ingevoerd voor de slankheid van de buis. Deze diende volgens sommige onderzoekers $\left(1 + \left(\frac{d^2}{L}\right)^{2/3}\right)$, volgens anderen ($\frac{d}{L}$)^{0,054} te zijn (25)(33).

Ook bleek, dat de exponent van het getal van Prandtl voor dit soort onderzoekingen aan de lage kant was. De aanbevolen exponent variëert van 0,41 - 0,45. Het grootste verschil in inzicht bestond ten aanzien van de factor die voor de verhouding van de diameters van binnen- en buitenbuis moest corrigeren. Er waren er, die de voorkeur geven aan de term $\left(\frac{du}{d_1}\right)^n$, waarbij u dan variëerde tussen 0,42 en 0,55. di. $\frac{2}{3}$

Sarma (13) daarentegen nam voor deze factor $(1-\frac{d_i}{d_i})^{2/3}$.

Barrow (15) nam van <u>Monrad en Pelton</u> een veel ingewikkelder vorm over, n.l.:

 $\frac{2 \propto (\ln \propto) (1 - \alpha)}{\alpha^2 - 1 - 2 \alpha^2 \ln \alpha}$ $\propto = \frac{d_i}{d_i}$

waarin:

Voor de eerste en laatste vorm geldt, dat bij een binnenbuis met een oneindig kleine diameter de warmte-overdracht oneindig groot zou worden, hetgeen moeilijk is in te zien. De tweede factor heeft het bezwaar, dat bij een oneindig nauwe spleet de warmte-overdracht nul zou worden; ook dit is weinig aanvaardbaar, maar in ons geval niet bezwaarlijk, omdat onze spleet relatief wijd is en het ons te doen is om een correctie op een formule voor een volle pijpdoorsnede (dus binnenbuis met oneindig kleine diameter). De exponent van het Reynolds getal bleek bij de verschillende onderzoekers te variëren van 0,8-0,65.

Rieronder volgt een overzicht van de correlaties zoals die door <u>Quirrenbach</u> (11) zijn verzameld.

Tabel zie pag. 21.

Bekijkt men de bovengenoemde correlatiefactoren voor ringvormige kanalen, dan valt het op, dat er geen correctiefactor is voor het feit of via de binnen- en/of buitenwand warmte wordt toe- of afgevoerd. Het blijkt, dat deze verschillende mogelijkheden alleen invloed hebben op C en op de exponent m van het getal van Reynolds. <u>Sarma (12)</u> die een uitgebreid onderzoek naar de verschillen deed, vond het volgende:

laminaire stroming

turbulente stroming

	verhitting buitenbuis	verhitting binnenbuis	verhitting beide buizen	verhitting buitenbuis	verhitting binnenbuis	verhitting beide buizen
C	20.0	18,7	19,7	0,168	0,185	0,155
m	0,41	0,48	0,4	0,69	0,71	0,645

Andere onderzoekers vermelden wel of zij de binnen- of buitenbuis voor warmtewisseling hebben gebruikt, maar gaan er niet op in of dit al of niet van invloed is op de door hen afgeleide correlatie.

Na nog andere literatuurgegevens te hebben bestudeerd werd besloten om de metingen te vergelijken met een samenstelling van de correlaties van <u>Sarma</u> (12) en <u>Hausen</u> (6), n.l.:

 $\begin{bmatrix} \text{Sh} \end{bmatrix} = 0,037 \ (\text{Re}^{0,75} - 180) \begin{bmatrix} 1 + (\frac{d}{L})^{2/3} \end{bmatrix} (1 - \frac{d_i}{d_u})^{2/3}.$ $\begin{bmatrix} (\text{Sc})^{0,42} \end{bmatrix}$ De factor $\frac{?}{?_W}$ werd verwaarloosd.

Een voorbeeld van de berekening van de k-waarde uit deze correlatie volgt hieronder.

Wederom wordt de berekening uitgevoerd voor punt 25 van proef zeven.

		والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع المراجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع	19 10 19	
Nu	dgl	$\epsilon \equiv d_a/D_i$	Re	Autor
0.04 Re ^{0.8} Fr ^{0.4} /E	$d_{h} \frac{1+\epsilon}{\epsilon}$	0.545-0.596	3000- 60000	Foust- Christian
$0.064 \text{ Re}^{0.5} \epsilon^{0.2}$	da	0.00015- 0.0013	7-120	Mueller
0.020 Re ^{0.8} Pr ^{1/3} e ^{0.53}	dh	0.059; 0.41	12000 - 220000	Monrad- Pelton
0.032 Re ^{0.8} Pr ^{1/3} Z ^{0.14} / $\epsilon^{0.15}$	`đ _a	0.00015-0.85	7-180000	Davis
0.0305 Re ^{0.8} Pr ^{1/3}	da	0.508; 0.652; 0.77	Re > 20000	McMillen- Larson
0.023 Re ^{0.8} Pr ^{1/3} / $\varepsilon^{0.45}$	d _h	0.1-1.0	Re> 5000	Wiegand
0.023 Re ^{0.8} Pr ⁿ /E ^{0.45}	ďh	0.1-1.0		Wiegand
$0.023 \text{ Re}^{0.8} \text{Fr}^{1/3} 20.14$	^d h	0.75	2000– 16000	Carpenter u.a.
0,020 Re ^{0.8} Pr ^{0.4}	^d h	0.278	8000- 80000	Govier
$0.026 \text{ Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3} \text{Z}^{0.14}$	^d h	0.325; 0.342 0.605		McAdams u.a.
$\begin{array}{c} 0.0214 \ \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3} \\ (1 + \frac{2.3 \ \text{dgl}}{\text{L}}) \end{array}$	đh	0.66	7000- 40000	McAdams u.a.
$0.032 \text{ Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3} \text{Z}^{0.14}$	đ _h	0.278	8000- 80000	Knudsen- Katz
$0.027 \text{ Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3} 2^{0.14}$	$d_{h} \frac{1+\varepsilon}{\varepsilon}$			Kern
$0.023 \text{ Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3} 0.14$	d _h	0.457		Mizushina
0.032 $\operatorname{Re}^{0.8}_{\mathrm{Pr}^{n}}$ (L/dg1)-0.054	$a_{h} \frac{1+\varepsilon}{\varepsilon}$	0.79	2300- 30000	Kirschbaum
0.021 Re ^{0.8} Pr ^{1/3} $z^{0.14}/\varepsilon^{0.45}$	d _h			Walger
$0.0275 \text{ Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3}$.	d _h	0.722;0.745	5000 - 22000	Miller u.a.
0.020 Re ^{0.8} Pr ^{1/3} / 0.5				Stein- Begell
0.0138 $\operatorname{Re}^{0.72}\operatorname{Pr}^{0.4}(3/3^{1/4})$	d _h	0.25-0.9	10000- 100000	Barrow
$0.0194 \text{ Re}^{0.8}$	d _h	0.55	Re < 160000	Bory- Cordier
0.23 Re ^{0.65} Pr ^{1/3} Z ^{0.14} $(1-\epsilon)^{\overline{3}}$	d _h	0.5-0.975	Re < 120000	Sarma-Beck

Vergelijkingen voor de warmte-overdracht in een ringvormige spleet.

Onderschrift bij pag. 21 (Tabel):

Als konmerkende lengte wordt de diameter d_{gl} in de Nu- en Re-getallen gebruikt.

Verder geldt, dat : $Z = \frac{n}{n_w}$

 $Re = \frac{p V d}{2} = 2190 \qquad Re^{0.75} = 320$ $Sc = \frac{y}{1D} = 1,104 \qquad Sc^{0.42} = 0,994$ $1 + (\frac{d}{L})^{2/3} = 1,007$ $(1 - \frac{d_i}{d_u})^{2/3} = 0,56$

 $k = 0,037 (320 - 180) \cdot 1,007 \cdot 0,994 \cdot \frac{D}{d} = 3,98 \cdot 10^{-3} m/s$

Opmerking:

 $f \vee$ werd berekend uit de massastroom en η werd berekend uit waarden van CO₂ en stoom met behulp van de gewichtsverhoudingen van beide bij de temperatuur van het fasengrensvlak.

De k-waarden werden op grond van de semi-empirische formule en uit de metingen voor iedere proef voor 5 verschillende punten berekend. De resultaten hiervan zijn in de tabellen III en IV en in de grafieken 15, 16, 17; 18 als gebroken lijn weergegeven.

Daar er grote verschillen waren tussen de theoretische en practische waarden, werd de veronderstelling geuit, dat de CO₂ metingen wellicht volledig verkeerd waren geweest.

Om dit te controleren werd de temperatuur aan het fasengrensvlak berekend uit de warmtestroom vergeleken met de waarde uit de CO₂-analyse van het condenswater en de T-x figuur verkregen.

4. Berekening van de temperatuur aan het fasengrensvlak. Voor de warmtestroom geldt:

 $\emptyset_{W} = U \cdot A \cdot \Delta T$

Voor proef 7 geldt, dat er per segment-oppervlak 30,2 gr stoom per tien minuten condenseert, dus geldt:

Het oppervlak A van een segment is groot:

$$A = \pi r l = 3,14 \cdot 14 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 3.1 \cdot 10^{-3}$$

Voor U geldt, dat:

R 1 6000

$$(\mathbf{U})^{-1} = (\boldsymbol{\propto}_{\text{koelw}})^{-1} + (\frac{\lambda}{d} \text{ pijp})^{-1} + (\frac{\lambda}{d} \text{ film})^{-1}$$

De « van het koelwater berekent men volgens Nusselt:

$$Re = \frac{P \nu d}{R} = 5,62 \cdot 10^{+3} Pr = \frac{\nu}{a} = 0,97$$

$$\frac{\alpha_{\text{koelw.}}}{\lambda} = 0,027 (\text{Re})^{0,80} \cdot (\text{Pr})^{1/3}$$

$$\therefore \propto_{\text{koelw.}} = 2,07 \cdot 10^3 \, J/_{\text{m}^2} \circ_{\text{C}} \, \text{s} \, \text{Kliptui}$$

Voor de dikte van de film geldt: (5)

$$\frac{1}{S_{\text{film}}} = 0,954 \sqrt{\frac{9}{3 \gamma} \rho_{\text{v}}^{"} R}$$

hieruit berekent men:

$$(u^{-1}) = (\alpha_{\text{koelw.}})^{-1} + (\frac{\lambda}{d}_{\text{pijp}})^{-1} + (\frac{\lambda}{5}_{\text{film}})^{-1} = (2,07.10^{+3})^{-1} + (\frac{0,055.4,2.10^{4}}{1,5.10^{-3}})^{-1} + (8,02.10^{+3}.0,378)^{-1} + (1,5.10^{-3})^{-$$

$$U = \frac{1848}{10} J_m^2 \circ_{CB}$$

m².

dus: $\Delta T = \frac{\phi_W}{U \cdot \Lambda} = \frac{108.0}{1848 \cdot 3.1 \cdot 10^{-3}} = 18.8^{\circ}C.$

De uit de CO2-metingen berekende verschillen zijn:

punt $10 = 91,6 - 73.0 = 18,6^{\circ}C.$ $15 = 88,6 - 71,0 = 17,6^{\circ}C.$ $20 = 87,0 - 69,0 = 18,0^{\circ}C.$ $25 = 84,6 - 67,0 = 17,6^{\circ}C.$ $30 = 82,5 - 65,0 = 17,5^{\circ}C.$

Het blijkt dus, dat de grootste afwijking is : $1,3^{\circ}$ C van $18,8^{\circ}$ C, dit is minder dan 7 %, zodat dus kan worden aangenomen, dat de resultaten van de CO₂ analyse zeer goed bruikbaar zijn voor het bepalen van de samenstelling en de temperatuur van het fasengrensvlak.

Conclusies.

Uit de gedane berekeningen (vooral 1 en 4) blijkt, dat men mag veronderstellen, dat de metingen betrouwbaar zijn. Dat men niettemin grote verschillen vindt tussen de praktische- en theoretische waarden doet vermoeden, dat men zich in één van beide berekeningen door een verkeerde voorstelling van zaken heeft laten leiden, of men zou moeten stellen, dat bovengenoemde correlaties niet toepasbaar zijn voor deze specifieke metingen. Om dit bevestigd te zien verdient het aanbeveling nog een serie metingen te doen, maar dan onder zodanige omstandigheden, dat men op alle meetpunten evenveel CO₂ in het condenswater vindt.

Opmerkingen.

Tijdens de metingen viel het op, dat er in de buis oscillerende verschijnselen optraden, hetgeen zich onder andere manifesteerde door een op en neergaande beweging van het waterniveau in de overloopvaatjes en door de hoeveelheden condensaat die in een grafiek (19) uitgezet, een soort transversale golf weergaven (zie tevens tabel II.). Door andere onderzoekers werd het verschijnsel gevonden, dat er op een plaats in de buis druppelcondensatie optrad, terwijl verderop zich filmcondensatie manifesteerde. Men zou kunnen aannemen, dat daar waar filmcondensatie optrad, zich een bulk van een staande trilling bevond en daar waar druppelcondensatie optrad een knoop aanwezig was. Helaas was het niet mogelijk dit verschijnsel nader te onderzoeken.

Literatuurlijst.

- A. Literatuur die betrekking heeft op de ontwikkeling van het onderzoek.
- 1) P.L.Blanken en B.van Nederveen, Afstudeerverslag 1958.
- 2) A.van der Mey, Afstudeerverslag october 1959.
- 3) G.Schuringa, Afstudeerverslag juni 1960.
- 4) K.Roozendaal, Invloed van oncondenseerbaar gas bij condensatie van een damp. (october 1956).
- 5) Th.W.Willemse, Voorstel voor een experimentele condensor.
- <u>B.</u> Literatuur, die direct betrekking heeft op hoofdstuk VIII 3.
- 6) H.Hausen, Neue Gleichungen für die Wärmeübertragung bei freier und erzwingener Strömung. Allg.Wärmetechniek, 75/79, <u>9</u> (1959).
- 7) H.Hausen, Zur Frage nach dem Gleichwetigen Durchmesser bei Wärmeübergang bei Flussigkeiten in Rohren und Ringspalten. Abh.Braunschweig wiss.Ges. p. 150/165, <u>10</u> (1958).
- 8) K.Stephan, Gleichungen für den Wärmeübergang laminär strömender Stoffen in Ringformiger Spalten.
 Chem.Ing.Techn. 338, 5, 1961.
- 9) O.Krischer, Wärmeaustausch in Ringspalten laminärer und turbulenter Strömung. Chem.Techn.Ing., p. 13, <u>1</u>, 1961.
- 10) O.Krischer, Wärme- und Stoffaustausch bei überströmten oder durchströmten Körpern verschiedener geometrischen Form. Chem.Ing.Techn. p. 155, <u>3</u>, 1961.
- 11) F.J.Quirrenbach, Wärmeübergang bei turbulenter Strömung in Ringspalten. Allg.Wärmetechnick, 271/76, 2 (1960).

- 12) K.R.K.Sarma, Wärmeübergang und Druckverlust in konzentrischen Ringspalten. Diss. Karlsruhe (1959).
- 13) R.Gregorig, Warmeaustauscher, p. 44, <u>4</u> (1959).
- 14) H.Barrow, Fluid Flow and heat Transfer in Annulus with a Heated Core Tube. Proc.inst.mech.eng. 69, (1955).
- C. Literatuur, die betrekking heeft op de warmte-overdracht in ring- en cirkelvormige kanalen.
- 15) F.Beck, Wärmeübergang und Druckverlust in konzentrischen und excentrischen Ringspalten. Diss. Karlsruhe.
- 16) B.Métais, Wärmeübergang im Gebiet zwischen laninär und turbulenter Strömung. Chem.Ing.Techn. 535-39, <u>32</u> (1960).
- 17) Ph.Miller, J.J.Byrness, Heat transfer to water in an annulus. J.Amer.Inst.Engrs. p. 501, <u>1</u> (1955).
- 18) Monrad and Pelton, Heat transfer by convection in Anular Spaces. A.I.Ch.& Trans. 593, <u>38</u> (1942).
- 19) J.H.Wiegand, Discussion of Annular Heat Transfer Coefficient for turbulent flow. A.I.Ch.& Trans. 147, 41 (1945).
- 20) L.N.Tao, Heat transfer of combined free and forced convection in circular and sector tubes. Appl.Sci.Res. 357-368, A 9, 1960.
- 21) B.Koch, Wärmeübergang im Ringrohr. Forschg.Geb.Ing.wes. p. 223, <u>13</u> (1942).
- 22) B.Koch, Wärmeaustausch und gleichwertiger Durchmesser. Z.Techn.Phys. p. 277/280, 23 (1942).
- 23) R.Koch und Feind, Druckverlust und Wärmeübergang in Ringspalten. Chem.Ing.Techn. p. 577/584, <u>30</u>, (1958).
- 24) Mc.Adams, Heat Transmission, New York (1954).
- 25) Sieder und Tate, Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. Indstr.Engn.Chem. p.1429/35, <u>28</u> (1936).
- 26) A.S.Foust, Non-boaling heat transfer-coefficients in annuli. Trans.Amer.Inst.Chem.Engrs,, p. 541/ 554 (1940).

26

ί.

- 27) H.Miesner und Grigull, Fortschritte der Verfahrenstechniek, 135 (1956/57).
- 28) H.Glaser, Neuere Ergebnisse wärmetechnischer Grundlagenforschung. Chem.Ing.Techn. p. 176/186, 29, (1957).
- 29) Knudsen-Katz, Fluid dynamics and heat transfer, p. 212, (1954).
- 30) J.J.Clarke and R.Gardon, Thermal conductivity of condensed films. J.Chem.Phys., 705-707, <u>32</u> (1960).
- 31) D.G.Kern, Process Heat Transfer, New York, p. 105, (1950).
- 32) E.Kirschbaum, Neues zum Wärmeübergang mit und ohne Anderung des Aggregatzustandes. Chem.Ing.Techn.
 p. 393/400, 24 (1952).

Tabel I.

Stand stoom-rotameter : 24,0

Stand CO_2 - rotameter : 1,0

Oude opstelling temp.20-25°C

	Vul- stuk	Con- den- saat in gr/ 10 m	% CO ₂	Cond. C Ib	% 00 ₂	Cond. C IIa	% co ₂	Cond. C IIb	% CO ₂	Cond. CIIc	% CO ₂ :
ľ	1	136		136	ge oak mytersyn geroge oak o ykers	137		136		134	
	2	161		160		164		162		159	
	3	163		160		161		159		149	
	4	143		143		142		140		157	1
	5	148		145		147		144		135	
	6.	134		132		134		132		127	
	7	122		120		123		119		126	
	8	110	0,00342	105,5	0,00343	109,5	0,00347	108,5	0,00294	108	0,00318
	9	100	387	100	387	101	374	99,5	304	98	353
	10	90,5	370	87,5	317	90	373	89,5	306	87	384
	11	79,5	420	77	453	78,5	431	76,0	379	78	433
	12	81	452	76	337	76		75,5	352	72,5	459
	13	63		61		66		66	-	62	
	14	55		56		57		56		62	
	15	51		50	en en anticipa de commencia en estatemente en entre anticipa en aconsecutor	54		53	- S-un traue la companya a constanta da constanta	51	
	Vul- stuk	Cond. C IId	% CO ₂	Cond. C IIe	% CO ₂	Cond. C IIIa	% CO ₂	Cond. C IIIb	% C0 ₂	Cond. CIII c	% CO ₂
	1	134		136		137		137		128	
	2	161		162		164		163		143	
	3	155		156		158		159		140	
	4	139		139		144		142		155	
	5	144		146	· · · ·	147		148		133	
	6	131		132		133		133		119	
	7	122		122		122		121		126	
	8	108	0,00335	108	0,00351	108,5	0,00329	108,5	0,00335	107	0,00252
	9	100	352	100	391	101,5	363	100,5	353	95,5	280
	10	90	378	89,5	393	90,5	293	89,5	367	91 -	290
	11	79	455	7 8	462	78,5	437	77,5	397	76	332
	12	77	448	76,5	435	76,5	420	75,5	410	72	321
	13	68		69		66		63		63	
	14	59	Í	58		58		59		64	and a Constantial
	15	55		56		52		53		53	

(zi	e VII 3	Е)					
ૡ૱ૡૡૢૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡૡ			D A	. T U 1	M	7000027-5-520530555	n ni falsan ni ngan sangan na kasaran sa
		24-4	-1961	25-4	-1961	27-4	-1961
anden første at folge utforder utgoringestade ender følg myr som i det at ander og en det attalen det softwade de udgateliger de ud		C.5.	C.S.	Ċ.S.	C.S.	C.S.	C.S.
Stand stoom-rotameter	24	45	48	45	49	45	48
Stand CO ₂ -rotameter	12 kl	43	44	44	45	43	4.4
Stand koelwater-rotameter	10,0	38	43	39	43	38	42
Temp.koelwater 1 in ^o C	29	44	45	44	46	43	45
Druk stoom 1 in atm.	1,15	45	48	45	49	44	48
Temp.luchtslot 1 in ^O C	121	46	42	46	43	45	43
Temp.luchtslot 2 in ^O C	112	42	45	42	46	40	44
Temp.luchtslot 3 in ^o C	103	42	43	42	44	42	44
Temp.luchtslot 4 in ^O C		47	45	48	46	46	45
Temp.stoom in ^O C	109	42	42	42	43	41	43
Temp.mengsel in ^O C	112,5	46	43	47	44	46	43

Tabel II.

Ter illustratie van de reproduceerbaarheid der metingen.

c.s. = condensatie-snelheid.

1

Tabel III.

Waarnemingen, behorende bij VII-4.

	1	2	3	4	5	6	7
Stand stoomrotameter	24,0	24,0	24,0	24,0	21,0	10,0	16,75
Stand CO ₂ rotameter	4 kl	1 gr	1 kl	0,9gr	1 kl	1,9 kl	12 kl
Stand koelwater rotameter	14,0	10,5	77,5	22,0	8,0	9,0	11,75
Temp.koelwater ¹ in ^o C	30,0	30,0	87,0	73,5	30,0	81	63
Temp.koelwater ² in ^o C	54,0	56,0	90,0	82,5	65,0	89	78
Druk stoom 1 in atm.	1.12	1,10	1,12	1,10	1,12	1,12	1,12
Druk stoom 2 in mmHg	78	70	78	70	78	78	78
Druk CO2 in mm Hg	89	90 ·	90	90	88	90	90
Temp.luchtslot $1 - {}^{O}C$	128	112	108	122	129	128	111
Temp.luchtslot $2 - {}^{\circ}C$	114	103	100	109	115	115	104
Temp.luchtslot 3 - °C	103	95	90	101	104	104	98
Temp.stoon in ^O C	110	105	105	108	111	110	105
Temp.mengsel in ^O C	114	109	109	112	115	115	109
gemiddelde condensa-							
gram/10 min.	53,5	39 , 8	35,7	30,2	36,3	11,8	30,2
cockring	ma of us	⊷ + +	.++ →	* + *	ಹಳ ಆದು ಇವು		ଚ

	1	9 928 - 093 8 - 936 - 778	. 2	999-999 Barts, 449-9995	1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 -	3	4	ana matina ana sa matina da sina
	10	25	10	25	10	25	10	25
C _W	0,045-0,	152	0,58-	0,75	0,020	-0,038	0,416-	0,515
$ c_{\rm m} \cdot 10^{-2}$	0,89-2,	28	32,8-	50,4	0,049	-0,073	40,8-	20,2
v ^m / ₆	6,66 - 2,	77	9,87-	7,67	7,23 -	-4,86	9,15-	6,63
Re	5320-207	0	5820-	3640	5780 -	- 3880	6210-	4190
Sc	0,888-0,	950	1,250-	1,530	0,888	-0,888	1,081-	1,159
$k_{experimenteel} \cdot \frac{10^{-2} \text{ m}}{\text{s}}$	12,36-11	,50	12,30-	12,86	5,41	-5 , 32	11,68-	8,31
$k_{\text{theoretisch}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$	12,52-3,	66	15,92-	9,55	13,96	-8,95	15,35-	10,39
T _{grensvlak} o _C	98,5 - 95	5,6	89,5-1	84,0	99,4 -	-98,9	94,0-	91,5
	5		6			7		
	10	25	10	25	10	25		
C _W	0,094-0,	112	0,024-	0,035	0,293	-0,493	de num	mers
$c_{\rm m}$. 10^{-3}	0,057-0,	100	36,6 -	49,4	8,7 -	- 15,7	10 en	25 ge-
v m/s	6,40-3,	63	3,22 -	2,39	5,45 -	- 3,37	ven aa	n, dat
Re	4950 - 28	800	2570 -	1910	3950 -	- 2190	de gen	oomde
Sc	0,918-0,	918	0,888-	3,888	1,021	-1,104	waarde	n gel-
$k_{experimenteel} \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$	4,44-4,	57	2,55 - 2	2,51	7,85 -	-8,24	den vo	or de
10 ⁻³ m	11,99-5,	87	5,27 - 3	3,20	8,70-	- 3,98	aftapj	es met
theoretisch S			4 · · ·					
Tgrensvlak	97,3-96	,8	99,3-9	99,0	91,6-	-84,6	dié nu	mmers,

Tabel (IV) van de omstandigheden in de buis, waaronder de zeven verschillende proeven werden gedaan.

meest linkse en 37 het meest rechtse aftapje is (zie figuur A).

a







N	9			X V																						1
		0	1																							
		Ø		2		回日期																				
		1NE	0	2																						
		1 E							14									山山								
		X																		酣						
X																					• •• •					
	X																							個問		
																									A E A	
																									A C	
																									8071	
						X																			2 2	
							N	X							10.00										STA A	
									X	X																
											N	X														
													Ň	X												
															N	X										
																		N	X							
			開始						H H H																	
			S S S S												H F							X				
			202/2																				X			
			010																						X	
					重要																					
				fri:								ļi ļi	<u>i</u> ti			1 1 1 1 1 1 1		5	111 1)							













£1











-

									R																	-			 				 	- 1	
	,				-	1	TEN		477 77														<u>.</u>												
							1000		NA A		11 1 1 111																								
							1 X		4																										1/4 [773] [113]
							2 12		してい		12																								
							1 2		1 1/2		X																								
							×		R L L L L		4 211							/																	
					6				1		97	A					/								0					0		- 0/	同		二 二 2
							080		15.4																2							/			H
							76		076																0						1		記名		
									745						/										20					1					
	- 7 1 		c C											1		+																			
	- 1.		ء در				前的						1																						
		916 - 713	9 0									1																•/		•					
			1							gir Al-	1					日日日																			
			(H) 																																
										1						同時																			
									/																1										
								/																											
								/																14	田田田										
																	- 242 TUS						1												
						1																								14-1 14-1					
	<u>-</u> 				1																														
			일라 기대 일		/				時期																								0		
				/						.∕,s≓			田							1															
			1					間		3			康井							田田						協臣	開	副			南北		開	围	
			備集							14									准									開設							
		/				購買				2																									
	/												開																	は用					
/															構業													時期						周期	
														出出						0				開開											
EHU					111	<u>11</u> 1					<u>原</u> 山 2.			1(3)	<u>†1</u>]		ЧE	14	i)(E	12	HE	<u>HH</u>	<u>41(1</u>]	134	111	胆温	<u>1440</u>	时沿	1723	hiti	111	四周	打扰	<u>I(F</u> ,	10.3

1.e

8

_																										
		RUEN				F. F.										7										
		NAR	RAEN																							
		1 2	NA A																							
		7 X F X	モイ	K 17																						
	100	1 1 1	KEND	AFLE																						
			EREN	Sec.																		1				
	in new		CH 3																		17					
	7 5 3		KET!																							
	<u>ل</u>		HED				0																			
						.	<u> </u>												1							
							010												/							
																		1/								
																	14									
																/										
															-/											
															1										0	alanunun
														/					度計算							
													1			時間								11111		
																		3 m/5.								
											1							- 10 - C								
										/	1							X								and the first of the second
				-					/			1			1000 1000 1000 1000	 436 - G., - C., - C.,				<u>तः</u> होः सर						

١...-

,



			•	
6 933				
	000000	100 million (100 m	3 5 3 2	



10 Deelstrepen is 15 m.m.



O









ONTWERP OVERLOOPVAATJE

Ð







