'Po Archijexemplaan "Absorptic on Co. in het opperveak van the geroende vlouist?". Afstudenvenlag E. van Vlen, T. Jui 1957 Laboratorium voor PHYSISCHE TECHNOLOGIE der Technische Hogeschool Pr. Bernhardlaan 6 - DELFT

Anolu firsi Fip. Fichandya

080

Absorptie van CO₂ in het oppervlak van een geroerde vloeistof

E. van Veen, 7 Lab. voor Phys. Techn. -Delft

24 Juni 1957

INHOUD

Hoofdstuk I - Samenvatting	blz	1
Hoofdstuk II - Inleiding	blz	2
II-1. Factoren die de stofoverdrachtscoöfficient		
beinvloeden	blz	2
II-1.1. Inleiding	blz	2
II-1.2. Dimensionele beschouwingen	blz	3
II-1.3. Invloed van oppervlakte-vergroting	blz	Ĺ,
II-1.4. Invloed van de hydrodynamische omstandig-		
heden	blz	5
II-1.5. Invloed van de diffusiecoëfficient	blz	7
II-2. Modellen voor de hydrodynamische omstandig-		
heden en de invloed van de diffusiecoëffi-		
cient	blz	7
II-2.1. Filmtheorie	blz	7
II-2.2. Penetratie-theorie	blz	8
II-3. Bespreking van metingen uit de literatuur	blz	11
Hoofdstuk III - Experimenteel gedeelte	blz	13
III-1. Algemene bespreking	bl.z	13
III-1.1. Inleiding	blz	13
III-1.2. Meetapparatuur	blz	13
III-1.3. Meettechniek	blz	14
III-1.4. Berekening van de overdrachtscoëfficient	blz	15
III-2. Discussie metingen en resultaten	blz	16
III-2.1. Motingon aan water	blz	16
III-2.2. Metingen aan glycerol-water-mangsels	bl.z	18
III-2.3. Metingen aan Teepel-eplossingen	blz	19
Hoofdstuk IV - Verwerking der resultaten	blz	21
IV-1. Invloed van de viscositeit	blg	21
IV-2. Invloed van de vrije convectie	blz	22
IV-3. Invloed van een oppervlakte-actieve stof		
(Toepol)	blz	24
IV-4. Vorgelijking van resultaten met andere ma-		
tingen	blz	25
Hoofdstuk V - Conclusies	blz	27
Appendix I	blz	28
Appendix II	blz	30

Overzicht der gebruikte symbolenblz 35Literatuur-overzichtblz 37

Tabellen en grafieken zijn zonder pagina-nummering achter in het verslag opgenomen.

• ;

<u>Hoofdstuk I - Samenvatting</u>

Onderzocht werd de absorptiesnelheid van zuiver CO₂ in vloeistoffen in een geroerd vat van bepaalde dimensies. Nagegaan werd de invloed van het toerental van de roerder. de viscositeit van de vloeistof en de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof op de overdrachtscoëfficient.

De gemeten stofoverdrachtscoëfficienten werden zo goed mogelijk gecorrigeerd voor vrije convectie. Uit de aldus gecorrigeerde gegevens werd getracht uitsluitsel te krijgen betreffende de toepasbaarheid van de grenslaagtheorie of de penetratie-theorie op gasabsorptie in geroerde oppervlakken. De resultaten maakten het bestaan van een laminaire grenslaag aan het oppervlak aannemelijker.

De aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof bleek op de stofoverdrachtscoëfficient vrijwel geen invloed uit te oefenen.

 $\left\{ 1, 1 \right\}$

$$\left\| \bigcup_{i=1}^{N} \bigcup_{j=1}^{N} \cdots \bigcup_{i=1}^{N} \bigcup_{j=1}^{N} \bigcup_{j=1}^{N} \bigcup_{j=1}^{N} \bigcup_{i=1}^{N} \bigcup_{j=1}^{N} \bigcup_{j=1}^{N}$$

vander 22 f. genergetter setterti par i einer ind server Viktor (hypelica), prie protagetter van detter (270⁴), C_{on}te noridaties generatoriste van Konsy (190²/a⁴), C_{on}te eoridaties generatoriste van de stoerntof (270²) m i et foude obelieven einerettetertert (270°) van stoet

ja toimte carranadak son Vilaninet de menorganisid vila d'he vann to vilaeterofiase Kg no den vour de politer I. Velvener

to general follow we also be a constant of the first sector of the secto

- 3 -

Een oplossing van het probleem, door welke factoren K_{T.} beïnvloed wordt, is aan te geven door de gemeten gasabsorptiesnelheid te correleren met physische grootheden, die bij voorbaat al invloed uitoefenen op de absorptie (diffusiecoëfficient, oplosbaarheid); en met de hydrodynamische omstandigheden die dus <u>le</u> bepaald worden door physische grootheden (viscositeit en dichtheid van de vloeistof), 2e door de roersnelheid en ten 3e door de afmetingen van het vat. De grootheden die de invloed van deze hydrodynamische omstandigheden op de grootte van het oppervlak tegenwerken (versnelling van de zwaartekracht, oppervlaktespanning) kunnen er eveneens in betrokken worden. Via een dimensieanalyse kan men dan komen tot een verband tussen dimensieloze groepen, waarin eventuele factoren en exponenten gevonden kunnen worden door metingen waarbij men de verschillende grootheden achtereenvolgens varieert. Ben dergelijk verband waarin de afhankelijkheid van K_L van de omstandigheden tot uiting komt is b.v.

Sh = f (Re; Sc; Fr; We; $\frac{d}{D}$; $\frac{H}{D}$; $\frac{W}{D}$) (3)

Houdt men ook nog rekening met de vrije convectie die vooral bij lagere toerentallen nog op kan treden, dan krijgt men

Sh = f (Re; Gr; Sc; Fr; We; $\frac{d}{D}$; $\frac{H}{D}$; $\frac{W}{D}$) (4)

waarin

 $K_{\rm L} = \frac{K_{\rm L} D}{10}$

 $\operatorname{Re} = \frac{\operatorname{nd}^2}{\sqrt{2}}$

 $Gr = \frac{QD^3gaQ}{D^2}$

- ; de dimensieloze groep waarin de afhankelijke grootheid is opgenomen.
- ; waarin de invloed van de stromingstoestand naar voren komt.
- ; waarin de vrije convectie is verwerkt.

 $Fr = \frac{g}{n^2 d}$ en We = $\frac{n^2 d^3 q}{3}$; de groepen die betrekking hebben op de vergroting van het op-

pervlak tengevolge van golfvorming; respectievelijk door overwinning van de zwaartekracht en door overwinning van de oppervlaktespanning.

Sc = $\frac{\sqrt{10}}{10}$; waarin de physische eigenschappen van de vloeistof tot uiting komen,

terwijl

 $\frac{d}{D}$, $\frac{H}{D}$ en $\frac{W}{D}$ dimensieloos de invloed van de diameter van de roerder, de hoogte van de vloeistof en de breedte van de roerder weergeven.

De betekenis der gebruikte symbolen zijn achter in het verslag opgenomen.

Schrijven we dit functionele verband nu b.v. in productvorm (er zijn uiteraard vele andere mogelijkheden), dan zal men op de aangegeven manier de exponenten der diverse groeperingen kunnen vinden. Het spreekt evenwel vanzelf dat deze methode zonder meer geen oplossing biedt voor het probleem: wat gebeurt er aan het oppervlak en hoe en waarom vloeit de grootte van de overdrachtscoëfficient hieruit voort?

De diverse factoren, welke invloed uitoefenen op de stofoverdrachtscoëfficient zullen hieronder nader besproken worden.

II-1.3. Invloed oppervlakte-vergroting

Vergroting van het vloeistofoppervlak kan plaats vinden door golfvorming en bij zeer hoge toerentallen door kolkvorming. Vooral het laatste verschijnsel moet bij dit onderzoek vermeden worden, daar er grote kans bestaat, dat het gas via de kolk in de vloeistof gezogen zal worden. Het eerstgenoemde verschijnsel zal men niet kunnen ontgaan, daar anders het bereik van het toerental te laag zou worden. Golfvorming treedt op zodra de roerder voldoende kinetische energie op kan brengen om de zwaartekracht (hetgeen tot uiting komt in het getal van Froude) en/of om de oppervlaktespanning, welke zich verzet tegen vergroting van het oppervlak, te overwinnen (tot uitdrukking gebracht in het getal van Weber). In het eerste geval spreekt men van zwaartekrachtsgolven, in het tweede geval van capillaire golven. Gewoonlijk treden beiden tegelijkertijd op. Om toch tot een onderscheiding te kunnen komen, noemt men in het algemeen golven met een golflengte kleiner dan 0,4 cm capillaire, die met een grotere golflengte zwaartekrachtsgolven, (1). De vergroting van het oppervlak tengevolge van golfvorming kan zeer groot zijn. Zo kan men voor een sinus-vormige golf volgens:

$$y = a \sin 2\pi \frac{x}{\ell}$$

waarvan de amplitudo a = 2 mm en de golflengte λ = 10 mm, langs grafische weg berekenen dat er een oppervlakte-vergroting van ongeveer 30% kan optreden.

De invloed van de oppervlakte-vergroting op de overdrachtscoëfficient kan van tweeërlei aard zijn. Berekent men deze uit het product K_{L} .A, door het oppervlak van de vloeistof A gelijk te nemen aan dat bij een toerental n = 0, dan zal het gevolg hiervan zijn dat de berekende overdrachtscoëfficient groter is dan de werkelijke. Tevens is het zeer aannemelijk dat de stromingstoestand aan het oppervlak beïnvloed wordt door de golfvorming, zodat de overdrachtscoëfficient ook nog afzonderlijk afhankelijk van de oppervlaktevergroting wordt.

II-1.4. Invloed van de hydrodynamische omstandigheden.

Van de hydrodynamische omstandigheden en de plaatselijke stromingstoestanden in een geroerd vat is weinig bekend. Talloos is het aantal onderzoekingen waarin getracht werd dit probleem van verschillende zijden te benaderen. <u>Van der Vusse</u> (2) geeft hiervan een systhematisch overzicht dat hieronder, aangevuld, voor de volledigheid wordt opgenomen.

a. Oplossnelheid van vaste stof in vloeistoffen (3,4,5).
b. Snelheid van vloeistof-vloeistof-extractie in geroerde vaten (6).

c. Snelheid van warmtetransport in geroerde vaten (7,8,9).

- d. Mengtijden voor twee mengbare vloeistoffen (10,11,12,13, 2,14,15,16).
- e. Reactiesnelheden bij twee reagerende vloeistoffen (17, 18, 19).
- f. Uniformiteit van suspensies in geroerde vaten (20, 21, 22, 23).
- g. Pompcapaciteit van roerders (24,25).
 <u>Rushton en Oldshue</u> (26) voeren in dit verband ook de mogelijkheid aan, te komen tot een berekening van volumestromen in het vat uit de pompcapaciteit van de roerder, door vergelijking van deze roerder met een straalpomp. In verband hiermee kan ook vergelijking met de resultaten van <u>Hinze</u> en van <u>Van der Hegge Zijnen</u> (27) betreffende warmte- en stoftransport in de mengzone van straalpompen interessant zijn.
- h. Krachtverbruik of benodigde vermogen van spaan- en turbineroerders (2, 23, 29, 30, 31, 32, 33).
- i. Pigmentabsorptie aan suspensies (34).
- j. Corrosie van vloeistoffen op metaaloppervlakken (35,36).

Zeer verscheiden ook zijn de theorieën welke trachten een beter inzicht te verschaffen in schaal en intensiteit van de turbulentie. Een zeer goede inleiding in de stand van zaken in deze in 1936 biedt het boekje van Bakhmeteff (37), waarin de theorieën van Prandtl (38) en van Von Kármán (39) op dit gebied behandeld en vergeleken worden. Een meer modern overzicht geeft Batchelor (40). Na deze tijd kunnen als auteurs die zich met het probleem bezig gehouden hebben genoemd worden: Von Kármán (41,42), die een statistische theorie tracht op te stellen voor isotrope turbulentie en parallelle schuifbeweging; Taylor (43, 44, 45) en Dryden (46). Deze theorieën hebben evenwel alleen betrekking op het zuiver theoretische geval van isotrope turbulentie, of sluiten aan op metingen van snelheidsprofilen in buizen. Eerst recente literatuur (46) tracht betrekkingen af te leiden voor stroming langs rechte wanden. De kennis omtrent dit gebied reikt evenwel nog niet zover, dat er sprake kan zijn van toepassing op stromingsverschijnselen in geroerde vaten. Rushton (26) vermeldt in verband hiermee de eerste pogingen____ tot het meten van snelheidsfluctuaties in de nabijheid van de roerder.

II-1.5. Invloed van de diffusiecoëfficient

De invloed van de diffusiecoëfficient op de stofoverdrachtscoëfficient bij absorptieprocessen is in het algemeen bestudeerd door middel van dimensieloze correlaties. Beschouwen we vaten die geometrisch gelijkvormig zijn en laten we de invloed van de oppervlakte-vergroting buiten beschouwing, dan kunnen we, uitgaande van de algemeen geldende correlaties schrijven:

(5)

(6)

$$Sh = C \cdot Re^{m} \cdot Sc^{n}$$

waarin n varieert van 0,3 tot 0,5.

II-2. Modellen voor de hydrodynamische omstandigheden en de invloed van de diffusiecoëfficient.

De theorieën welke zich bezig houden met een symbolisatie van het gebeuren aan het oppervlak en de invloed van de diffusiecoëfficient op de overdrachtscoëfficient zijn de volgende.

II-2.1. Filmtheorie

De filmtheorie van Lewis en Whitman (47,48) geeft als model het bestaan van een laminnire gronslang aan het oppervlak van de turbulente vloeistof, waardoor slochts moleoulaire diffusie optreedt. De uit deze conceptie voortvloeiende formulering van de overdrachtscoëfficient luidt:

$$K^{T} = \frac{10}{2}$$

waarin D de diffusiecoëfficient en & de dikte van de laminaire laag voorstelt, terwijl & nog een functie van D kan zijn. In het algemeen geldt voor gevallen van stofoverdracht in het turbulente gebied: K_L ~ (D)^{0,6 à 0,7}, zodat de waarde voor n in verg. (5) 0,3 à 0,4 wordt. Het is uiteraard twijfelachtig of het aannemen van deze conceptie alléén voldoende is om het gebeuren aan het oppervlak te omschrijven, daar het bestaan van een laminaire laag aan het vrije oppervlak van een turbulente vloeistof.

- 7 -

II-2.2. Penetratie-theorie

<u>Higbie</u> en <u>Danckwerts</u> passen de penetratie-theorie toe op het oppervlak van een geroerde vloeistof, waarbij zij aannemen dat aan het oppervlak een voortdurende verversing plaats vindt, waarbij brokken vloeistof gedurende een korte tijd aan het oppervlak verblijven, daar "opgeladen" worden tot een gasconcentratie, die afhankelijk van de diffusiecoëfficient \mathfrak{O} verloopt van de verzadigingsconcentratie C_x tot een lagere concentratie, daarna in de vloeistof verdwijnen en vervangen worden door brokken die de gemiddelde gasconcentratie van de vloeistof bezitten. Volgens de penetratie-theorie kan men uitgaande van een stofbalans in ééndimensionale (x-) richting

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{7}$$

(waarin 0 de contacttijd van de vloeistof met het gaa voorstelt) met als randvoorwaarden

σ	-	°,	X	>	0	Ę	¢	8	0
C	Ħ	c_x	X	22	0	e		>	0
C	21	°,	X	taites davet	00	e	ł	>	0

voor een stilstaande vloeistof afleiden:

$$\emptyset_{\mathbf{m}}^{"} = (\mathbf{C}_{\mathbf{x}} - \mathbf{C}_{\mathbf{o}}) \sqrt{\frac{\mathbf{u}}{\mathbf{u} \cdot \mathbf{Q}}}$$
(8)

Voor de tijd dat de vloeistofbrokken aan de oppervlakte verblijven worden deze als stilstaand beschouwd.

Hun opvattingen over de verblijftijden aan het oppervlak wijken uiteen. In het algemeen kan men daarvoor verschillende ouderdomsverdelingsfuncties aannemen, zoals weergegeven in onderstaande figuur, waarin de cumulatieve verdelingsfuncties zijn weergegeven, en waarin $F(\theta)$ de fractie van het oppervlak voorstelt met een ouderdom kleiner dan of gelijk aan θ .



De fractie van het oppervlak met een ouderdom tussen O en $\Theta + d\Theta$ is dan gelijk aan F'(Θ)d Θ , zodat indien we C₀ = 0 veronderstellen in combinatie met verg. (8) geldt:

$$d\beta_{\rm m}^{"} = F'(\Theta) d\Theta \cdot C_{\rm x} \sqrt{\frac{D}{\pi \Theta}}$$

of:

 $\overline{\beta_{m}^{*}} = \left(F^{*}(\Theta) d\Theta \cdot C_{x} \sqrt{\frac{B}{T \Theta}} \right)$ (9) Higbie (49) neemt nu aan dat elk vloeistofelement gedurende

eenzelfde tijd 0 aan het oppervlak verblijft, hetgeen in bovenstaande figuur tot uitdrukking komt in curve 1, waarvoor de vergelijking geldt:

 $F(\theta) = \theta/\theta_{max}$

$$\overline{\mathcal{P}_{m}^{n}} = \int_{0}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\Theta_{max}} c_{x} \sqrt{\frac{D}{\Pi}} \cdot \frac{d\Theta}{\sqrt{\Theta}} = 2 c_{x} \sqrt{\frac{D}{\Pi \Theta_{max}}}$$
(11)

en

$$K = 2 \sqrt{\frac{10}{\pi Q_{max}}}$$
 (12)

Terwijl we voor de gemiddelde verblijftijd 4 kunnen afleiden:

> $\overline{\Theta} = \int \Theta P'(\Theta) d\Theta$ $\frac{9d\theta}{\theta_{\text{max}}} = \frac{1}{2} \theta_{\text{max}}$

of:

(13).

(10)

Danckwerts daarentegen neemt aan (50, 51) dat de kans dat een vloeistofelement verplaatst wordt onafhankelijk is van do tijd dat het reeds aan het oppervlak verblijft; hetgeen tot uiting komt in curve 2 van bovenstaande figuur, en die b.v. is voor te stellen door:

$$F(\varphi) = 1 - e^{-i\varphi}$$
 (14)

waarin s (l/sec) een parameter is. Hieruit valt af te leiden:

$$F'(\Theta) = se^{-S\Theta}$$
(15)

zodat

of

$$\overline{D}_{\rm m}^{\rm m} \approx \int s e^{-s \Theta} C_{\rm x} \sqrt{\frac{D}{\pi \Theta}} d\Theta$$

Oplossing van deze integraal geeft:

.0-

$$\overline{\mathcal{P}_{m}^{n}} = C_{x} \sqrt{\mathbb{D}s}$$

$$(16)$$

$$K = \sqrt{\mathbb{D}s}$$

$$(17)$$

(18)

Terwijl de gemiddelde verblijftijd @ volgt uit

$$\overline{\Theta} = \int \Theta F'(\Theta) d\Theta = \int \Theta B e^{-S\Theta} d\Theta$$

geeft:

õ

Een andere mogelijke ouderdomsverdeling wordt gegeven door curve 3, waarin dus tot uiting komt, dat een groot gedeelte van het oppervlak een kleine ouderdom, respectievelijk contacttijd heeft en een gering gedeelte een lange contacttijd. Omschrijven we deze curve met de functie:

$$F(\Theta) = 1 - \frac{1}{2} e^{-5} 1^{\Theta} - \frac{1}{2} e^{-5} 2^{\Theta}$$
(19)

(waarin S1 en S2 (1/sec) weer parameters zijn), dan volgt

hieruit op volkomen analoge wijze voor de overdrachtscoëfficient:

$$K = \frac{1}{2} \sqrt{Ds_1} + \frac{1}{2} \sqrt{Ds_2}$$

Terwijl

$$\overline{\Theta} = \frac{s_1 + s_2}{2s_1 s_2} \tag{21}$$

(20)

Het spreekt vanzelf dat nog tal van dergelijke verdelingsfuncties te bedenken zijn. Een overzicht hiervan wordt b.v. gegeven door <u>Hanratty</u> (46).

Over de opvatting dat de kans op verversing inderdaad onafhankelijk is van de leeftijd van een oppervlakte-elementje kan gediscussieerd worden. Het ligt voor de hand dat bij een oppervlak van geroerde vloeistof, waarbij de roerder dus een constant werkende impulsbron is, vooral bij hogere toerentallen van de roerder een vrij constant stromingsbeeld zal ontstaan, waardoor zich over het oppervlak ook een vrij constante verdeling van de verversingsgraad zal instellen. Neemt men dan een over het oppervlak gemiddelde contacttijd resp. verversingsgraad aan, dan lijkt de conceptie van Higbie juist; terwijl aan de gedachtengang van Danckwerts slechts voldaan zou worden, indien er een verversing optrad zonder dat er een impuls-bron aanwezig zou zijn, die de verversing zou veroorzaken.

Afgezien hiervan blijkt evenwel uit de bovenstaande formuleringen van de overdrachtscoëfficient (vergn. 12, 17 en 20) dat uitgaande van de penetratie-theorie in het algemeen geldt: $K_L \sim \sqrt{D}$, zodat dus de waarde voor n in verg. (5) gelijk aan 0,5 wordt.

II-3. Bespreking van metingen uit de literatuur

Literatuurgegevens over gasabsorptie aan oppervlakken van een geroerde vloeistof zijn zeer schaars.

<u>Goodgame</u> en <u>Sherwood</u> (52) maten overdrachtscoëfficienten voor absorptie van CO₂-lucht; NH₃-lucht en aceton-lucht-mengsels in oppervlakken van geroerd water bij verschillende drukken en bewezen daarmee de additiviteit van de optredende overdrachtsweerstanden (in gas- en vlocistof-fase). Zij maten evenwel slechts bij 1 toerental van de roerder, terwijl bovendien het oppervlak van de vloeistof sterk verstoord werd door de aangebrachte apparatuur (thermometers enz).

Johnson en <u>Chen-Jung Huang</u> (5) stelden een correlatie op voor Sh als functie van Re en Sc voor het oplossen van vaste stoffen vanaf de bodem van een geroerd vat en maakten daarbij de toepasbaarheid van de penetratie-theorie aannemelijk. Daar een vergelijking van resultaten interessant leek, zal later hierop teruggekomen worden (IV-4). <u>Kishinevskiï</u> et al. (53, 54, 55, 56, 57, 58) verrichte metingen betreffende chemische absorptie in geroerde oppervlakken. Zijn resultaten zijn dubieus en zijn gegevens niet uitvoerig genoeg om vergelijking mogelijk te maken. Over een nadere definiering van de overdrachtscoëfficient leat hij zich niet uit. Zeer recent is zijn publicatie over absorptie van H₂ en N₂ aan gedestilleerd water (59), waarin hij verklaart dat zijn resultaten in overeenstemming zijn met zijn theorie (?).

Hoofdstuk III - Experimenteel Gedeelte

III-1. Algemene Bespreking

III-1.1. Inleiding

Voor de metingen van de gasabsorptie-snelheid in het oppervlak van een geroerde vloeistof werd als geabsorbeerd gas zuiver CO₂ gekozen, zodat er geen gasweerstand optrad en de overdrachtsweerstand bij de gebruikte systemen geheel aan de zijde van de vloeistof-fase lag.

Gemeten werden overdrachtscoëfficienten voor water als functie van het toerental van de roerder.

Om de invloed van de viscositeit op de overdrachtscoëfficienten na te gaan werden dezelfde metingen uitgevoerd bij mengsels van water en glycerol.

Om de invloed van de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof, in dit geval Teepol, op de overdrachtscoëfficienten te bepalen, werd aan het gebruikte condenswater kleine hoeveelheden Teepol toegevoegd en de metingen als functie van het toerental herhaald.

III-1.2. Meetapparatuur

De aanvankelijke apparatuur bestond uit een vat waarin een zesbladige turbine-roerder geplaatst was. Om tot een zekere normalisatie te komen en om een eventuele correlatie met literatuurgegevens over mengtijden van twee mengbare vloeistoffen in geroerde vaten mogelijk te maken werden de afmetingen van vat en roerder gekozen in verhoudingen die in overeenstemming waren met die van de door <u>Kramers, Knoll</u> en <u>Baars</u> gebruikte apparatuur (13). De afmetingen zijn weergegeven in Tabel I.

In het vat waren vier keerschotten geplaatst om ronddraaien van de vloeistof en voortijdige kolkvorming te voorkomen. Zij waren van een zodanige lengte, dat zij 3 cm onder het vloeistofoppervlak stonden, om "dode hoeken" in het oppervlak te vermijden. De doorgang van de as van de roerder door het deksel van het vat was afgesloten met een kwikslot. De roerder werd voortbewogen door een motor met mechanische variator. Het toerental van de roerder werd gemeten met een stroboscoop, en vertoonde gedurende een proefneming een maximale afwijking van 2%. Het 98%-ige CO₂-gas werd uit een bombe via een stromingsfluctuatie-demper, een verzadiger en een afsluiter door het deksel boven in het vat geleid. Na de eerste metingen werd een vacuumvat voor de ontluchting van het water met een voorverwarmingselement aangebracht, terwijl, toen het onmogelijk bleek bij lage kamertemperaturen de temperatuur in het vat constant te houden, door de bodem een verwarmingselement van kantaaldraad, geïsoleerd door een glazen buisje, gevoerd word. Toneinde de gasabsoorptie-onelheid met behulp van de zeepbellen-methode te kunnen meten, was direct achter het vat een meetburet geschakeld. De uiteindelijke apparatuur is weergegeven in fig. I.

III-1.3. Meettechniek

Bij de eerste metingen aan water werd het vat gevuld door van te voren op temperatuur gebracht condenswater onmiddellijk in het vat te gieten tot op de gewenste hoogte (gelijk aan de diameter van het vat). De resultaten van de gedane metingen weken sterk uiteen doordat

- a. Een dubieuze correctie aangebracht moest worden voor de tijd waarin de lucht in het vat door CO₂ verdreven werd, en gedurende welke tijd dus al CO₂ door het water geabsorbeerd werd.
- b. Het condenswater niet ontlucht was en er dus gedurende de experimenten lucht uit het water ontweek en een dun laagje boven het oppervlak ontstond, waardoor de overdrachtsweerstand groter werd.

In de buurt van een toerental van de roerder gelijk aan 300 omw./min werd evenwel reeds een sterke afwijking van het normale verloop van de overdrachtscoëfficient als functie van het toerental waargenomen.

Bij de volgende metingen werd het water en daarna ook de andere gebruikte oplossingen eerst ontlucht in een vacuumvat, daarna via een voorverwarmer in het vat geleid, dat tot het deksel toe gevuld werd. Daarna pas werd de juiste hoogte van de waterspiegel ingesteld, onder toevoer van CO₂, hetgeen mogelijk was door het sluiten van kraan B. Naderhand werd om reeds bovenvermelde redenen in het vat een

Het bepalen van de overdrachtscoëfficienten als functie van het toerental werd gedaan door voor een aantal toerentallen, welke ongeveer 50 omw./min uiteen lagen, het verloop van de gasabsorptie-snelheid met de tijd te meten. Daartoe werd deze snelheid met behulp van de zeepbellenmethode bepaald door op verschillende tijdstippen 5 à 10 maal achtereen de tijd te meten welke nodig was voor het absorberen van een bepaald volume. Om het zwaartepunt van de zo verkregen puntengroeperingen te bepalen werd voor de kleine tijdsintervallen waarbinnen de punten zich bevonden de regressieve afname van absorptiesnelheid (volgens een e-macht) voorgesteld als een evenredige afname, zodat het mogelijk was van de gemeten absorptietijden in plaats van het geometrische het rekenkundige gemiddelde te nemen. Uit een controle bleek dat het geometrische en het rekenkundige gemiddelde van de gegroepeerde waarnemingen niet meer dan 0,5% verschilden, zodat, vooral met het oog op de verder te volgen berekeningen, deze benadering alleszins verantwoord was.

Van de momenten waarop de metingen plaats vonden werd uiteraard eveneens het rekenkundig gemiddelde genomen.

De temperatuur van het gas in de meetburet werd gemeten met een thermometer welke vlak voor de meetburet geplaatst was. Uit het gegeven dat de dichtheid van CO_2 bij O^OC en 760 mm 1,9769 g/l is, kom met behulp van de gemeten temperaturen de absorptiesnelheid op eenvoudige wijze berekend worden. (Daar p'_m/C_x onafhankelijk is van de druk werd geen rekening gehouden met variaties in de barometerstand).

De temperatuur van het water werd afgelezen met behulp van een thermometer, welke in het vat achter een keerschot geplaatst was om verstoring van het stromingsbeeld zoveel mogelijk te voorkomen.

III-1.4. Berekening van de overdrachtscoëfficient

Het uitwerken van de metingen en het berekenen van de overdrachtscoëfficienten geschiedde op grond van de volgende beschouwing.

- 15 -

verwarmingselement aangebracht.

Voor de absorptiesnelheid op een moment t, waarop in de vloeistof een gasconcentratie C heerst moet gelden:

$$\emptyset_{m} = KA(C_{x}-C) = V \frac{dC}{dt}, \qquad (22)$$

waarin V het volume van de vloeistof en $\frac{dC}{dt}$ de concentratieverandering per tijdseenheid voorstelt. Oplossing van deze differentiaalvergelijking geeft:

$$\frac{C_{x} - C}{C_{y}} = e^{-\frac{KA}{V}} \cdot t$$

zodat:

$$\emptyset_{\rm m} = {\rm KA} \cdot {\rm C}_{\rm x} e^{-\frac{{\rm KA}}{{\rm V}}} \cdot {\rm t}$$
 (24)

(23)

of:

$$\log \phi_m / c_x = \log KA - \frac{KA}{V} \cdot t \log e$$
 (25)

Hieruit blijkt dus dat log β_m/C_x tegen t uitgezet een rechte lijn zal moeten geven, waarvan de helling een maat is voor KA (in het vervolg KA_h genoemd), terwijl extrapolatie naar t = 0 een waarde voor KA geeft (KA_{t=0}) welke gelijk is aan de daarbij gevonden β_m/C_x .

Principieel zullen de op deze wijze gevonden twee waarden voor KA, resp. K, aan elkaar gelijk moeten zijn.

III-2. Discussie metingen en resultaten

Gasabsorptiesnelheden werden gemeten op de bovenbeschreven wijze bij water, glycerol-water-mengsels en zeer verdunde oplossingen van Teepol. Een en ander zal hieronder nader besproken worden.

III-2.1. Metingen aan water

De metingen werden gedaan aan ontlucht condenswater bij een temperatuur van ongeveer 20[°]C.

waarden van \mathcal{P}_m/C_x zijn weergegeven in Tabel II. De oplosbaarheid van CO2 in water werd uit literatuurgegevens verkregen (60). Uit grafieken waarin log \mathscr{D}_m/C_x tegen de tijd werd uitgezet werden KA $_{t=0}^{+}$ en KA $_{h}^{+}$ bepaald. We det must sub- $K_{t=0}$ on K_h worden hieruit berekend onder de (veronderstelling dat de grootte van het oppervlak niet veranderde met het toerental. De waarden stenden onderling zeer goed overeen, he hetgeon ook met behulp van de toets van Student (zie Appendix II) bevestigd werd. Een afwijking van de getrokken lijnen bleek een grotere invloed op K_h dat op $K_{t=0}$ te hebben, zodat de laatste grootheid als het meest juist werd beschouwd (metingen 1 th 10 in Tabel IX). For algorithm an opendation that you Voor latere berekeningen werd de diffusiecoëfficient bij verschillonde temperaturen berekend volgenseden dis alle andere $\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \frac{$ 创业性性的现在分词 机复造 化过量的过程分词 dit di ne attranstra uitgaande van de in (61) gegeven waarde voor $D_{20}o_{C}$. Als tem-peratuur van het water werd T_w gemiddeld over een gehele proeineming. 的现在分词 法法保持 Het verloop van $K_{t=0}$ met het toerental (zie figuur 3) vertoonde een sterke discontinuiteit bij het toerental n = 300. Bij dit toerental werd eveneens eon rimpeling van het oppervlak waargenomen, hetgeen bij lagere toerentallen niet het gevalwas, zodat aangenomen moet worden dat bij dit toerental een wijziging in het stromingsbeeld aan het oppervlak optrad. De in dezelfde figuur weergegeven overdrachtscoëfficient, welke tot stand komt door vrije convectle, die dus op kan treden tengevolge van dichtheidsverschillen welke ontstaan door het oplossen van CO2. Indien men aanneemt dat bij het oplossen van CO, in water geen volumeverandering optreedt volgt deze berekening gemakkelijk uit de algemene formule voor vrije convectie: (63) where h = 0; (Gr.Sc)ⁿ the Yan (resulted of (26) also h = 0; (Gr.Sc)ⁿ the Yan (resulted of (26) also h = 0; (Gr.Sc)ⁿ the Yan (resulted of (26)) also h = 0; (Gr.S

Waarin voor een horizontaal plat vlak n = 1/3 en 0 = 0,17.

0,5 e ecustum

- 17 -

De gemiddelden van de metingen en de daaruit voortvloeiende

.19.

voor mengsels van glycerol en water bij constante temperatuur. In figuur 3 is $K_{t=0}$ als functie van het toerental voor de twee meetseries en de orienteringsmetingen weergegeven. Evenals bij water, werd ook bij de serie $Q = 1055 \text{ kg/m}^3$ gen discontinuiteit in het verloop waargenomen bij een toerental n = 300 omw/min.

Daar het optreden van deze discontinuiteit dus kennelijk niet afhangt van de viscositeit (resp. het getal van Reynolds) en de oppervlaktespanning van glycerol-water-mengsels niet veel verschilt van die van zuiver water (literatuurgegevens vermelden voor zuiver water bij 25°C: 72 dyne/cm. voor een 10%-ige glycerol-water-oplossing 70,5 dyne/cm (65)) en het verschil in dichtheid tussen water en de gebruikte mengsels zo gering is dat het onwaarschijnlijk is, dat dit bij de ligging van de discontinuiteit tot uiting zou komen, ligt het vermoeden voor de hand dat we hier te doen hebben met een afhankelijkheid van het getal van Weber of van Froude (bij n = 300 omw/min Fr = 7,02), of met andere woorden met een wijziging in de toestand van het oppervlak. De overdrachtscoëfficient bij volledige vrije convectie, waarop later nog nader zal worden teruggekomen, werd op dezelfde wijze als bij water berekend, dus weer onder de veronderstelling dat bij het oplossen van CO, in het mengsels geen volumeverandering zou optreden.

Dat de viscositeit invloed uitoefent op de overdrachtscoëfficient komt in fig. 3 zeer sterk tot uiting.

III - 2.3. Metingen aan Teepol-oplossingen

Om de invloed van de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof op de overdrachtscoëfficient na te gaan werden metingen gedaan aan zeer verdunde oplossingen van Teepol in condenswater, n.l. 8 metingen aan een 0,0028 gew.% oplossing (Tabel VI); 8 metingen aan een 0,011 gew.% oplossing (Tabel VII) en 1 meting aan een 0,034 gew.% oplossing (Tabel VII) en 1 meting aan een 0,034 gew.% oplossing (Tabel VIII). In verband met de zeer lage Teepol-concentraties konden de verschillende benodigde grootheden berekend worden als geldend voor zuiver water. Een en ander is weergegeven in Tabel

χ.

6

 K_h en $K_{t=0}$ stemden hier vrij goed overeen (zie ook Appendix II). $K_{t=0}$ als functie van het getal van Reynolds met als vergelijkingsmateriaal een analoge curve van water is weergegeven in fig. 7.

<u>Hoofdstuk IV - Verwerking der Resultaten</u>

De onder III-2 besproken metingen en berekeningen van de stofoverdrachtscoëfficient maakten het mogelijk de invloed van de viscositeit, de vrije convectie en de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof op de absorptie na te gaan. Deze invloeden zullen hieronder achtereenvolgens besproken worden.

<u>IV - 1. Invloed van de viscositeit</u>

Uit figuur 3 is reeds gebleken dat de viscositeit een grote invloed uitoefent op de stofoverdrachtscoëfficient. Om een dieper inzicht te verkrijgen werden de twee concepties van het gebeuren aan het oppervlak, de filmtheorie en de penetratie-theorie tegenover elkaar gesteld. Laten we de invloed van de oppervlakte-vergroting buiten beschouwing dan volgen hieruit, zoals we reeds gezien hebben, als mogelijke dimensieloze correlaties respectievelijk:

$$Sh = C \cdot Re^{m} \cdot Sc^{1/3}$$
 (5a)

en

Óſ

$$Sh = C. Re^{m} \cdot Sc^{1/2}$$
 (5b)

Hieruit volgt dus dat indien inderdaad geen oppervlakte-vergroting zou optreden

> $K/D^{2/3} \gamma^{1/3}$ als functie van Re $K/D^{1/2} \gamma^{1/2}$ als functie van Re

in een grafiek voor alle proeven één lijn zou moeten opleveren, al naar gelang een van beide opvattingen juist is. Bij de uitvoering van deze procedure (opgenomen in Tabel IX) bleek, hoewel de curven voor de diverse viscositeiten nog sterk uiteenweken, dat de resultaten het minst slecht overeenkwamen met eerstgenoemde conceptie. Het verloop van $K/D^{2/3} \cdot \sqrt{1/3}$ met Re is weergegeven in fig.4. Dat twee van de waarden voor $\gamma = 2,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ hoger liggen dan de waarden voor $\gamma = 1,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ bij eenzelfde Re, is te verklaren uit het feit dat hierbij voor het verkrijgen van eenzelfde Re een hoger toerental nodig is, waarvan dus een grotere oppervlakte-vergroting het gevolg is. De geschetste voorstelling van zaken is in zoverre irreëel, dat de stofoverdrachtscoëfficient, en zeker voor lagere toerentallen, ook nog een functie van het getal van Grashoff is, hetgeen dus betekent dat numeriek een gedeelte van de overdrachtscoëfficient te verklaren valt uit de optredende vrije convectie. In hoeverre deze een rol kan spelen bij de stofoverdracht zal hieronder nagegaan worden.

<u>IV-2. Invloed van de vrije convectie</u>

Bij het onderzoek naar de invloed van de vrije convectie werd er van uitgegaan, dat bij toenemend toerental deze invloed afneemt, en wel zodanig, dat bij een toerental van de roerder n = 0 de overdrachtscoëfficient geheel en al door de vrije convectie en bij zeer hoog toerental geheel door de gedwongen convectie wordt bepaald. De totale overdrachtscoëfficient wordt dus beschouwd als te zijn samengesteld uit een voor de vrije en een voor de gedwongen convectie:

 $K_{tot} = K_{turb} + K_{v.c.}$ (27)

waarin dus bij toenemend toerental K_{turb} relatief groter en K_{v.c.} relatief kleiner wordt. Voor deze verlaging van K_{v.c.} als functie van K_{turb} werd gedacht aan een betrekking van de volgende vorm:

$$K_{v.c.} = (K_{v.c.})_{o} \cdot e^{(1 - \frac{K_{tot}}{(K_{v.c.})_{o}})} \beta$$
 (28)

waarin (K_{v.c.})_o de overdrachtscoëfficient bij volledige vrije convectie (n=0) voorstelt. Combinatie van (27) en (28) leidt tot:

$$\frac{K_{\text{tot}} - K_{\text{turb}}}{(K_{\text{v.c.}})} = e^{(1 - \frac{K_{\text{tot}}}{(K_{\text{v.c.}})})}$$

oſ

$$\log \frac{K_{\text{tot}} - K_{\text{turb}}}{(K_{\text{v.c.}})_{\text{o}}} = (1 - \frac{K_{\text{tot}}}{(K_{\text{v.c.}})_{\text{o}}}) \beta \log e \quad (30)$$

)ß

(29)

Waardoor inderdaad aan genoemde voorwaarden voldaan is. Overeenstemming met deze gedachtengang werd gevonden in de onderzoekingen van <u>Eckert</u> en <u>Diaguila</u> (66), die de gemengde vrije en gedwongen convectie in tegenstroom bij warmteoverdracht in buizen onderzochten. Het resultaat van hun onderzoekingen is schematisch als volgt weer te geven:



waarin Nu_x, Re_x en Gr_xPr berekend zijn met betrekking tot een bepaalde verhouding van een afstand langs de lengte van de buis tot de diameter, zodanig, dat de hieruit volgende Nu_x - Gr_xPr curve vrijwel overeenstemde met die bij een horizontaal plat vlak; waardoor toepassing van hun resultaten aannamelijker werd. Van hun resultaten werden een 35-tel punten genomen en daarvoor log $\frac{Nutot - Nuturb}{(Hu_v.c.)o}$ tegen $\frac{Nutot}{(Nu_v)}$; hetgeen dus overeenkomt met do betrekking o tussen log $\frac{Ktot - Kturb}{(Ku.c.)o}$ en $\frac{Ktot}{(K_{vc})o}$; grafisch tegen elkaar uitgzet. (Zie fig. 6). Rekening houdend met het feit dat bij lagere waarden van Nu_{tot}/(Nu_{vc})_o hun resultaten minder betrouwbaar waren en dat volgens bevenstaande formulering voor (Ktot-Kturb)/(Kvc)_o = 1,0 $K_{tot}/(K_{vc})_{o} = 1$ moest zijn, werd door de zo verkregen puntenverzeneling de meest waar-

schijnlijke rechte lijn getrokken. (Daar het hier niet meer dan een allereerste benadering betreft, was deze procedure wel gerechtvaardigd). Door berekening van de vrije convectie bij n = 0, onder aanname dat er bij het oplossen van CO, in de vloeistoffen geen volumeverandering zou plaats vinden, werd het mogelijk met behulp van deze rechte lijn K_{turb}, die dus alleen zijn ontstaan heeft te danken aan een bepaald getal van Reynolds, te berekenen. Met de zo verkregen waarden voor K_{turb} werden de onder IV-1 vermelde berekeningen herhaald (opgenomen in Tabel IX). Evenals daar trad tussen de curven van $K_{turb} / D^{1/2} \cdot \gamma^{1/2}$ vs Re voor de verschillende viscositeiten een grote discrepantie op. Bij de grafische weergave van $K_{turb}/D^{2/3}$. $y^{1/3}$ vs Re (zie fig. 5) treedt een toenadering tussen de curven op, zodanig dat de curve voor $\gamma = 2,35.10^{-6}$ m²/sec die van water doorkruist, hetgeen dus in overeenstemming is met het optreden van oppervlakte-vergroting bij de hier gebruikte hogere toerentallen van de roerder. De ligging van de curve voor $\forall = 1,42.10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$, waarvoor dus het verschil tussen $K_{t=0}$ en K_h significant was, is evenwel niet zodanig, dat er gesproken kan worden van een eenduidigheid van de resultaten. Laat men deze laatste curve buiten beschouwing, dan bestaat er een reden om aan te nemen dat de aanname van een laminaire grenslaag het gebeuren aan het oppervlak beter weerspiegelt, dan de theorie van Danckwerts of Higbie met oppervlakte-verversing.

IV-3. De invloed van een oppervlakte-actieve stof (Teepol)

Uit figuur 7 waarin K als functie van het getal van Reynolds van de roerder voor zuiver water en de diverse Teepoloplossingen is weergegeven, blijkt dat bij toenemende concentratie van de oppervlakte-actieve stof een afvlakking optreedt van de bij water waargenomen discontinuiteit bij het toerental van de roerder n = 300 omw/min (Re = 1,75.10⁴), zodanig dat men bij een concentratie van 0,011% kan spreken van een buigpunt in de buurt van deze waarde. Merkwaardig ook is het verloop van de kromme bij de 0,011 gew.% oplossing bij hogere getallen van Reynolds, welke doet suggereren dat de oppervlakte-vergroting relatief gezien wat gedempt wordt. Verder doet de ligging van

· 24 -

het punt van de 0,034 gew.%-ige oplossing vermoeden dat bij nog hogere Teepol-concentraties deze werking weer teniet gedaan wordt. Het is evenwel zeer de vraag of men uit de ligging van één punt en de zeer geringe optredende afwijkingen van de metingen aan water conclusies mag verbinden. Juister is het waarschijnlijk te concluderen dat

de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof slechts een uiterst geringe invloed uitoefent op de stofoverdrachtscoëfficient, waaruit dus volgt dat de oppervlakte-vergroting voornamelijk veroorzaakt wordt door vorming van zwaartekrachtsgolven, waar het getal van Froude bij betrokken is. Het zal echter zeer moeilijk zijn, door metingen na te gaan hoe de overdrachtscoëfficient van het getal van Froude afhangt, daar men dan bij veriërend toerental Re $(\frac{nd^2}{\gamma})$ en Sc $(\frac{\gamma}{m})$ constant zou moeten houden.

IV-4. Vergelijking van resultaten met andere metingen

Zoals reeds vermeld (II-3) bestudeerden Johnson en Chen-Jung Huang (5) het oplossen van vaste stoffen vanaf de bodem van geroerde vaten. Uitgaande van de veronderstelling dat zich boven de vaste stof een vloeistoflaagje vormde, dat verzadigd was aan deze stof, en dat dus in contact kwam met de turbulente vloeistof, maakten zij de theorie van Danckwerts aannemlijk, door voor het door hen gebruikte vat de volgende correlatie op te stellen:

$$\frac{KD}{D} = 0,0924 \ \left(\frac{V}{D}\right)^{0,5} \ \left(\frac{nd^2}{V}\right)^{0,71}$$

hetgeen dus in overeenstemming is met de definiering volgens Danckwerts en Higble van K_L volgens welke $K_L \sim \sqrt{D}$. Het bezwaar van hun gedachtengang is evenwel, dat in de richting van de bodem van het vat een uitsterving van de turbulentie kan optreden, zodat het dus niet onmogelijk is, dat er beneden in het vat laminaire stroming optreedt, waardoor aanname van een grenslaag meer acceptabel wordt. (Terwijl bij een vrij oppervlak veel minder sprake zou moeten zijn van uitsterving van de turbulentie).

Daar een vergelijking (in zoverre er althans hier van vergelijking sprake kan zijn) van resultaten interessant leek. werd bovenstaande correlatie toegepast op het fictieve geval van absorptie van CO₂ vanaf de bodem van het door ons gebruikte vat, en de overdrachtscoëfficient in dat geval berekend als functie van het getal van Reynolds. Het resultaat hiervan en als vergelijking de resultaten van de gasabsorptiemetingen aan het vrije oppervlak voor water zijn weergegeven in fig. 8. Bij toenemende Re blijken de resultaten aanvankelijk vrijwel parallel te lopen, eerst bij hogere Re treden afwijkingen op, welke verklaard zouden kunnen worden door het optreden van vergroting van het vrije oppervlak. Hierbij dient men er evenwel rekening mee te houden, dat de door de auteurs gebruikte vatdimensies verschillen van de door ons gebruikte. Terwijl het vat ongeveer van gelijke grootte is, is de door hen gebruikte roerder groter en is de afstand van de roerder tot de bodem kleiner, hetgeen dus tot gevolg heeft dat de constante in bovenstaande correlatie voor ons geval kleiner moet zijn en de daaruit volgende waarden voor $K_{T_{t}}$ als functie van Re lager moeten liggen dan in de grafiek is weergegeven. Anderzijds is het zo, dat bij de door de auteurs gedane proefnemingen geen vrije convectie optrad, terwijl onze resultaten aan het vrije oppervlak daarvoor gecorrigeerd zouden moeten worden. Een meer dan oppervlakkige vergelijking is dus niet mogelijk.

- 26 -

Hoofdstuk V - Conclusies

Nagegaan werd de invloed van het toerental van de roerder, de viscositeit van de vloeistof en de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof op de stofoverdrachtscoëfficient bij absorptie van CO₂ in het oppervlak van een vloeistof in een geroerd vat. De hieruit volgende conclusies zijn: 1. De overdrachtscoëfficient neemt bij groter wordend toerental progressief toe (indien men de grootte van het oppervlak als onafhankelijk van het toerental beschouwt), welke progressiviteit te verklaren valt uit het ontstaan van zwaartekrachtsgolven. De invloed van het getal van Froude werd niet nader onderzocht.

- 2. Bij toenemende viscositeit daalt bij zelfde getallen van Reynolds de stofoverdrachtscoëfficient.
- 3. Door de verschillende viscositeiten m.b.v. het getal van Schmidt in rekening te brengen op een wijze die volgt uit aanname van een laminaire film of van een oppervlakte-verversing volgens Danckwerts of Higbie wordt deze daling niet geheel verklaard.
- 4. Door het in rekening brengen van de vrije convectie, waarvan de invloed groter wordt, naarmate het toerental van de roerder lager wordt, en door de resultaten van een serie metingen bij $\hat{V} = 1,42\cdot10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ dubieus te stellen, wordt het waarschijnlijk dat voor een verklaring van het gebeuren aan het oppervlak de aanname van een laminaire grenslaag prevaleert boven de aanname van een oppervlakteverversing volgens Danckwerts of Higbie.
- 5. De aanwezigheid van oppervlakte-actieve stoffen (onderzocht met Teepol) oefent een uiterst geringe invloed uit op de stofoverdrachtscoëfficient.

Bij eventuele voortzetting van het onderzoek lijkt het wenselijk de invloed van de viscositeit nader na te gaan, om aldus tot een verklaring te komen van het afwijkende gedrag van de stofoverdrachtscoëfficient bij $\mathcal{V} = 1,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec.}$ Aan een en ander dient een onderzoek naar de oplosbaarheid van CO₂ in glycerol-water-mengsels vooraf te gaan, om daardoor de juistheid van de gebruikte C_x-waarden buiten elke twijfel te stellen.

Appendix I - Berekening C_-waarden van CO2 in glyoerolwater-mengsels

Door <u>von Kiss</u>, <u>Lajtai</u> en <u>Thury</u> (67) werden oplosbaarheden gemeten van CO₂ in glycercl-water mengsels blj 0,05; 12,5 en 25°C bij verschillende samenstellingen van de mengsels. Oplosbaarheden bij 15°C werden gemeten door <u>von Hammel</u> (68). De waarden van eerstgenoemde auteurs komen niet overeen met die van laatstgenoemde en geven de indruk te lang te zijn. Daarom werd getracht de oplosbaarheden van CO₂ bij 20°C te berekenen op een door <u>Van Krevelen</u> en <u>Hoftijzer</u> aangegeven wijze (62). Uit thermodynamische beschouwingen leidden zij voor het evenwicht tussen een gas en een vloeistof waarin een andere stof is opgelost een gemodificeerde wet van Henry af:

$$pH = \sqrt{C_x opl}$$

Waarin \forall de activiteitscoëfficient is, welke voor zuiver water de waarde 1 heaft en groter wordt naarmate de concentratie van de opgeloste stof (C₂) toeneemt; voor niet-electrolyten volgens:

$$\log \gamma = c c_2$$

waarin c een constante is, onafhankelijk van de temperatuur en de aard van het opgeloste gas, maar afhankelijk van de aard van de opgelosto stof.

Uit het feit dat V voor zuiver water 1 is kunnen we afleiden dat:

$$\int = \frac{C_{\rm x H20}}{C_{\rm x opl}}$$

zodat

$$\log \frac{C_{x H_{2}0}}{C_{x opl}} = C_{2}$$

In figuur 9 werden de literatuurwaarden voor 15, 25 en 12,5°C uitgezet. De waarden van 25°C bleken die van 15°C zodanig te benaderen, dat aangenomen werd dat tussen deze twee temperaturen de door Van Krevelen en Hoftijzer voorgestelde procedure in het onderhavige geval inderdaad toepasbaar was. Op deze wijze werden dus de C_x-waarden voor 20⁰C berekend uit die bij 15⁰C.

(kg/m ³)	02 (gmol/1)	log C _{x H2} 0/C _{x opl}	Cx opl kg/m3)
1055	2,98	0,111	1,34
1084	4,49	0,169	1,18
1099	5,27	0,197	1,10
1093	4,96	0,187	1,13
1092	4,91	0,185	1,13
1089	4,75	0,180	1,14

Voor de gebruikte oplossingen volgt hieruit:

Appendix II - Onderzoek naar significantie van verschillen tussen berekende waarden voor K_h en K_{t=0} -

Met behulp van de Toets van Student word nagegaan in hoeverre de optredende verschillen tussen de berekende waarden voor K_h en $K_{t=0}$ significant waren. Daarvoor werd er dus van uit gegaan dat de waarden van K_h en $K_{t=0}$ voor elke groep waarnemingen normaal verdeeld waren en de verschillen in elke groep dezelfde spreiding bezaten.

De berekeningen zullen zoveel mogelijk in tabelvorm gegeven worden. De wijze van berekenen en de benodigde tabellen zijn in elk willekeurig handboek voor statistiek te vinden.

A. Analyse van de resultaten van de metingen aan water.

No	^K h	K _{t=0}	Z _A = K _h -K _{t=0}	Z _A ² .10 ¹²
		•	.10 ⁶	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1	10,40.10 ⁻⁶	9,65.10-6	+0,75	0,562
2	11,26	11,27	-0,01	0,0001
3	12,93	12,94	-0,01	0,0001
4	15,95	15,46	+0,49	0,240
5	15,78	16,22	-0,44	0,194
6	19,45	18,40	+1,05	1,100
7	20,59	20,30	+0,29	0,084
8	22,80	22,60	+0,20	0,040
9	27,75	26,15	+1,60	2,560
10	29,50	29,70	-0,20	0,040
		Σ	$z_{a}=3,72$ Σz_{A}^{2}	=4,820

 $\overline{Z_A} = 0,372$ $\Sigma Z_A^2 = 4,82$ $\overline{Z_A}^2 = 0,138$

 $s_A^2 = 1/9 (4,82 - 10.0,138) = 0,382$ $s_A^2 = 0,618$

 $t_1(Z_A) = \frac{0.372}{0.618} \sqrt{10} = 1.905 \quad Y = 9$

Dus tweezijdige overschrijdingskans ligt tussen 0,1 en 0,05. Behoudens een betrouwbaarheid van 5% kunnen we dus zeggen dat voor de metingen aan water $K_h = K_{t=0}$. B. Analyse resultaten van metingen aan glycerol-water-mengsels met $Q = 1055 \text{ kg/m}^3$.

No	K _h .10 ⁶	K _{t=0} .10 ⁶	^Z _B =K _h -K _t	=0 Z _B ²
			.106	.10 ¹²
11	5,99	6,85	-0,86	0,74
12	6,97	7,90	-0,93	0,87
13	5,06	9,90	-4,84	23.4
14	9,29	10,41	-1,12	1,26
15	7,11	11,50	-4,39	19,25
16	9,06	11,79	-2,73	7,47
17	11,77	12,96	-1,19	1,42
18	11,59	-13,96	-2,37	5,61
19	13,20	15,45	-2,25	5,08
		, Z	Z _B =-20,68	$z z_{B}^{2} = 65, 10$
$\overline{U_{\rm D}} =$	-2,30	$\frac{2}{Z_{\rm p}}^2 = 5,30$	$z z_{p}^{2} = 6$	5,10

$$S_B^2 = 1/8 (65, 1 - 9.5, 30) = 2, 18$$
 $S_B^2 = 1, 48$
 $t_1(Z_B) = \frac{2, 30}{1, 48} \sqrt{9} = 4, 66$ $\sqrt[3]{} = 8$

Dus tweezijdige overschrijdingskans is $\ll 0,01$. Behoudens een betrouwbaarheid van 5% is $K_{t=0}$ systhematisch groter dan K_h .

C. Analyse resultaten van metingen aan glycerol-water-mengsels met $Q = 1084 \text{ kg/m}^3$

No	K _h vlo ⁶	K _{t=0} .10	$z_{c}=K_{h}-K_{t=0}$	2 C 2
21	10,10	9,39	+0,71	0,50
20	6,41	8,45	-2,04	4,16
22	8,63	10,62	-1,99	3,96
23	12,40	11,19	+1,21	1,46
		,	$\mathbb{Z} \mathbb{Z}_{0} = -2, 11 \mathbb{Z} \mathbb{Z}_{0}^{2}$	=10,08

$$\overline{Z_{C}} = -0,527 \quad \overline{Z_{C}}^{2} = 0,28 \quad \sum Z_{C}^{2} = 10,1$$

$$S_{C}^{2} = 1/3 (10,1 - 4.0,28) = 3,0 \quad S_{C} = 1,73$$

$$t_{1}(Z_{C}) = \frac{0,527}{1,73} \sqrt{4} = 0,608 \quad \forall = 3$$

Dus tweezijdige overschrijdingskans ligt tussen 0,6 en 0,5. Behoudens een betrouwbaarheid van 5% kan men dus zeggen dat $K_h = K_{t=0}$.

D. Analyse resultaten van proefmetingen aan glycerol-watermengsels.

Voor deze analyse werden de proefmetingen tezemen genomen en beschouwd als komende uit een en dezelfde verdeling.

No	K _h .10 ⁶	K _{t=0} .10		Z _D ² , 10 ¹²
24	7,06	9,36	-2,30	5,30
25	6,88	10,10	-3,22	10,19
26	5,02	8,91	-3,89	15,15
27	4,69	8,78	-4,09	16,80
			$\Sigma Z_{D}=13,50 \Sigma Z_{D}^{2}=$	47,44

 $\overline{Z_{\rm D}} = -3,38$ $\overline{Z_{\rm D}}^2 = 11,4$ $\Xi Z_{\rm D}^2 = 47,44$

 $s_D^2 = 1/3 (47, 4 - 4.11, 4) = 0, 6$ $s_D = 0,775$ $t_1(z_D) = \frac{3.38}{0.775} \sqrt{4} = 8,73 \quad \forall = 3$

Dus tweezijdige overschrijdingskans is << 0,01 Behoudens een onbetrouwbaarheid van 5% is $K_{t=0}$ systhematisch groter dan K_{h} .

E. Analyse van resultaten van metingen aan Teepol-oplossingen, 0,0028%.

- 32 -

- 33 -

No	K _h .10 ⁶	K ^{t=0} .10	5 ZE ^{-K} h ^{-K} t=0 .10 ⁶	z _z ² .10 ¹²
28	10 00	וריכי רוב	0.40	
<u> </u>	AL 966	11914	-+0,49	0,241
29	11,94	13,16	-1,22	1,485
30	15,70	15,85	-0,15	0,023
31	17,50	17,78	-0,28	0,079
32	20,23	19,05	+1,20	1,440
33	22,20	21,70	+0,50	0,250
34	22,20	22,90	-0,70	0.490
35	24,70	26,65	-1,95	3,800
		-	$\Sigma Z_{\rm E} = -2,11 \Sigma Z_{\rm E}^2$	= 7,788

 $\overline{Z_{E}} = -0,264 \qquad \overline{Z_{E}}^{2} = 0,0699 \qquad \Xi Z_{E}^{2} = 7,788$ $S_{E}^{2} = 1/7 (7,788 - 8.0,0699) = 1,031 \qquad S_{E} = 1,015$ $t_{1}(Z_{E}) = \frac{0,254}{1,015} \quad \sqrt{8} = 0,735 \qquad \gamma = 7$

Hierult volgt een tweezijdige overschrijdingskans die ligt tussen 0,5 en 0,4. Behoudens een betrouwbaarheid van 5% is dus $K_h = K_{t=0}$

F. Analyse van resultaten van metingen aan Teepol-oplossingen, 0,011%.

No	K _h .10 ⁶	K _{t=0} .1.0 ⁶	Z _F =X _h -K _{t=0}	Z_P ²
			·10 ⁶	.1012
36	9,95	11,45	-1,50	2,25
37	11,16	13,21	-2,05	4,20
38	17,40	15,25	+2,15	4,61
39	17,42	16,85	+0,57	0,325
40	17,50	19,55	-1,95	3, 80
41	20,55	20,81	-0,26	0,063
42	23,35	22,99	+0,36	0,130
43	26,15	25,41	+0,74	0,543
		ΣZ _F	= -1,94	$\Sigma 2_{p=15,93}^{2}$

$$\overline{Z_{F}} = -0,243 \qquad \overline{Z_{F}}^{2} = 0,0591 \qquad \Xi Z_{F}^{2} = 15,93$$

$$S_{F}^{2} = 1/7 (15,93 - 8.0,0591) = 2,21 \qquad S_{F} = 1,49$$

$$t_{1}(Z_{F}) = \frac{0,243}{1,49} \quad \forall B = 0,461 \quad \forall = 7$$

Hieruit volgt een tweezijdige overschrijdingskans die ligt tussen 0,7 en 0,6.

Behoudens een betrouwbaarheid van 5% is dus $K_h = K_{t=0}^{\circ}$
Overzicht der gebruikte symbolen

$\varphi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{n}}$, absorptiesnelheid per eenheid van oppervle	k xu/m ² oon
Ø _m	, absorptiesnelheid	kg/sen
K	, totale stofoverdrachtscoefficient	m/sec
$\mathbb{K}^{\mathbf{G}}$, stofoverdrachtscoefficient in gasfage	m/900
X L	, stofoverårachtscoefficient in vloeistoffen	8 8/800
^K h	, overdrachtscoefficient berokend uit de hel	
	ling van de log p_m/c_{-} vs t-curve	
^K t=o	, overdrachtscoefficient berekend uit de lor	<i>my</i> 566
	\emptyset_m/C_x vs t -curve d.m.v. extrapolatic near	
	t = 0	m/890
Ktot	, totale stofoverdrachtscoefficient in de	ay 500
	vloeistoffase en beschouwd als te zijn ont-	•
	staan t.g.v. vrije en gedwongen convectie	m/sec
Kturb	, overdrachtscoefficient in de vloeistoffase.	
	teweeggebracht door gedwongen convectie	m/sec
K.v.c.	, overdrachtscoefficient in de vloeistoffase.	
	teweeggebracht door vrije convectie	m/sec
(K _{v.c}), overdrachtscoefficient in de vloeistoffase	
	bij het toerental $n = 0$	m/sec
Z	, verschil tussen overeenkomstige waarden van	
•	$K_{h} en K_{t=0}$	m/sec
p	, gasdruk	N/m^2
H	, Henry-constante	sec ² /m ²
o	, aanvangsconcentratie in vloeistoffase	kg/m ³
$c^{\mathbf{x}}$, verzadigingsgasconcentratie in vloeistof-	
~	fase	kg/m ³
C .	, gasconcentratie in vloeistoffase	kg/m ³
°2	, glycerolconcentratie in glycerol-water-	
	mengsels	mol/liter
A	, oppervlak van geroerde vloeistof	m ²
ò	, dikte ven leminaire vloeistoffilm	m
69 77	, contacttijd aan het oppervlak	890
5	, gemiddelde contacttijd aan het oppervlak	sec
ទ	, Tractionele snelheid van oppervlaktever-	•
m	Versing	L/sec
S.	, arrusiecoefficient van gas in vloeistof	² /sec

ţ,

- 35 -

		dynamicahe viceositeit van vloeistof	Nsec/m ²
Ŋ	9		m ² /200
Ŷ	9	Kinematische Viscositeit van Vioeistoi	m / Sec
P	9	dichtheid van geroerde vloeistof	kg/m²
À P	7	verschil in dichtheid van met gas verzadig-	-
- (de vloeistof en zuivere vloeistof	kg/m ³
X	9	oppervlakte-spanning van vloeistof	N/m^2
n	9	toerental van roerder	omw/sec
ቲ	9	moment van waarneming, gerekend vanaf de be-	
		gintijd van het waargenomen verschijnsel	sec
g	9	versnelling van de zwaartekracht	m/sec ²
D	9	diameter van het geroerde vat	m
d	9	uitwendige diameter roerder	m
W	9	hoogte roerderbladen	m
Η	2	hoogte vloeistofspiegel in vat	m
٨	9	volume vloeistof in vat	m ²
Sh	2	getal van Sherwood	
Sc	9	getal van Schmidt	*
Re	9	getal van Reynolds	
Gr	\$	getal van Grashoff	
Fr	9	getal van Froude	
₩e	\$	getal van Weber	

- 36 -

Literatuuroverzicht

- 1. R.C.L. Bosworth, Physics in Chemical Industry p. 425, (Mc Millan & Co, London 1950)
- 2. J.G. van de Vusse, Mixing by agitation of miscible liquids (Diss. Delft 1953)
- 3. A.W. Hixson, S.J. Baum, Ind. Eng. Chem. <u>33</u>, 478, 1433 (1946) en Ind. Eng. Chem. <u>34</u>, 120, 194 (1942)
- 4. E.M. Nack, R.E. Marriner, Chem. Eng. Progr. 45 , 545, (1949)
- 5. A.J. Johnson, Chen-Jung Huang, A.I.Ch.E. Journal, 2, 412 (1956)
- 6. A.W. Hixson, M.J. Smith, Ind. Eng. Chem. <u>41</u>, 973 (1942)
- 7. T.H. Chilton, T.B. Drew, R.H. Jebens, Ind. Eng. Chem. 36, 510 (1944)
- 8. C.V. King, P.L. Howard, Ind. Eng. Chem. 29, 75 (1937)
- 9. H. Kraussold, Chem. Ing. Techn. 23, 177, (1951)
- 10. W.L. Badger, J.C. Wood, E.R. Whittemore, Chem.Met. Eng. 27, 1176 (1922)
- 11. R.E.J. Dodd, J. Phys. Chem. 31, 1761 (1927)
- 12. H. Kramers, W.H. Knoll, Ingenieur 63 Ch 9, 67, (1951)
- 13. H. Kramers, W.H. Knoll, G.M. Baars, Chem. Eng. Sci. 2, 35, (1953)
- 14. W. Möhle, Chem. Ing. Techn. 21, 355 (1949)
- 15. W. Möhle, Chem. Ing. Techn. 24, 495 (1952)

16. Shinji Nagata, Masamichi Yanagimoto, Tohei Yokoyama, Memoirs Fac. Eng. Kyoto Univ. <u>18</u> IV, 444 (1956)

17. E. Brunner, Z. Phys. Chem. A 47 56, 190 (1904)

idem

18. C.V. King, J. Am. Chem. Soc. 57, 828 (1935)

- 19. N. Nernst, Z. Physik. Chem. 15, 148 (1904)
- 20. A.W. Hixson, A.H. Tenney, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 31, 113 (1935)

<u>51</u>

95, 494 (1905)

- 21. A.M.L. White, E. Brenner, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 30, 585 (1934)
- 22. A.M.L. White, S.D. Sumerford, Chem. Met. Eng <u>43</u>, 370 (1936) 23. J.H. Rushton, Chem. Eng. Progress <u>46</u>, 470 (1950)
 - 24. G. Mc Lean, E.F. Lyons, Ind. Eng. Chom. 30, 489 (1938)
- 25. J.H. Hushton, D.E. Mack, H.J. Everett, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, <u>42</u>, 441 (1946)

- 26. J.H. Rushton, J.Y. Oldshue, Chem. Eng. Progress <u>49</u>, 161, 267, (1953)
- 27. J.O. Hinze, B.G. van der Hegge Zijnen, Appl. Sci. Res. Al, 435, (1949)
- 28. A.M.L. White, E. Brenner, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 30, 585 (1934)
- 29. S.A. Miller, Ch. A. Mann, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. <u>40</u>, 709, (1944)
- 30. Shinji Nagata, Naoya Yoshioka, Tohei Yokoyamu, Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 17 III, 175 (1955)
- 31. Shinji Nageta, Tohei Yokoyama, Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 17 IV, 253 (1955)
- 32. Shinji Nagata, Tohei Yokoyama, Hiroyuki Maeda, Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 18 I, 13 (1956)
- 33. D.E. Mack, Chem. Eng. <u>47</u>, 109 (1951)
- 34. J. Hiel, Chem. Met. Eng 28, 1077 (1923)
- 35. H.O. Forrest, B.E. Roetheli, R.H. Brown, Ind. Eng. Chem. 23, 650 (1931)
- 36. W. Keller, Z. Physik. Chem. A 431 (1929)
- 37. B.A. Bakhmetefr, The Mechanics of Turbulent Flow, (Princeton Un. Fress, 1936)
- 38. L. Prandtl, Essentials of Fluid Dynamics, (Blackie & Son Ltd, London, 1952)
- 39. Th. von Kärmán, J. Aeronautical Sc. 1, 1, (1934)
- 40. G.K. Batchelor, The Theory of Homogenous Turbulence, (University Press Cambridge, 1953)
- 41. Th. von Kármán, J. Aeronautical Sc. 4, 131 (1937)
- 42. Th. von Kármán, L. Howarth, Proc. Roy. Soc (London) A 164, 192 (1938)
- 43. G.I. Taylor, Proc. Roy. Soc. (London) A 102, 541 (1923)
- 44. G.I. Taylor, Proc. Roy. Soc. (London) A 151, 494 (1935)
- 45. G.I. Taylor, Proc. Roy. Soc. (London) A 157, 546 (1935)
- 46^a H.L. Dryden, Ind. Eng. Chem. <u>31</u>, 416 (1939)
- 46. Th. J. Hanratty, A.I. Ch.E. Journal 2, 359 (1956)
- 47. W.G. Whitman, Chem. Met. Eng. 29, 147 (1923)
- 48. W.K. Lewis, W.G. Whitman, Ind. Eng. Chem. 16, 1215 (1924)
- 49. R. Higbie, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. <u>31</u>, 365 (1935)
- 50. P.V. Danckwerts, Ind. Ing. Chem. <u>43</u>, 1460 (1951)
- 51. P.V. Danckwerts, Am. Inst. Chem. Engrs. 1, 456 (1955)

52. Th. Goodgame, T.K. Sherwood, Chem. Eng. Sc. 3, 37 (1954) 53. M.Kh. Kishinevskii, Zh. Priklad. Khim. 22, 1173 (1949) 54. M.Kh. Kishinevskii, Zh.Priklad. Khim. 24, 542 (1951) 55. M. Kh. Kishinevskiï, R.M. Novik, Zh. Priklad. Khim. 26, 673 (1953). 56. M. Kh. Kishinevskil, Zh. Priklad. Khim. <u>27</u>, 382 (1954) 57. M. Kh. Kishinevskiï, S.M. Faïer, Zh. Priklad. Khim. <u>26</u>, 579 (1953) 58. M. Kh. Kishinevskiï, Zh. Priklad. Khim. 27, 450 (1954) 59. M.Kh. Kishinevskiï, 60. G.A. Morris, J. Jackson, Absorption Towers (1953) 61. J.H. Perry, Chemical Engineers' Handbook, 540 (London 1950) 62. D.W. van Krevelen, P.J. Hoftijzer, XXI ème Congrès International de Chimie Industrielle, Bruxelles, Sept. 1948, p. 168 63. Intern. Crit. Tables V, 23 64. R.A.T.O. Nysing, Diss. Delft 1957 (nog te verschijnen) 65, Tables Annuelles Constantes et Données Numériques 12 (7), 14 (1939) 66. E.R.G. Eckert, A.J. Diaguila, Trans. A.S.M.E. 76, 497 (1954)67. A. von Kiss, I. Laitaj, G. Thury, Z. Anorg. Chem. 253, 346 (1937) 68. A. von Hammel, Z. Physik. Chem. 90, 121 (1915)

	Afmeting in mm	Verhouding
Hoogte vat	320	
Diameter vat D	224	D
Diameter roerder d	56	1/4 D = d
Asdikte roerder	5,28	
Afstand roerder-bodem van vat	112	1/2 D
Breedte roerderbladen	3.4	1/4 đ
Hoogte roerderbladen w	7	1/8 d
Hoogte vloeistofspiegel	224	D -
Breedte keerschotten	22,4	1/10 D
Dikte deksel	8,2	
Diameter deksel	272	
Dikte vatwand	5	

Tabel I - Afmetingen van het geroerde vat

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	T C		(rg/sec)	(kg/m)	μ _m /0
148	22,4	10	29,8	20,7	19,4	6,2.10-7	1,70	3,65
·	60,5	10	33,7	20,5	20,5	5,46	1,71	3,19
	88,9	10	35,6	20,5	20,1	5,18	1,71	3,03
	117.6	10	39,2	20,4	20,1	4,71	1,72	2,74
	155.5	5	21,6	20,3	20,1	4,27	1,72	2,48
198	8,9	10	25,5	20,3	18,7	7,29	1,72	4,23
-	35,8	10	25,5	20,1	18,6	7,26	1,72	4,22
	72,1	10	29,0	20,0	18,5	6,36	1,73	3,68
•	119,5	10	33,2	19,9	18,8	5,57	1,74	3,20
	149,3	10	36,6	19,8	18,7	5,05	1,74	2,90
	158,2	·10	38,5	19,7	18,8	4,81	1,75	2,75
	201, 9	5	22,7	19,5	18,7	4,07	1,76	2,3]
247	13,8	10	22,3	20,0	16,8	8,35	1,73	4,82
	53,3	10	24,4	19,9	17,6	7,47	1,74	4,29
	103,8	10	29,0	19,8	17,9	6,38	1,74	3,67
	152,3	5	17,4	19,3	17,9	5,34	1,77	3,02
	193,0	5	20,3	19,1	17,9	4,57	1,78	2,50
298	13,9	10	18,4	20,0	21,0	9,97	1,74	5,72
	48,9	10	21,2	20,0	21,8	8,63	1,74	4,98
	78,3	10	24,3	20,0	19,8	7,58	1,74	4,36
	107,5	10	27,7	20,2	19,3	6,66	1,73	3,85
356	7,6	10	17,6	20,5	20,7	10,45	1,70	6,1
•	42,9	10	20,3	20,5	21,0	9,06	1,70	5,33
•	71,4	10	23,4	20,6	21,0	7,84	1,70	4,50
	112,8	10	27,2	.20,6	21,2	6,76	1,70	3,99
	149,6	10	32,6	20,7	21,0	5,64	1,70	3,32
390	8,5	10	15,6	20,7	20,6	11,79	1,69	6,97
	67,6.	10	21,0	20,9	23,6	8,64	1,68	5,14
· .	105,9	10	25,8	21,2	23,8	7,04	1,67	4,23
	151,2	10	33,1	21,5	24,1	5,49	1,65	3,32
450	12,2	20	29,2	20,4	19,8	12,61	1,70	7,43
	38,8	10	17,7	20,3	19,5	10,43	1,71	6,10
	68,6	10	20,6	20,2	18,8	9,00	1,72	5,23
	95,9	10	24,0	20,1	18,7	7,73	1,73	4,46
505	13,0	20	26,0	19,9	17,2	14,30	1,74	8,22
	44,3	10	16,1	20,0	17,2	11,54	1,74	6,64
	74,6	10	19,2	20,0	17,9	9,67	1 , 74	5,50
	106,5	10	23,1	20,0	18,1	8,04	1,74	4,62
	}	1			170 7	6 70	7 17 1	ly or

n wate

-

Tabel II - Vervolg

	n (omw/mi	n) (nin)	Vol. (ml)	(sec)	Two Tgo	C Ø _m	$c_{\rm x} = c_{\rm x} = \beta_{\rm m}/c_{\rm x}$	1
	545	6.0	15	15.7	20.2.79	1 17 6510	- (Kg/m ⁻) -7 -1 -72 : 10:06	-7
		64.5	15	24.4	20.2 79.	5 17.35	172 6 60	τų ·
		77,7	10	18.4	20.2 20.	0 10.01	1.72	
		110,8	10	24.0	20.2 20.	0 7.67	1.72 1.1.16	
	an sea Maria	139,5	10	29,1	20.2 20.	0 6.33	1.72 3.68	
	595	5,1	15	14,5	20,5 20,0	0 19.05	1.70 11.21	
		28,9	15	17,7	20,5 20,0	0 15,60	1.70 9.17	
	·	92,8	10	18,9	20,6 20,	1 9,74	1.70 5.72	-
	•	124,2	10	24,7	20,6 20,:	L 7,46	1.70 4.38	
		156,4	10	31,8	20,6 20,2	2 5,79	1,70 3,40	
-			· ·					
	Tabel	III - Ve	rwerk	ing me	tingen aan	glycerol-v	ater-mengsels,	
		t e e	= 105	5 kg/m	3	2.12		
	n	Mom	Vol.	1 Tijd	TOTTO	11 × Ø	C digit	
	(omw/min) min) !	(ml)	. (sec)	W 81	(kg/sec)	$\left(\frac{x}{(kg/m^3)}\right)^{m'}$	
	200	13,8	5	26,8	20,0 19,9	3,44.15	7 1,34 2.56.10	-7
		46,1	5	27,0	20,0 20,7	3,40	1,34 2,54	
	a na mining	129,8	5	32,0	20,0 22,0	2,86	1,34 2,14	1
3.	250	10,7	5	, 22,8	20,0 20,0	4,04	1,34 3,02	
	an a	43,8	5	23,8	20,0 21,0	3,86	1,34 2,88	
		80,0	5	25,5	20,0 22,0	3,59	1,34 2,68	
		135,6	5	28,7	20,0 22,8	3,18	1,34 2,37	
	300	13,9	5	19,7	20,0 17,1	4,72	1,34 3,52	
		66,3	5	19,2	20,6 17,9	4,84	1,34 3,62	
		115,8	-5	20,9	20,1 18,2	4,44	1,34 3,32	. ^
<u> </u>		167,9	5	22,0	20,0 18,2	4,22	1,34 3,15	
1	350	9,6	5	17,1	20,0 20,7	5,37	1,34 4,01	
1		36,2	5	18,6	20,0 21,1	4,94	1,34 3,69	
	-	67,7	5	20,1	20,0 21,8	4,55	1,34 3,40	х
L		99,4	5	-21,2	20,0 22,0	4,32	1,34 3,23	
	420	: 18,2	5	15,7	20,0 20,1	5,87	1,34 4,37	
		57,8	5	17,7	20,0 19,7	5,21	1,34 3,89	
		104,7	5	19,8	20,0 19,8	4,66	1,34 3,48	
		151,6	5	22,0	20,0 20,1	4,19	1,34 3,13	
	450	, 12,8	5	16,4	20,0 18,9	5,64	1,34 4,21	
		44,0	5	16,3	20,0 19,6	5,66	1,34 4,22	
		78,5	5	17,1	20,0 20,2	5,39	1,34 4,02	
		149,6	5	21,6	20,0 20,8	4,26	1,34 3,18	
		181,8	5	22,7	20,0 20,8	4,05	1,34 3,03	
	·							

Tabel III - Vervolg

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Two C	Tec	Ø _m (kg/sec)	C _x (kg/m ³)	ø _m /c _x
500	12,3	5	14,1	20,0	19,0	6,56.10 ⁻⁷	1,34	4,90.10-7
	62,2	: 5	16,1	20,0	19,9	5,72	1,34	4,26
	98,4	5	18,0	20,0	20,0	5,11	1,34	3,81
	131,7	5	20,3	20,0	20,2	4,54	1,34	3,39
550	7,2	5	12,9	20,0	21,9	7,11	1,34	5,31
	39,2	5	13,9	20,0	21,9	6,59	1,34	4,92
	86,4	5	16,6	20,0	21,8	5,51	1,34	4,11
	113,7	: 5`	18,1	20,0	21,4	5,06	1,34	3,77
	150,2	5	20,5	20,0	21,3	4,64	1,34	3,46
600	9,2	:5	11,7	20,0	18,5	7,92	1,34	5,91
	34,3	:5	13,1	20,0	19,0	7,06	1,34	5,27
,	60,7	.5	14,3	20,0	19,2	6,47	1,34	4,83
	95,9	5	16,4	20,0	19,6	5,62	1,34	4,19
$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}$	128,3	5	17,8	20,0	20,1	5,16	1,34	3, 85

Tabel IV - Verwerking metingen aan glycerol-water-mengsels, $Q = 1084 \text{ kg/m}^3$

n (omw/min)	Mom (Min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	TwoC	Tgoc	Ø _m (kg/sec)	C _x (kg/m³)	Ø _m /C _x
450	13,4	5	23,7	20,0	20,2	3,88.107	1,18	3,28
	. 62,8	5	26,4	20,0	20,9	3,48	1,18	2,95
	157,4	· 5	31,9	20,0	21,1	2,89	1,18	2,53
500	. 9,0	5	22,1	20,0	20,8	4,17	1,18	3,53
	41,8	.5	23,5	20,0	20,6	3,92	1,18	3,32
	84,7	.5	26,5	20,0	20,8	3,48	1,18	2,95
	133,4	.5	30,2	20,0	20,8	3,05	1,18	2,58
550	14,8	5.	20,8	20,0	20,2	4,43	1,18	3,75
	81,8	.5	22,2	20,0	20,3	4,15	1,18	3,52
	142,9	- 5	26,3	20,0	20,2	3,50	1,18	2,97
600	11,0	5	19,4	20,0	21,2	4,73	1,18	4,01
	46,7	5	20,5	20,0	21,6	4,46	1,18	3,78
	100,6	5	24,9	20,0	21,8	3,68	1,18	3,12
	134,6	5	27,5	20,0	22,0	3,33	1,18	2,82
			a de la companya de la					

Tabel V - Verwerking proefmetingen aan glycerol-watermengsels

(kg/m3)	n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Two	Tgoc	Ø _m (kg/sec)	O _x (kg/m)	ø _m /c _x
1099	605	10,2	5	23,2	20,9	21,1	3,95.107	1,10	3,59.107
		46,0	5	24,5	20,9	21,5	3,74	1,10	3,40
		94,1	5	27,4	20,9	20,8	3,36	1,10	3,05
		129,8	5	29,1	20,9	20,2	3,17	1,10	2,88
1093	650	10,7	5	21,2	20,2	17,7	4,38	1,13	3,88
		49,0	5	22,4	20,0	18,1	4,14	1,13	3,66
		84,0	5	23,8	20,0	19,2	3,88	1,13	3,44
• •		120,4	5	26,4	20,0	20,9	3,48	1,13	3,08
1092	550	10,8	- 5	23,4	20,0	18,9	3,95	1,13	3,49
ų		61,9	5	25,6	20,0	20,7	3,59	1,13	3 , 18
,		98,6	5	26,6	20,0	20,6	3,46	1,13	3,06
		128,2	5	27,6	20,0	20,2	3,34	1,13	2,96
1089	504	7,2	5	23,4	20,0	19,6	3,94	1,14	3,46
٩		42,3	5	23,8	20,0	19,7	3,88	1,14	3,40
	e.	85,0	5	25,5	20,0	19,4	3,62	1,14	3,18
i		120,7	5	28,2	20,0	19,5	3,27	1,14	2,87

Tabel VI - Verwerking metingen aan Teepol-oplossingen: 0,0028 %

		1	1					
n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	TwoC	TgoC	Ø _m (kg/sec)	C _x (kg/m ⁷)	ø _m /c _x
205	5,5	5	11,7	20,1	19,8	7,87.1047	l,73	4,55.0-7
	36,4	5	13,1	20,1	20,2	7,06	1,73	4,08
· · ·	69,9	5	14,4	20,1	21,1	6,38	1,73	3,69
	99,7	5	15,9	20,1	21,9	5,76	1,73	3,33
250	8,6	5	10,5	20,1	22,1	8,71	1,73	5,04
	33,2	5	11,4	20,2	22,1	8,03	1,72	4,66
7	71,1	5	13,3	20,3	22,2	6,88	1,72	4,00
н н -	121,3	5	14,6	20,4	22,6	6,25	l,72	3,63
300	10,8	10	18,2	20,6	19,0	10,18	1,70	5,98
	44,7	10	19,8	20,4	19,4	9,32	1,71	5,45
· · ·	84,7	5	18,2	20,2	20,2	7,56	1,72	4,39
	108,0	5	12,8	20,2	20,3	7,21	1,72	4,19
	146,4	5	15,9	20,2	21,2	5,78	1,72	3,36
365	6,3	10	16,3	20,0	26,0	11,09	1,73	6,41
;	41,8	10	18,1	20,3	25,7	9,98	1,72	5,79
	75,7	10	21,8	20,9	25,5	8,29	1,68	4,93
	96,5	5	12,7	21,1	25,1	7,11	1,67	4,26
N								

Tabel VI - Vervolg

					·····		1	
n (omw/min)	Mom (nin)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Two	Tg°C	Ø _m (kg/sec)	C _x ⟨kg/m³⟩	Ø _m /C _x
400	7,6	10	14,6	20,6	25,1	12,40107	1,70	7,30107
,	34,0	10	17,4	20,6	25,8	10,38	1,70	6,10
	74,1	10	21,5	21,2	26, P	8,40	1,68	5,00
	96,5	10	24,1	21,6	25,9	7,49	1,65	4,54
450	6,6	10	13,0	20,2	22,8	14,05	1,72	8,16
	37.8	10	15,7	20,2	22,9	11,61	1,72	6,76
	68.7	10	18,4	20,3	22,9	9,91	l,72	5,76
	101.3	10	22,5	20,3	23,0	8,11	1,72	4,71
500	12.1	10	12,5	20,4	19,8	14,78	1,72	8,59
	37.2	10	14,6	20,4	20,0	12,61	1,72	7,34
	73.3	5	9,3	20,4	20,2	9,90	1,72	5,75
a the second sec	102.2	5	10,5	20,4	20,9	8,76	1,72	5,09
550	5,1	10	11,1	20,6	22,8	16,51	1,70	9,72
	41.2	10	14,2	20,7	21,9	12,89	1,69	7,62
e .	83.7	10	17,8	20,8	22,0	10,29	1,68	6,12
	126,7	5	12,6	20,9	22,1	7,26	1,68	4,32
1	1	1		1		A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR O		•

Tabel VII - Verwerking metingen aan Teepol-oplossingen: 0,011%

Tance Ire	, , , , ,		U,	· ·				e
n (omw/min)	Mom (MIN)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Two	Tgoo	Ø _m (kg/sec)	C_{x} (kg/m ³)	ø _m /c _x
200	8.6	5	12,2	20,6	18,9	7,59.10-7	1,70	4,4610-7
200	34,4	5	13,1	20,6	18,8	7,06	1,70	4,15
	55,4	5	13,9	20,4	18,4	6,67	1,71	3,90
	82.1	5	14,7	20,2	18,3	6,31	1,72	3,67
250	6,6	5	11,2	20,6	20,4	8,23	1,70	4,84
	32,7	5	11,4	20,7	20,2	8,09	1,69	4,79
	79,7	5	13,1	20,7	19,7	7,04	1,69	4,16
	101,3	5	14,1	20,4	19,2	6,56	1,71	3,84
300	15,8	10	19,2	20,2	19,2	9,62	1,72	5,60 .
	53,7	5	11,4	20,1	19,9	8,08	1,73	4,68
•	97,2	5	13,8	20,0	20,5	6,67	1,73	3,85
	126,8	5	15,7	20,0	20,4	5,87	1,73	3,39
350	3,3	5	8,4	20,6	19,1	11,00	1,70	6,46
	26,4	5	9,1	20,5	19,1	10,18	1,70	5,98
	46,7	5	10,3	20,5	19,4	8,97	1,70	5,27
	64,2	5.	11,1	20,5	19,8	8,30	1,70	4,89
			`			<u> </u>	L	ų

Tabel VII - Vervolg

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Twoc	Tgoc	Ø _m (kg/sec)	C _x (kg/m ³)	Ø _m /C _x
400	9,6	IO	14,3	20,2	22,3	12,8010-7	1,72	7,43.D-7
	31,3	10	16,9	20,2	22,9	10,80	1,72	6,28
4	64,1	10	19,7	20,6	23,1	9,28	1,70	5,46
	99,9	10	21,9	20,8	23,4	8,33	1,69	4,93
450	4,9	10	13,5	20,5	19,9	13,65	1,70	8,04
	27,8	10	15,1	20,5	20,1	12,21	1,70	7,19
· .	50,7	10	17,2	20,4	20,1	10,71	1,71	6,26
, · ·	65,9	10	19,0	20,4	20,1	9,70	1,71	5,67
500	4,7	10	12,1	20,1	19,4	15,30	1,73	.8,84
	36,1	10	14,8	20,1	20,1	12,44	1,73	7,19
	82,4	10	19,2	20,1	20,9	9,56	1,73	5,53
	128,2	10	23,1	20,1	21,8	7,93	1,73	4,58
600	3,4	10	10,4	20,1	17,4	17,90	1,73	10,35
e An an an	32,1	10	13,3	20,1	18,0	13,95	1,73	8,05
	66,6	10	16,6	20,1	18,8	11,14	1,73	6,44
	103,9	10	21,0	20,0	18,9	8,81	1,73	5,10

Tabel VIII - Verwerking meting aan Teepol-oplossing: 0,034%

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	T_oC	Tg°C	Ø _m (kg/sæ) .10 ⁷	° _x (kg∕m³)	Ø _m /C .107 ^x
600	5,3	10	10,8	20,7	19,9	17,08	1,69	10,10
	25,7	10	12,5	20,7	20,0	14,75	1,69	8,73
	40,7	10	13,7	20,7	20,2	13 , 48	1,69	7,96
	4		•		1	J	i	

1

Tabel IX

,

÷

				ugle stepper automa and a second s			anti tartan dara kambula da sini da katati	urne finelike star sugar parta stirker
	No	n	Two	KAh	KA t-0	K.	P	m
		V OIAW/ MILI	/	(m ³ /sec)	(m ³ sec)	(m/sec)	(\log/m^3)	(Nseć,
	1	148	20,5	4,09.10-7	3,80.10-7	9,65.10-6	998	0,993
	2	198	19,9	4,44	4,45	11,27	998	1.007
	3	247	19,6	5,10	4,96	12,94	998	1,015
	4	298	20,0	6,29	6,10	15,46	998	1,005
	5	356	20,6	6,21	6,40	16,22	998	0,991
	б	390	21,2	7,66	7,25	18,40	998	0.977
	7	450	20,3	8,10	8,00	20,30	998	0.997
	8	505	20,0	8,98	8,90	22,60	998	1.005
	9	545	20,2	10,93	10,30	26,15	998	1,000
	10	1595	20,6	11,61	11,70	29,70	998	0,991
					•	· ·		
	11	200	20,0	2,36	2,70	6,85	1055	1,50
	12	250	20,0	2,74	3,11	7,90	1055	
	13	300	20,0	1,99	3,90	9,90	1055	
	14	350	20,0	3,66	4,11	10,41	1055	
	15	420	20,0	2,80	4,52	11,50	1055	· · · · ·
	16	450	20,0	3,57	4,64	11,79	1055	м. М
	17	500	20,0	4,64	5,11	12,96	1055	
.	18	550	20,0	4,56	5,50	13,96	1055	
	19	600	20,0	5,20	6,09	15,45	1055	1,50
								•
ł	20	450	20,0	2,52	3,33	8,45	1084	2,55
	21	500	20,0	3,98	3,70	9,39	1034	-
ć	22	550	20,0	3,40	4,19	10,62	1084	
2	23 -	600	20,0	4,88	4,41	11,19	1084	2,55
		-						-
2	24	605	20,9	2,78	3,69	9,36	1099	3,50
2	25	650	20,0	2,71	3,98	10,10	1093	3,08
2	26	550	20,0	1,98	3,51	8,91	1092	3,00
2	7	504	20,0	1,85	3,46	8,78	1089	2,81
		1		1	1	4	1	

.: ••

	· •						
						ni Director Martinezzaria	
³)	(Nsec/m ²)	γ (m ² /sec)	(m ² /sec)	nd ² V	Ktot. D ² . Y ² .	$\frac{K-tot}{2/3}$	
	0,993.10-3	1,005.10-6	15,42.1010	0,77.104	2,46.102	7,22,102	1.71.10
	1,007	1,026	15,19	1,01	2,88	8,45	1,74
	1,015	1,032	15,08	1,25	3,28	9,72	1,75
	1,005	1,020	15,20	1,53	3,92	11,65	1.74
	0,991	1,000	15,47	1,86	4,14	12,11 .	1,70
	0,977	0,980	15,72	2,08	4,69	13,70	1,67
	0,997	1,010	15,34	2,32	5,15	15,21	1,72
	1,005	1,020	15,20	2,59	5,74	17,00	1.74
	1,000	1,015	15,30	2,81	6,63	19,52	1.72
	0,991	1,000	15,47	3,11	7,56	22,20	1.70
	1,50	1,421	11,96	0,74	1,66	5,32	12,27
				0,92	1,92	6,26	
				1,11	2,40	7.85	
				1,29	2,53	8,22	
				1,55	2,79	9,10	
				1,66	2,86	9,34	
		and and an and a second s		1,85	3,14	10,26	
				2,03	3,39	11,02	
	1,50	1,421	11,96	2,21	3,74	12,21	1.27
	2,55	2,350	8,70	1,00	1,86	6,98	1.09
				1,11	2,08	7,75	- 2 2
				1,22	2,36	8,74	
	2,55	2,350	8,70	1,34	2,47	9,24	1.09
						,	
	3,50	3,18	7,17	1,00	1,97	7,96	1.00
	3.08	2,82	7,93	1,20	2,13	8,35	1.03
	3.00	2.74	7.91	3.,01	1,91	7,43	1.03
	2.81	2,58	8.19	302	1,91	7,34	1.05
			!				
	3						
					· .	, 	
					n Marija	Active and the second s	
	· · ·						
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		•				
			• .			:	

t. , 1/3		2 V	Gr	Se	(K _{v.c.})	Ktot/(Kv.c.)o	K _{tot} -
2	1.71.10-3	1,01.10-12	18,7.107	0,651.103	5,76.10-6	1,67	0,5
	1.74	1,05	18,3	0,676	5,50	2,04	0,4
	1.75	1,06	18,2	0,685	5,50	2,35	0,3
	1,74	1.04	18,5	0,671	5,60	2,76	0,3
	1,70	1,00	18,8	0,646	5,77	2,81	0,2
	1,67	0,96	19,2	0,623	5,82	3,16	0,2
	1,72	1,02	18,6	0,653	5,67	3,58	0,1
	1,74	1,04	18,5	0,671	5,60	4,03	0,1
	1,72	1,03	18,5	0,663	5,60	4,67	0,0
	1,70	1,00	18,3	0,647	5,77	5,15	0,0
	1,27	2,02	5,95	1,19	3,92	1,75	0,5
						2,01	0,4
					e e e	2,52	0,3
						2,66	0,3
						2,93	0,2
						3,0L	0,2
						3,31	0,2
						3,05	U.L
	1,27	2,02	6,95	1,19	3,92	3,94	0gL
					- - - -	7 06	
	3,09	5,51	2,18	2,70	2,59	2,20	0,2
, ·						2,02	U, L
					0 50	4,20	. U., I
	1,09	5,51	2,18	2,70	2,99	4971	U ; 1
			7 00	a aa[]	0.00	1 68	
	1,00	10,1	1,09	4,44 -	2,000	4,00	0,0
	1,05	7,95	1,42	2,201日	2.23	4,00	
	1,03	7,50	1,52	29,40 '	2.38	3,69	
	1,05	6,68	1,14	2,12 L			
,				<u>, </u>			

		.4 +-	1	•		set in Stelle ∙ J.
)	Ktot/(Kv.c.)	Ktot-Kturb	Kturb (Kv.c.)o	K _{turb}	$\frac{k_{turb}}{p^{1/2} \sqrt{1/2}}$	K _{turb} D ^{2/3} v ^{1/3}
1.0-6	1,67	0,580	1,09	6,28.10-6	1,60.102 200	$4,71.10^2$ %
•	2,04	0,498	1,56	8,59	2,16 12,1	6,45 36.2
	2,35	0,395	1,95	10,72	2,72 15,2	8,05 45.1
	2,76	0,300	2,46	13,80	3,50 19,6	10,40 583
	2,81	0,287	2,52	14,53	3,72 20,8	10,83 61,0
	3,16	0,228	2,93	17,08	4,35 24.4	12,70 71.1
	3,58	0,170	3,41	19,35	4,91 27,5	14,50 81,3
	4,03	0,123	3,91	21,90	5,56 31.2	16,49 92,5
	4,67	0,085	4,58	25,65	6,52 36.6	19,20 107,5
•	5,15	0,057	5,09	29,40	7,49 1/22,00	22,00 /23
	1,75	0.590	1,16	4.54	1.10 612	3,52 19.7
	2,01	0,490	1,52	5,95	1,45 8,1	4,72 26,5
	2,52	0,350	2,17	8,50	2,06 11,5	6,74 37.7
	2,66	0,320	2,34	9,16	2,23 12.5	7,24 405
	2,93	0,262	2,67	10,46	2,54 112	8,26 46,3
•	3,01	0,250	2,76	10,81	2,62 147	8,55 40.0
	3,31	0,202	3,11	12,20	2,96 16.6	9,66 54,2
	3,65	0,171	3,39	13,30	3,23 18.1	10,51 12.9
	3,94	0,132	3,81	14,94	3,62 20,3	11,81 66.1
	3.26	0.010	3 05	7 00	л <i>т</i> л <i>ф</i> 08	6 57 365
	3.60	0,210	2,00 7 15	1,90	1,14 4/9,0	7 37 112
	1.30	0,105	2,42	0,94	2 20 /11	8 16 100
	4.37	0,100	1 01	10,90	2,29 100	8 99 10 11
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	0 ; 102	4961	TO'02	2,40 / 111	, U , <u>J</u>
	4,68	0,085	4,59	9,18	1,93 10.8	7,80 43.7
	4,63	0,086	4,54	9,90	2,09 11.7	8,19 45.8
	4,00	0,125	3,87	8,63	1,85 10.4	7,19 403
	3,69	0,158	3,53	8,42	1,83 /0,2	7.04 39.9
				•		

No	K _{t=0} (m/acc)	(omw/min)	T.M. G	(m^2/sec)	nd V
28 29 30 31 32 33 34 35	11,71.10 ⁻⁶ 13,16 15,85 17,78 19,05 21,70 22,90 25,65	205 250 300 365 400 450 500 550	20,1 20,2 20,3 20,5 21,0 20,3 20,4 20,7	0,988.10 ⁻⁶ 0,991 0,995 1,002 0,984 0,995 0,998 1,009	1,09.10 ⁴ 1,32 1,58 1,91 2,13 2,37 2,62 2,85
36 37 38 39 40 41 42 43	11,45 13,21 15,25 16,85 19,55 20,81 22,99 25,41	200 250 300 350 400 450 500 600	20,5 20,6 20,1 20,5 20,5 20,5 20,1 20,1	1,002 1,006 0,988 1,002 1,002 1,002 1,002 0,988 0,988	1,05 1,30 1,59 1,83 2,09 2,34 2,65 3,18
44	27,20	600	20,7	1,009	3,11

<u>Tabel X</u> - Berekeningen overdrachtscoëfficient als functie van Re voor Teepol-oplossingen.

D

D







10 Deelstrepen is 15 m.m.

Druk N.V. "Mercurius" W'veer



10 Deelstrepen is 15 m.m.

Druk N.V. "Mercurius". W'veer.



BILKY MERCURIVES WYSER No. 1470



Druk N.V. "Mercurius", W'vher.







Arolin / 10: Fip. Techardopi

Absorptie van CO₂ <u>in het oppervlak van een</u> geroerde vloeistof

> E. van Veen, 7 Lab. voor Phys. Techn. . Delft

24 Juni 1957

<u>t n n o n n</u>

Hoofdstuk I - Samenvatting	blz	. 1
Hoofdstuk II - Inleiding	blg	. 2
II-1. Factoren die de stofoverdrachtscoëfficient		
beïnvloeden	blz	2
II-lele Inleiding	blz	2
II-1.2. Dimensionele beschouwingen	blg	lui l
II-1.3. Invloed van oppervlakte-vergreting	blz	4
II-1.4. Invloed van de hydrodynamische omstandig-		
heden	blz	5
11-1.5. Invloed van de diffusiecoëfficient	blg	7
II-2. Modellen voor de hydrodynamische omstandig-		
heden en de invloed van de diffusiecoëffi-		
cient	blz	7
11-2.1. Flimtheorie	blz	7
11-2.2. Fenetratie-theorie	blz	8
11-3. Bespreking van metingen uit de literatuur	blz	11
Hoofdstuk III - Experimenteel gedeelte	blz	13
III-1. Algemene bespreking	blz	13
III-1.1. Inleiding	blz	13
III-1.2. Meetapparatuur	blz	13
III-1.3. Meettechniek	blz	14
III-1.4. Berekening van de overdrachtscoëfficient	blz	15
III-2. Discussie metingen en resultaten	blz	16
III-2.1. Metingen ann water	blz	16
111-2.2. Metingen aan glycerol-water-mengsels	bl.z	18
111-2.3. Metingen aan Teepol-oplossingen	blz	19
Roofdstuk IV - Verwerking der resultaten	blz	21
IV-1. Invloed van de viscositeit	bls	21
IV-2. Invloed van de vrije convectie	blz	22
IV-3. Invloed van een oppervlakte-actieve atof		
(feepol)	blz	24
IV-4. Vergelijking van resultaten met andere me-		
tingen	blz	25
Hoofdstuk V - Conclusies	blz	27
Appendix I	blz	28
Appendix II	blz	30

Overzicht der gebruikte symbolenblz 35Literatuur-overzichtblz 37

• .

Tabellen en grafieken zijn zonder pagina-nummering achter in het verslag opgenomen.

Hoofdstuk I - Samenvatting

Onderzocht werd de absorptiesnelheid van zuiver CO₂ in vloeistoffen in een geroerd vat van bepaalde dimensies. Nagegaan werd de invloed van het toerental van de roerder. de viscositeit van de vloeistof en de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof op de overdrachtscoëfficient.

De gemeten stofoverdrachtscoëfficienten werden zo goed mogelijk gecorrigeerd voor vrije convectie. Uit de aldus gecorrigeerde gegevens werd getracht uitsluitsel te krijgen betreffende de toepasbaarheid van de grenslaagtheorie of de penetratie-theorie op gasabsorptie in geroerde oppervlakken. De resultaten maakten het bestaan van een laminaire grenslaag aan het oppervlak aannemelijker.

De aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof bleek op de stofoverdrachtscoëfficient vrijwel geen invloed uit te oefenen.

Hoofdstuk II- Inleiding

II-1. Factoren die de stofoverdrachtscoëfficient beïnvloeden.

II-1.1. Inleiding

In het algemeen wordt gasabsorptie onderscheiden in physische en chemische gasabsorptie. Onder physische absorptie wordt verstaan de absorptie van een gas in een vloeistof welke geen ten opzichte van het geabsorbeerde gas chemisch reactieve bestanddelen bevat, terwijl dit bij chemische absorptie wel het geval is. Een discussie over de chemische absorptie zal, als niet ter zake doende, hier vrijwel buiten beschouwing blijven.

De snelheid van de gasabsorptie, welke optreedt doordat in de vloeistof een gasconcentratie heerst die kleiner is dan de verzadigingsconcentratie die overeenkomt met de druk die boven de vloeistof heerst, kan men in het algemeen voorstellen door:

$$\mathscr{D}_{m}^{\mathsf{H}} = \mathsf{K} \left(\mathsf{pH} - \mathsf{C}_{\mathsf{O}} \right) \tag{1}$$

waarin β_m'' de absorptiesnelheid per eenheid van oppervlakte (kg/m²sec), p de partiaaldruk van het gas (N/m²), H de constante uit de Wet van Henry (sec²/m⁴), C_o de gemiddelde gasconcentratie van de vloeistof (kg/m³) en K de totale stofoverdrachtscoëfficient (m/sec) voorstelt.

De totale overdrachts-coëfficient is samengesteld uit die voor de vloeistoffase K_L en die voor de gasfase K_G volgens:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{\rm L}} + \frac{H}{K_{\rm G}}$$
(2)

Veronderstellen we nu de weerstand in de gasfase verwaarloosbaar (hetgeen het geval is wanneer de overdrachtsweerstand voornamelijk in de vloeistoffase gelegen is), dan wordt $K = K_{T_{i}}$.

II-1.2. Dimensionele beschouwingen

Een oplossing van het probleem, door welke factoren Kr beinvloed wordt, is aan te geven door de gemeten gasabsorptiesnelheid te correleren met physische grootheden, die bij voorbaat al invloed uitoefenen op de absorptie (diffusiecoëfficient, oplosbaarheid); en met de hydrodynamische omstandigheden die dus le bepaald worden door physische grootheden (viscositeit en dichtheid van de vloeistof), 2e door de roersnelheid en ten 3e door de afmetingen van het vat. De grootheden die de invloed van deze hydrodynamische omstandigheden op de grootte van het oppervlak tegenwerken (versnelling van de zwaartekracht, oppervlaktespanning) kunnen er eveneens in betrokken worden. Via een dimensieanalyse kan men dan komen tot een verband tussen dimensieloze groepen, waarin eventuele factoren en exponenten gevonden kunnen worden door metingen waarbij men de verschillende grootheden achtereenvolgens varieert. Een dergelijk verband waarin de afhankelijkheid van K_{T.} van de omstandigheden tot uiting komt is b.v.

Sh = f (Re; Sc; Fr; We;
$$\frac{d}{D}$$
; $\frac{H}{D}$; $\frac{W}{D}$) (3)

Houdt men ook nog rekening met de vrije convectie die vooral bij lagere toerentallen nog op kan treden, dan krijgt men

Sh = f (Re; Gr; Sc; Fr; We;
$$\frac{d}{D}$$
; $\frac{H}{D}$; $\frac{W}{D}$) (4)

waarin

V D

Sh =
$$\frac{nLD}{D}$$
; de dimensieloze groep waarin de
afhankelijke grootheid is opgeno-
men.
Re = $\frac{nd^2}{\sqrt{2}}$; waarin de invloed van de strominge
toestand naar voren komt.
Gr = $\frac{GD^3gAC}{D^2}$; waarin de vrije convectie is ver-

 $Fr = \frac{g}{n^2 d} \quad en \ We = \frac{n^2 d^3 q}{q}; \ de \ groepen \ die \ betrekking \ heb$ $ben \ op \ de \ vergroting \ van \ het \ op-$

pervlak tengevolge van golfvorming; respectievelijk door overwinning van de zwaartekracht en door overwinning van de oppervlaktespanning.

 $Sc = \frac{V}{D}$; waarin de physische eigenschappen van de vloeistof tot uiting komen,

terwijl

 $\frac{d}{D}$, $\frac{H}{D}$ en $\frac{W}{D}$ dimensieloos de invloed van de diameter van de roerder, de hoogte van de vloeistof en de breed-

te van de roerder weergeven. De betekenis der gebruikte symbolen zijn achter in het verslag opgenomen.

Schrijven we dit functionele verband nu b.v. in productvorm (er zijn uiteraard vele andere mogelijkheden), dan zal men op de aangegeven manier de exponenten der diverse groeperingen kunnen vinden. Het spreekt evenwel vanzelf dat deze methode zonder meer geen oplossing biedt voor het probleem: wat gebeurt er aan het oppervlak en hoe en waarom vloeit de grootte van de overdrachtscoëfficient hieruit voort?

De diverse factoren, welke invloed uitoefenen op de stofoverdrachtscoëfficient zullen hieronder nader besproken worden.

II-1.3. Invloed oppervlakte-vergroting

Vergroting van het vloeistofoppervlak kan plaats vinden door golfvorming en bij zeer hoge toerentallen door kolkvorming. Vooral het laatste verschijnsel moet bij dit onderzoek vermeden worden, daar er grote kans bestaat, dat het gas via de kolk in de vloeistof gezogen zal worden. Het eerstgenoemde verschijnsel zal men niet kunnen ontgaan, daar anders het bereik van het toerental te laag zou worden. Golfvorming treedt op zodra de roerder voldoende kinetische energie op kan brengen om de zwaartekracht (hetgeen tot uiting komt in het getal van Froude) en/of om de oppervlaktespanning, welke zich verzet tegen vergroting van het oppervlak, te overwinnen (tot uitdrukking gebracht in het getal van Weber). In het eerste geval spreekt men van zwaartekrachtsgolven, in het tweede geval van capillaire golven. Gewoonlijk treden beiden tegelijkertijd op. Om toch tot een onderscheiding te kunnen komen, noemt men in het algemeen golven met een golflengte kleiner dan 0,4 cm capillaire, die met een grotere golflengte zwaartekrachtsgolven, (1). De vergroting van het oppervlak tengevolge van golfvorming kan zeer groot zijn. Zo kan men voor een sinus-vormige golf volgens:

$$y = a \sin 2\pi \frac{x}{\ell}$$

waarvan de amplitudo a = 2 mm en de golflengte $\lambda = 10 \text{ mm}$, langs grafische weg berekenen dat er een oppervlakte-vergroting van ongeveer 30% kan optreden.

De invloed van de oppervlakte-vergroting op de overdrachtscoëfficient kan van tweeërlei aard zijn. Berekent men deze uit het product K_{L} .A, door het oppervlak van de vloeistof A gelijk te nemen aan dat bij een toerental n = 0, dan zal het gevolg hiervan zijn dat de berekende overdrachtscoëfficient groter is dan de werkelijke. Tevens is het zeer aannemelijk dat de stromingstoestand aan het oppervlak beïnvloed wordt door de golfvorming, zodat de overdrachtscoëfficient ook nog afzonderlijk afhankelijk van de oppervlaktevergroting wordt.

II-1.4. Invloed van de hydrodynamische omstandigheden.

Van de hydrodynamische omstandigheden en de plaatselijke stromingstoestanden in een geroerd vat is weinig bekend. Talloos is het aantal onderzoekingen waarin getracht werd dit probleem van verschillende zijden te benaderen. <u>Van der Vusse</u> (2) geeft hiervan een systhematisch overzicht dat hieronder, aangevuld, voor de volledigheid wordt opgenomen.

- a. Oplossnelheid van vaste stof in vloeistoffen (3,4,5).
 b. Snelheid van vloeistof-vloeistof-extractie in geroerde vaten (6).
- c. Snelheid van warmtetransport in geroerde vaten (7,8,9).

- d. Mengtijden voor twee mengbare vloeistoffen (10,11,12,13, 2,14, 15, 16).
- e. Reactiesnelheden bij twee reagerende vloeistoffen (17, 18, 19).
- f. Uniformiteit van suspensies in geroerde vaten (20, 21, 22, 23).
- g. Pompcapaciteit van roerders (24,25). <u>Rushton en Oldshue</u> (26) voeren in dit verband ook de mogelijkheid aan, te komen tot een berekening van volumestromen in het vat uit de pompcapaciteit van de roerder, door vergelijking van deze roerder met een straalpomp. In verband hiermee kan ook vergelijking met de resultaten van <u>Hinze</u> en van <u>Van der Hegge Zijnen</u> (27) betreffende warmte- en stoftransport in de mengzone van straalpompen interessant zijn.
- h. Krachtverbruik of benodigde vermogen van spaan- en turbineroerders (2, 28, 29, 30, 31, 32, 33).
- i. Pigmentabsorptie aan suspensies (34).
- j. Corrosie van vloeistoffen op metaaloppervlakken (35,36).

Zeer verscheiden ook zijn de theorieën welke trachten een beter inzicht te verschaffen in schaal en intensiteit van de turbulentie. Een zeer goede inleiding in de stand van zaken in deze in 1936 biedt het boekje van <u>Bakhmeteff</u> (37), waarin de theorieën van <u>Prandtl</u> (38) en van <u>Von Kármán</u> (39) op dit gebied behandeld en vergeleken worden. Een meer modern overzicht geeft Batchelor (40). Na deze tijd kunnen als auteurs die zich met het probleem bezig gehouden hebben genoemd worden: Von Kármán (41,42), die een statistische theorie tracht op te stellen voor isotrope turbulentie en parallelle schuifbeweging; Taylor (43, 44, 45) en Dryden (46). Deze theorieën hebben evenwel alleen betrekking op het zuiver theoretische geval van isotrope turbulentie, of sluiten aan op metingen van snelheidsprofilen in buizen. Eerst recente literatuur (46) tracht betrekkingen af te leiden voor stroming langs rechte wanden. De kennis omtrent dit gebied reikt evenwel nog niet zover, dat er sprake kan zijn van toepassing op stromingsverschijnselen in geroerde vaten. Rushton (26) vermeldt in verband hiermee de eerste pogingen tot het meten van snelheidsfluctuaties in de nabijheid van de roerder.

II-1.5. Invloed van de diffusiecoëfficient

De invloed van de diffusiecoëfficient op de stofoverdrachtscoëfficient bij absorptieprocessen is in het algemeen bestudeerd door middel van dimensieloze correlaties. Beschouwen we vaten die geometrisch gelijkvormig zijn en laten we de invloed van de oppervlakte-vergroting buiten beschouwing, dan kunnen we, uitgaande van de algemeen geldende correlaties schrijven:

$$\mathrm{Sh} = \mathrm{C} \cdot \mathrm{Re}^{\mathrm{m}} \cdot \mathrm{Sc}^{\mathrm{n}}$$
 (5)

waarin n varieert van 0,3 tot 0,5.

II-2. Modellen voor de hydrodynamische omstandigheden en de invloed van de diffusiecoëfficient.

De theorieën welke zich bezig houden met een symbolisatie van het gebeuren aan het oppervlak en de invloed van de diffusiecoëfficient op de overdrachtscoëfficient zijn de volgende.

II-2.1. Filmtheorie

De filmtheorie van <u>Lewis</u> en <u>Whitman</u> (47,48) geeft als model het bestaan van een laminaire grenslaag aan het oppervlak van de turbulente vloeistof, waardoor slechts moleculaire diffusie optreedt. De uit deze conceptie voortvloeiende formulering van de overdrachtscoëfficient luidt:

$$K_{L} = \frac{ID}{\xi}$$
(6)

waarin D de diffusiecoëfficient en & de dikte van de laminaire laag voorstelt, terwijl & nog een functie van D kan zijn. In het algemeen geldt voor gevallen van stofoverdracht in het turbulente gebied: K_L ~ (D)^{0,6} à 0,7, zodat de waarde voor n in verg. (5) 0,3 à 0,4 wordt. Het is uiteraard twijfelachtig of het aannemen van deze conceptie alléén voldoende is om het gebeuren aan het oppervlak te omschrijven, daar het bestaan van een laminaire laag aan het vrije oppervlak van een turbulente vloeistof zeer onwaarschijnlijk is.
<u>Higbie</u> en <u>Danckwerts</u> passen de penetratie-theorie toe op het oppervlak van een geroerde vloeistof, waarbij zij aannemen dat aan het oppervlak een voortdurende verversing plaats vindt, waarbij brokken vloeistof gedurende een korte tijd aan het oppervlak verblijven, daar "opgeladen" worden tot een gasconcentratie, die afhankelijk van de diffusiecoëfficient D verloopt van de verzadigingsconcentratie C_x tot een lagere concentratie, daarna in de vloeistof verdwijnen en vervangen worden door brokken die de gemiddelde gasconcentratie van de vloeistof bezitten. Volgens de penetratie-theorie kan men uitgaande van een stofbalans in ééndimensionale (x-) richting

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = iD \quad \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{7}$$

(waarin 0 de contacttijd van de vloeistof met het gas voorstelt) met als randvoorwaarden

0	Aliceje Virtuaj	° _o	X	Y	0	0	Abitor Rénac	0
Ç	ellester thanks	C _x	X	Neutron Parte	0	Ģ	>	0
Ċ	Hones entrans	° _o	X	tubes Poise	\sim_{0}	0	>	0

voor een stilstaande vloeistof afleiden:

$$\beta_{\mathrm{m}}^{"} = (C_{\mathrm{x}} - C_{\mathrm{o}}) \sqrt{\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{m}\,\mathrm{o}}}$$
(8)

Voor de tijd dat de vloeistofbrokken aan de oppervlakte verblijven worden deze als stilstaand beschouwd. Hun opvattingen over de verblijftijden aan het oppervlak wijken uiteen. In het algemeen kan men daarvoor verschillende ouderdomsverdelingsfuncties aannemen, zoals weergegeven in onderstaande figuur, waarin de cumulatieve verdelingsfuncties zijn weergegeven, en waarin $F(\Theta)$ de fractie van het oppervlak voorstelt met een ouderdom kleiner dan of gelijk aan Θ .



9 m

De fractie van het oppervlak met een ouderdom tussen Q en Θ + d Θ is dan gelijk aan F'(Θ)d Θ , zodat indien we $C_{O} = 0$ veronderstellen in combinatie met verg. (8) geldt:

$$d\beta_{m}^{n} = F'(\Theta) d\Theta \cdot C_{x} \sqrt{\frac{D}{\pi \Theta}}$$

~

SI:

$$\overline{\mathscr{P}_{\mathrm{m}}^{H}} = \int F'(\Theta) \mathrm{d}\Theta \cdot C_{\mathrm{X}} \sqrt{\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{T}^{\Theta}}}$$
(9)

θ

Higbie (49) neemt nu aan dat elk vloeistofelement gedurende eenzelfde tijd 9 aan het oppervlak verblijft, hetgeen in bovenstaande figuur tot uitdrukking komt in curve 1, waarvoor de vergelijking geldt:

$$F(\Theta) = \Theta/\Theta_{\max} \tag{10}$$

zodat:

$$\overline{\mathcal{P}_{m}^{n}} = \int \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} c_{x} \sqrt{\frac{D}{\Pi}} \cdot \frac{d\Theta}{\sqrt{\Theta}} = 2 c_{x} \sqrt{\frac{D}{\Pi \cdot \Theta_{max}}}$$
(11)

on

$$K = 5 \sqrt{\frac{1}{D}}$$
(15)

Terwijl we voor de gemiddelde verblijftijd @ kunnen afleiden: \sim

of:

$$= \int \frac{\Theta d\Theta}{\Theta max} = \frac{1}{2} \Theta max$$

(13).

Danckwerts daarentegen neemt aan (50, 51) dat de kans dat een vloeistofelement verplaatst wordt onafhankelijk is van de tijd dat het reeds aan het oppervlak verblijft; hetgeen tot uiting komt in curve 2 van bovenstaande figuur, en die b.v. is voor te stellen door:

$$P(Q) = 1 - e^{-SQ}$$
 (14)

waarin s (1/sec) een parameter is. Hieruit valt af te leiden:

$$\mathbb{P}^{\prime}(\mathbb{Q}) = \mathbb{S}^{\mathbb{Q}}$$
(15)

zodat

dat
$$\overline{p_{m}} = \int se^{-s\Theta} \sigma_{x} \sqrt{\frac{D}{\pi \Theta}} d\Theta$$

Oplossing van deze integraal geeft:

$$\overline{\rho_{\rm m}^{\rm m}} = C_{\rm X} \sqrt{\rm Ds}$$
(16)

of

$$K = \sqrt{Ds}$$
(17)

Terwijl de gemiddelde verblijftijd 🗟 volgt uit

$$\overline{\Theta} = \left(\Theta \right) d\Theta = \left(\Theta \right) S e^{-S\Theta} d\Theta$$

geef

(18)

Een andere mogelijke ouderdomsverdeling wordt gegeven door curve 3, waarin dus tot uiting komt, dat een groot gedeelte van het oppervlak een kleine ouderdom, respectievelijk contacttijd heeft en een gering gedeelte een lange contacttijd. Omschrijven we deze curve met de functie:

$$F(\Theta) = 1 - \frac{1}{2} e^{-S} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} e^{-S} \frac{2}{2}$$
(19)

(waarin S1 en S2 (1/sec) weer parameters zijn), dan volgt

hieruit op volkomen analoge wijze voor de overdrachtscoëfficient:

$$K = \pm \sqrt{Ds_1} + \pm \sqrt{Ds_2}$$
 (20)

Terwijl

$$\overline{\Theta} = \frac{\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2}{2\mathbf{s}_1 \mathbf{s}_2} \tag{21}$$

Het spreekt vanzelf dat nog tal van dergelijke verdelingsfuncties te bedenken zijn. Een overzicht hiervan wordt b.v. gegeven door <u>Hanratty</u> (46).

Over de opvatting dat de kans op verversing inderdaad onafhankelijk is van de leeftijd van een oppervlakte-elementje kan gediscussieerd worden. Het ligt voor de hand dat bij een oppervlak van geroerde vloeistof, waarbij de roerder dus een constant werkende impulsbron is, vooral bij hogere toerentallen van de roerder een vrij constant stromingsbeeld zal ontstaan, waardoor zich over het oppervlak ook een vrij constante verdeling van de verversingsgraad zal instellen. Neemt men dan een over het oppervlak gemiddelde contacttijd resp. verversingsgraad aan, dan lijkt de conceptie van Higbie juist; terwijl aan de gedachtengang van Danckwerts slechts voldaan zou worden, indien er een verversing optrad zonder dat er een impuls-bron aanwezig zou zijn, die de verversing zou veroorzaken.

Afgezien hiervan blijkt evenwel uit de bovenstaande formuleringen van de overdrachtscoëfficient (vergn. 12, 17 en 20) dat uitgaande van de penetratie-theorie in het algemeen geldt: $K_L \sim \sqrt{D}$, zodat dus de waarde voor n in verg. (5) gelijk aan 0,5 wordt.

II-3. Bespreking van metingen uit de literatuur

Literatuurgegevens over gasabsorptie aan oppervlakken van een geroerde vloeistof zijn zeer schaars.

<u>Goodgame</u> en <u>Sherwood</u> (52) maten overdrachtscoëfficienten voor absorptie van CO₂-lucht; NH₃-lucht en aceton-lucht-mengsels in oppervlakken van geroerd water bij verschillende drukken en bewezen daarmee de additiviteit van de optredende overdrachtsweerstanden (in gas- en vloeistof-fase). Zij maten evenwel slechts bij 1 toerental van de roerder, terwijl bovendien het oppervlak van de vloeistof sterk verstoord werd door de aangebrachte apparatuur (thermometers enz).

Johnson en <u>Chen-Jung Huang</u> (5) stelden een correlatie op voor Sh als functie van Re en Sc voor het oplossen van vaste stoffen vanaf de bodem van een geroerd vat en maakten daarbij de toepasbaarheid van de penetratie-theorie aannemelijk. Daar een vergelijking van resultaten interessant leek, sal later hierop teruggekomen worden (IV-4). <u>Kishinevskiï</u> et al. (53, 54, 55, 56, 57, 58) verrichte metingen betreffende chemische absorptie in geroerde oppervlakken. Zijn resultaten zijn dubieus en zijn gegevens niet uitvoerig genoeg om vergelijking mogelijk te maken. Over een nadere definiering van de overdrachtscoëfficient leat hij zich niet uit. Zeer recent is zijn publicatie over absorptie van H₂ en N₂ aan gedestilleerd water (59), waarin hij verklaart dat zijn resultaten in overeenstemning zijn met zijn theorie (?).

- 12 -

Hoofdstuk III - Experimenteel Gedeelte

III-1. Algemene Bespreking

III-1.1. Inleiding

Voor de metingen van de gasabsorptie-snelheid in het oppervlak van een geroerde vloeistof werd als geabsorbeerd gas zuiver CO₂ gekozen, zodat er geen gasweerstand optrad en de overdrachtsweerstand bij de gebruikte systemen geheel aan de zijde van de vloeistof-fase lag. Gemeten werden overdrachtscoëfficienten voor water als functie van het toerental van de roerder. Om de invloed van de viscositeit op de overdrachtscoëfficienten na te gaan werden dezelfde metingen uitgevoerd bij

mengsels van water en glycerol.

Om de invloed van de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof, in dit geval Teepol, op de overdrachtscoëfficienten te bepalen, werd aan het gebruikte condenswater kleine hoeveelheden Teepol toegevoegd en de metingen als functie van het toerental herhaald.

III-1.2. Meetapparatuur

De aanvankelijke apparatuur bestond uit een vat waarin een zesbladige turbine-roerder geplaatst was. Om tot een zekere normalisatie te komen en om een eventuele correlatie met literatuurgegevens over mengtijden van twee mengbare vloeistoffen in geroerde vaten mogelijk te maken werden de afmetingen van vat en roerder gekozen in verhoudingen die in overeenstemming waren met die van de door <u>Kramers</u>, <u>Knoll</u> en <u>Baars</u> gebruikte apparatuur (13). De afmetingen zijn weergegeven in Tabel I.

In het vat waren vier keerschotten geplaatst om ronddraaien van de vloeistof en voortijdige kolkvorming te voorkomen. Zij waren van een zodanige lengte, dat zij 3 cm onder het vloeistofoppervlak stonden, om "dode hoeken" in het oppervlak te vermijden. De doorgang van de as van de roerder door het deksel van het vat was afgesloten met een kwikslot. De roerder werd voortbewogen door een motor met mechanische variator. Het toerental van de roerder werd gemeten met een stroboscoop, en vertoonde gedurende een proefneming een maximale afwijking van 2%. Het 98%-ige CO₂-gas werd uit een bombe via een stromingsfluctuatie-demper, een verzadiger en een afsluiter door het deksel boven in het vat geleid. Na de eerste metingen werd een vacuumvat voor de ontluchting van het water met een voorverwarmingselement aangebracht, terwijl, toen het onmogelijk bleek bij lage kamertemperaturen de temperatuur in het vat constant te houden, door de bodem een verwarmingselement van kantaaldraad, geïsoleerd door een glazen buisje, gevoerd werd. Teneinde de gasabsorptie-snelheid met behulp van de zeepbellen-methode te kunnen meten, was direct achter het vat een meetburet geschakeld. De uiteindelijke apparatuur is weergegeven in fig. I.

III-1.3. Meettechniek

Bij de eerste metingen aan water werd het vat gevuld door van te voren op temperatuur gebracht condenswater onmiddellijk in het vat te gieten tot op de gewenste hoogte (gelijk aan de diameter van het vat). De resultaten van de gedane metingen weken sterk uiteen doordat

- a. Een dubieuze correctie aangebracht moest worden voor de tijd waarin de lucht in het vat door CO₂ verdreven werd, en gedurende welke tijd dus al CO₂ door het water geabsorbeerd werd.
- b. Het condenswater niet ontlucht was en er dus gedurende de experimenten lucht uit het water ontweek en een dun laagje boven het oppervlak ontstond, waardoor de overdrachtsweerstand groter werd.

In de buurt van een toerental van de roerder gelijk aan 300 omw./min werd evenwel reeds een sterke afwijking van het normale verloop van de overdrachtscoëfficient als functie van het toerental waargenomen.

Bij de volgende metingen werd het water en daarna ook de andere gebruikte oplossingen eerst ontlucht in een vacuumvat, daarna via een voorverwarmer in het vat geleid, dat tot het deksel toe gevuld werd. Daarna pas werd de juiste hoogte van de waterspiegel ingesteld, onder toevoer van CO₂, hetgeen mogelijk was door het sluiten van kraan B. Naderhand werd om reeds bovenvermelde redenen in het vat een

- 14 -

verwarmingselement aangebracht.

Het bepalen van de overdrachtscoëfficienten als functie van het toerental werd gedaan door voor een aantal toerentallen, welke ongeveer 50 omw./min uiteen lagen, het verloop van de gasabsorptie-snelheid met de tijd te meten. Daartoe werd deze snelheid met behulp van de zeepbellenmethode bepaald door op verschillende tijdstippen 5 à 10 maal achtereen de tijd te meten welke nodig was voor het absorberen van een bepaald volume. Om het zwaartepunt van de zo verkregen puntengroeperingen te bepalen werd voor de kleine tijdsintervallen waarbinnen de punten zich bevonden de regressieve afname van absorptiesnelheid (volgens een e-macht) voorgesteld als een evenredige afname, zodat het mogelijk was van de gemeten absorptietijden in plaats van het geometrische het rekenkundige gemiddelde te nemen. Uit een controle bleek dat het geometrische en het rekenkundige gemiddelde van de gegroepeerde waarnemingen niet meer dan 0,5% verschilden, zodat, vooral met het oog op de verder te volgen berekeningen, deze benadering alleszins verantwoord was.

Van de momenten waarop de metingen plaats vonden werd uiteraard eveneens het rekenkundig gemiddelde genomen.

De temperatuur van het gas in de meetburet werd gemeten met een thermometer welke vlak voor de meetburet geplaatst was. Uit het gegeven dat de dichtheid van CO_2 bij O^OC en 760 mm 1,9769 g/l is, kom met behulp van de gemeten temperaturen de absorptiesnelheid op eenvoudige wijze berekend worden. (Daar p'_m/C_x onafhankelijk is van de druk werd geen rekening gehouden met variaties in de barometerstand). De temperatuur van het water werd afgelezen met behulp van

een thermometer, welke in het vat achter een keerschot geplaatst was om verstoring van het stromingsbeeld zoveel mogelijk te voorkomen.

III-1.4. Berekening van de overdrachtscoëfficient

Het uitwerken van de metingen en het berekenen van de overdrachtscoëfficienten geschiedde op grond van de volgende beschouwing. Voor de absorptiesnelheid op een moment t, waarop in de vloeistof een gasconcentratie C heerst moet gelden:

waarin V het volume van de vloeistof en $\frac{dC}{dt}$ de concentratieverandering per tijdseenheid voorstelt. Oplossing van deze differentiaalvergelijking geeft:

$$\frac{C_{x}-C}{C_{x}} = e^{-\frac{KA}{V}} \cdot t$$
 (23)

zodat:

of:

$$\log \phi_{\rm m}/C_{\rm x} = \log \mathrm{KA} - \frac{\mathrm{KA}}{\mathrm{V}} \cdot \mathrm{t} \log \mathrm{e}$$
 (25)

Hieruit blijkt dus dat log \emptyset_m/C_x tegen t uitgezet een rechte lijn zal moeten geven, waarvan de helling een maat is voor KA (in het vervolg KA_h genoemd), terwijl extrapolatie naar t = 0 een waarde voor KA geeft (KA_{t=0}) welke gelijk is aan de daarbij gevonden \emptyset_m/C_x .

Principieel zullen de op deze wijze gevonden twee waarden voor KA, resp. K, aan elkaar gelijk moeten zijn.

III-2. Discussie metingen en resultaten

Gasabsorptiesnelheden werden gemeten op de bovenbeschreven wijze bij water, glycerol-water-mengsels en zeer verdunde oplossingen van Teepol. Een en ander zal hieronder nader besproken worden.

III-2.1. Metingen aan water

De metingen werden gedaan aan ontlucht condenswater bij een temperatuur van ongeveer 20° C.

De gemiddelden van de metingen en de daaruit voortvloeiende waarden van p'_m/c_x zijn weergegeven in Tabel II. De oplosbaarheid van CO_2 in water werd uit literatuurgegevens verkregen (60). Uit grafieken waarin log p'_m/c_x tegen de tijd werd uitgezet werden KA_{t=0} en KA_h bepaald.

 $K_{t=0}$ en K_h werden hieruit berekend onder de veronderstelling dat de grootte van het oppervlak niet veranderie met het toerental. De waarden stemden onderling zeer goed overeen, hetgeen ook met behulp van de toets van Student (zie Appendix II) bevestigd werd. Een afwijking van de getrokken lijnen bleek een grotere invloed op K_h dat op $K_{t=0}$ te hebben, zodat de laatste grootheid als het meest juist werd beschouwd (metingen 1 tm 10 in Tabel IX).

Voor latere berekeningen werd de diffusiecoëfficient bij verschillende temperaturen berekend volgens

$$\frac{D}{T} = constant,$$

uitgaande van de in (61) gegeven waarde voor $D_{20}o_{\rm C}$. Als temperatuur van het water werd $T_{\rm W}$ gemiddeld over een gehele proefneming.

Het verloop van $K_{t=0}$ met het toerental (zie figuur 3) vertoonde een sterke discontinuiteit bij het toerental n = 300. Bij dit toerental werd eveneens een rimpeling van het oppervlak waargenomen, hetgeen bij lagere toerentallen niet het geval was, zodat aangenomen moet worden dat bij dit toerental een wijziging in het stromingsbeeld aan het oppervlak optrad. De in dezelfde figuur weergegeven overarachtscoëfficient, welke tot stand komt door vrije convectie, die dus op kan treden tengevolge van dichtheidsverschillen welke ontstaan door het oplossen van GO_2 . Indien men aanneemt dat bij het oplossen van GO_2 in water geen volumeverandering optreedt volgt deze berekening gemakkelijk uit de algemene formule voor vrije convectie:

$$\mathrm{Sh} = \mathrm{G} \cdot (\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Sc})^n$$
 (26)

waarin voor een horizontaal plat vlak n = 1/3 en 0 = 0,17.

III - 2.2. Metingen aan glycerol-water-mengsels

Om een eerste indruk te krijgen van de meetbaarheid van de gasabsorptie in de glycerol-water-mengsels, welke begrensd wordt door de Viscositeit en de oplosbaarheid van CO₂, werden eerst orienterende metingen gedaan met mengsels van dichtheden 1099; 1093; 1092 en 1089 kg/m³ (Tabel V en No's 24,25,26 en 27 in Tabel IX).

Daarna werden twee series metingen verricht, n.l. bij dichtheden van 1055 kg/m³ (Tabel III en No's ll tm 19 in Tabel IX) en 1084 kg/m³ (Tabel IV en No's 20 tm 23 in Tabel IX). Daar C_x in het laatste geval zeer laag was, werden hierbij slechts vier metingen (bij hoge toerentallen) gedaan. De mengsels werden bereid door glycerol en condenswater zodanig te mengen, dat de gewenste dichtheid bereikt werd. Daarna werd het verkregen mengsel ontlucht. De dichtheden werden gemeten met behulp van een aerometer bij de temperatuur waarbij ook de absorptiemetingen gedaan werden: 20°C. Bij deze absorptiemetingen werd deze temperatuur zeer zorgvuldig gehandhaafd, daar de afhankelijkheid van de viscositeit van de temperatuur voor glycerol-water-mengsels niet bekend was. De oplosbaarheid van CO₂ werd berekend met behulp van een door <u>Van Krevelen</u> en <u>Hoftijzer</u> ((62), zie Appendix I) aangegeven methode.

 K_h en $K_{t=0}$ werden op de reeds beschreven wijze berekend (Tabel IX). De hellingen van log \emptyset_m/C_x vs t-grafieken bleken zeer klein te zijn, zodanig zelfs dat bij de serie $\mathcal{C} = 1055$ kg/m³ $K_{t=0}$ systhematisch hoger lag dan K_h , hetgeen m.b.v. de toets van Student (Appendix II) ook bevestiging vond. Voor de serie $\mathcal{C} = 1084$ kg/m³ was dit verschil merkwaardigerwijs niet significant. Een verklaring van dit verschijnsel kon niet gevonden worden. Voor de verdere berekeningen werd ook hier $K_{t=0}$ als het meest juist beschouwd. De viscositeit van de mengeele werd

De viscositeit van de mengsels werd verkregen uit literatuurgegevens (63) waarin η als functie van ρ vermeld stond (zie ook fig. 2).

De diffusiecoëfficient werd berekend uit die van water met de door <u>Nysing</u> (64) gevonden betrekking:

$$(D \cap f) = constant$$

voor mengsels van glycerol en water bij constante temperatuur.

In figuur 3 is $K_{t=0}$ als functie van het toerental voor de twee meetseries en de orienteringsmetingen weergegeven. Evenals bij water, werd ook bij de serie $\mathcal{Q} = 1055 \text{ kg/m}^3$ een discontinuiteit in het verloop waargenomen bij een toerental n = 300 omw/min.

Daar het optreden van deze discontinuiteit dus kennelijk niet afhangt van de viscositeit (resp. het getal van Reynolds) en de oppervlaktespanning van glycerol-water-mengsels niet veel verschilt van die van zuiver water (literatuurgegevens vermelden voor zuiver water bij 25°0: 72 dyne/cm, voor een 10%-ige glycerol-water-oplossing 70,5 dyne/cm (65)) en het verschil in dichtheid tussen water en de gebruikte mengsels zo gering is dat het onwearschijnlijk is, dat dit bij de ligging van de discontinuiteit tot uiting zou komen, ligt het vermoeden voor de hand dat we hier te doen hebben met een afhankelijkheid van het getal van Weber of van Froude (bij n = 300 omw/min Fr = 7,02), of met andere woorden met een wijziging in de toestand van het oppervlak. De overdrachtscoëfficient bij volledige vrije convectie, waarop later nog nader zal worden teruggekomen, werd op dezelîde wijze als bij water berekend, dus weer onder de veronderstelling dat bij het oplossen van CO₂ in het mengsels geen volumeverandering zou optreden.

Dat de viscositeit invloed uitoefent op de overdrachtscoëfficient komt in fig. 3 zeer sterk tot uiting.

III - 2.3. Metingen aan Teepol-oplossingen

Om de invloed van de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof op de overdrachtscoëfficient na te gaan werden metingen gedaan aan zeer verdunde oplossingen van Teepol in condenswater, n.l. 8 metingen aan een 0,0028 gew.% oplossing (Tabel VI); 8 metingen aan een 0,011 gew.% oplossing (Tabel VII) en 1 meting aan een 0,034 gew.% oplossing (Tabel VII) en 1 meting aan een 0,034 gew.% oplossing (Tabel VIII). In verband met de zeer lage Teepol-concentraties konden de verschillende benodigde grootheden berekend worden als geldend voor zuiver water. Een en ander is weergegeven in Tabel

X.

 K_h en $K_{t=0}$ stemden hier vrij goed overeen (zie ook Appendix II). $K_{t=0}$ als functie van het getal van Reynolds met als vergelijkingsmateriaal een analoge curve van water is weergegeven in fig. 7.

De onder III-2 besproken metingen en berekeningen van de stofoverdrachtscoëfficient maakten het mogelijk de invloed van de viscositeit, de vrije convectie en de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof op de absorptie na te gaan. Deze invloeden zullen hieronder achtereenvolgens besproken worden.

IV - 1. Invloed van de viscositeit

Uit figuur 3 is reeds gebleken dat de viscositeit een grote invloed uitoefent op de stofoverdrachtscoëfficient. Om een dieper inzicht te verkrijgen werden de twee concepties van het gebeuren aan het oppervlak, de filmtheorie en de penetratie-theorie tegenover elkaar gesteld. Laten we de invloed van de oppervlakte-vergroting buiten beschouwing dan volgen hieruit, zoals we reeds gezien hebben, als mogelijke dimensieloze correlaties respectievelijk:

$$Sh = 0. Re^{m} . Sc^{1/3}$$
 (5a)

en

$$Sh = C \cdot Re^{m} \cdot Se^{1/2}$$
 (5b)

Hieruit volgt dus dat indien inderdaad geen oppervlakte-vergroting zou optreden

K/D^{2/3}
$$\gamma^{1/3}$$
 als functie van Re
K/D^{1/2} $\gamma^{1/2}$ als functie van Re

óſ

in een grafiek voor alle proeven één lijn zou moeten opleveren, al naar gelang een van beide opvattingen juist is. Bij de uitvoering van deze procedure (opgenomen in Tabel IX) bleek, hoewel de curven voor de diverse viscositeiten nog sterk uiteenweken, dat de resultaten het minst slecht overeenkwamen met eerstgenoemde conceptie. Het verloop van $K/D^{2/3}$, $\sqrt{1/3}$ met Re is weergegeven in fig.4. Dat twee van de waarden voor $\sqrt{2} = 2,35 \cdot 10^{-6}$ m²/sec hoger liggen dan de waarden voor $\sqrt{2} = 1,42 \cdot 10^{-6}$ m²/sec bij eenzelfde Re, is te verklaren uit het feit dat hierbij voor het verkrijgen van eenzelfde Re een hoger toerental nodig is, waarvan dus een grotere oppervlakte-vergroting het gevolg is. De geschetste voorstelling van zaken is in zoverre irreëel, dat de stofoverdrachtscoëfficient, en zeker voor lagere toerentallen, ook nog een functie van het getal van Grashoff is, hetgeen dus betekent dat numeriek een gedeelte van de overdrachtscoëfficient te verklaren valt uit de optredende vrije convectie. In hoeverre deze een rol kan spelen bij de stofoverdracht zal hieronder nagegaan worden.

IV-2. Invloed van de vrije convectie

Bij het onderzoek naar de invloed van de vrije convectie werd er van uitgegaan, dat bij toenemend toerental deze invloed afneemt, en wel zodanig, dat bij een toerental van de roerder n = 0 de overdrachtscoëfficient geheel en al door de vrije convectie en bij zeer hoog toerental geheel door de gedwongen convectie wordt bepaald. De totale overdrachtscoëfficient wordt dus beschouwd als te zijn samengesteld uit een voor de vrije en een voor de gedwongen convectie:

$$K_{\text{tot}} = K_{\text{turb}} + K_{\text{v.c.}}$$
(27)

waarin dus bij toenemend toerental K_{turb} relatief groter en $K_{v.c.}$ relatief kleiner wordt. Voor deze verlaging van $K_{v.c.}$ als functie van K_{turb} werd gedacht aan een betrekking van de volgende vorm:

$$K_{\mathbf{v}\cdot\mathbf{c}\cdot} = (K_{\mathbf{v}\cdot\mathbf{c}\cdot})_{\mathbf{0}\cdot\mathbf{c}} \cdot e^{\left(1 - \frac{K_{\mathrm{tot}}}{(K_{\mathbf{v}\cdot\mathbf{c}\cdot})_{\mathbf{0}}}\right)} \beta$$
(28)

waarin $(K_{v.c.})_{o}$ de overdrachtscoëfficient bij volledige vrije convectie (n=0) voorstelt. Combinatie van (27) en (28) leidt tot:

$$\frac{K_{\text{tot}} - K_{\text{turb}}}{(K_{\text{v.c.}})_{0}} = e^{(1 - \frac{K_{\text{tot}}}{(K_{\text{v.c.}})_{0}})\beta}$$

$$\log \frac{K_{\text{tot}} - K_{\text{turb}}}{(K_{\text{v.c.}})} = (1 - \frac{K_{\text{tot}}}{(K_{\text{v.c.}})}) \beta \log e (30)$$

(29)

Waardoor inderdaad aan genoemde voorwaarden voldaan is. Overeenstemming met deze gedachtengang werd gevonden in de onderzoekingen van <u>Eckert</u> en <u>Diaguila</u> (66), die de gemengde vrije en gedwongen convectie in tegenstroom bij warmteoverdracht in buizen onderzochten. Het resultaat van hun onderzoekingen is schematisch als volgt weer te geven:



waarin Nu_x, Re_x en Gr_xPr berekend zijn met betrekking tot een bepaalde verhouding van een afstand langs de lengte van de buis tot de diameter, zodanig, dat de hieruit volgende Nu_x - Gr_xPr curve vrijwel overeenstemde met die bij een horizontaal plat vlak; waardoor toepassing van hun resultaten aannamelijker werd. Van hun resultaten werden een 35-tal punten genomen en daarvoor log $\frac{Nutot - Nuturb}{(Nu_v.c.)o}$ tegen $\frac{Nutot}{(Nu_y.c.)o}$; hetgeen dus overeenkomt met $\frac{Ktot}{(K_vc)o}$; grafisch tegen elkaar uitgzet. (Zie fig. 6). Rekening houdend met het feit dat bij lagere waarden van Nu_{tot}/(Nu_{ve})_o hun resultaten minder betrouwbaar waren en dat volgens bovenstaande formulering voor $(K_{tot}-K_{turb})/(K_{vo})_o = 1,0$ $K_{tot}/(K_{vo})_o = 1$ moest zijn, werd door de zo verkregen puntenverzameling de meest waar-

- 23 -

schijnlijke rechte lijn getrokken. (Daar het hier niet meer dan een allereerste benadering betreft, was deze procedure wel gerechtvaardigd). Door berekening van de vrije convectie bij n = 0, onder aanname dat er bij het oplossen van CO_0 in de vloeistoffen geen volumeverandering zou plaats vinden, werd het mogelijk met behulp van deze rechte lijn K_{turb}, die dus alleen zijn ontstaan heeft te danken aan een bepaald getal van Reynolds, te berekenen. Met de zo verkregen waarden voor K werden de onder IV-1 vermelde berekeningen herhaald (opgenomen in Tabel IX). Evenals daar trad tussen de curven van $K_{turb} / D^{1/2} \cdot \gamma^{1/2}$ vs Re voor de verschillende viscositeiten een grote discrepantie op. Bij de grafische weergave van $K_{turb}/D^{2/3}$. $\gamma^{1/3}$ vs Re (zie fig. 5) treedt een toenadering tussen de curven op, zodanig dat de curve voor $\gamma = 2,35.10^{-6}$ m²/sec die van water doorkruist, hetgeen dus in overeenstemming is met het optreden van oppervlakte-vergroting bij de hier gebruikte hogere toerentallen van de roerder. De ligging van de curve voor $\gamma = 1,42.10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$, waarvoor dus het verschil tussen $K_{t=0}$ en K_h significant was, is evenwel niet zodanig, dat er gesproken kan worden van een eenduidigheid van de resultaten. Laat men deze laatste curve buiten beschouwing, dan bestaat er een reden om aan te nemen dat de aanname van een laminaire grenslaag het gebeuren aan het oppervlak beter weerspiegelt, dan de theorie van Danckwerts of Higbie met oppervlakte-verversing.

IV-3. De invloed van een oppervlakte-actieve stof (Teepol)

Uit figuur 7 waarin K als functie van het getal van Reynolds van de roerder voor zuiver water en de diverse Teepoloplossingen is weergegeven, blijkt dat bij toenemende concentratie van de oppervlakte-actieve stof een afvlakking optreedt van de bij water waargenomen discontinuiteit bij het toerental van de roerder n = 300 omw/min (Re = 1,75.10⁴), zodanig dat men bij een concentratie van 0,011% kan spreken van een buigpunt in de buurt van deze waarde. Merkwaardig ook is het verloop van de kromme bij de 0,011 gew.% oplossing bij hogere getallen van Reynolds, welke doet suggereren dat de oppervlakte-vergroting relatief gezien wat gedempt wordt. Verder doet de ligging van het punt van de 0,034 gew.%-ige oplossing vermoeden dat bij nog hogere Teepol-concentraties deze werking weer teniet gedaan wordt. Het is evenwel zeer de vraag of men uit de ligging van één punt en de zeer geringe optredende afwijkingen van de metingen aan water conclusies mag verbinden. Juister is het waarschijnlijk te concluderen dat

de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof slechts een uiterst geringe invloed uitoefent op de stofoverdrachtscoëfficient, waaruit dus volgt dat de oppervlakte-vergroting voornamelijk veroorzaakt wordt door vorming van zwaartekrachtsgolven, waar het getal van Froude bij betrokken is. Het zal echter zeer moeilijk zijn, door metingen na te gaan hoe de overdrachtscoëfficient van het getal van Froude afhangt, daar men dan bij variërend toerental Re $(\frac{nd^2}{V})$ en Sc $(\frac{V}{W})$ constant zou moeten houden.

IV-4. Vergelijking van resultaten met andere metingen

Zoals reeds vermeld (II-3) bestudeerden <u>Johnson</u> en <u>Chen-Jung</u> <u>Huang</u> (5) het oplossen van vaste stoffen vanaf de bodem van geroerde vaten. Uitgaande van de veronderstelling dat zich boven de vaste stof een vloeistoflaagje vormde, dat verzadigd was aan deze stof, en dat dus in contact kwam met de turbulente vloeistof, maakten zij de theorie van Danckwerts aannemlijk, door voor het door hen gebruikte vat de volgende correlatie op te stellen:

$$\frac{KD}{D} = 0,0924 \ \left(\frac{V}{D}\right)^{0,5} \ \left(\frac{nd^2}{V}\right)^{0,71}$$

hetgeen dus in overeenstemming is met de definiering volgens Danckwerts en Higbie van K_L volgens welke $K_L \sim \sqrt{D}$. Het bezwaar van hun gedachtengang is evenwel, dat in de richting van de bodem van het vat een uitsterving van de turbulentie kan optreden, zodat het dus niet onmogelijk is, dat er beneden in het vat laminaire stroming optreedt, waardoor aanname van een grenslaag meer acceptabel wordt. (Terwijl bij een vrij oppervlak veel minder sprake zou moeten zijn van uitsterving van de turbulentie). Daar een vergelijking (in zoverre er althans hier van vergelijking sprake kan zijn) van resultaten interessant leek, werd bovenstaande correlatie toegepast op het fictieve geval van absorptie van CO₂ vanaf de bodem van het door ons gebruikte vat, en de overdrachtscoëfficient in dat geval berekend als functie van het getal van Reynolds. Het resultaat hiervan en als vergelijking de resultaten van de gasabsorptiemetingen aan het vrije oppervlak voor water zijn weergegeven in fig. 8. Bij toenemende Re blijken de resultaten aanvankelijk vrijwel parallel te lopen, eerst bij hogere Re treden afwijkingen op, welke verklaard zouden kunnen worden door het optreden van vergroting van het vrije oppervlak. Hierbij dient men er evenwel rekening mee te houden, dat de door de auteurs gebruikte vatdimensies verschillen van de door ons gebruikte. Terwijl het vat ongeveer van gelijke grootte is, is de door hen gebruikte roerder groter en is de afstand van de roerder tot de bodem kleiner, hetgeen dus tot gevolg heeft dat de constante in bovenstaande correlatie voor ons geval kleiner moet zijn en de daaruit volgende waarden voor K_{r.} als functie van Re lager moeten liggen dan in de grafiek is weergegeven. Anderzijds is het zo, dat bij de door de auteurs gedane proefnemingen geen vrije convectie optrad, terwijl onze resultaten aan het vrije oppervlak daarvoor gecorrigeerd zouden moeten worden. Een meer dan oppervlakkige vergelijking is dus niet mogelijk.

Hoofdstuk V - Conclusies

Nagegaan werd de invloed van het toerental van de roerder, de viscositeit van de vloeistof en de aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof op de stofoverdrachtscoëfficient bij absorptie van CO₂ in het oppervlak van een vloeistof in een geroerd vat. De hieruit volgende conclusies zijn:
1. De overdrachtscoëfficient neemt bij groter wordend toerental progressief toe (indien men de grootte van het oppervlak als onafhankelijk van het toerental beschouwt), welke progressiviteit te verklaren valt uit het ontstaan van zwaartekrachtsgolven. De invloed van het getal van Froude werd niet nader onderzocht.

- 2. Bij toenemende viscositeit daalt bij zelfde getallen van Reynolds de stofoverdrachtscoëfficient.
- 3. Door de verschillende viscositeiten m.b.v. het getal van Schmidt in rekening te brengen op een wijze die volgt uit aanname van een laminaire film of van een oppervlakte-verversing volgens Danckwerts of Higbie wordt deze daling niet geheel verklaard.
- 4. Door het in rekening brengen van de vrije convectie, waarvan de invloed groter wordt, naarmate het toerental van de roerder lager wordt, en door de resultaten van een serie metingen bij $\mathcal{V} = 1,42\cdot10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ dubieus te stellen, wordt het waarschijnlijk dat voor een verklaring van het gebeuren aan het oppervlak de aanname van een laminaire grenslaag prevaleert boven de aanname van een oppervlakteverversing volgens Danckwerts of Higbie.
- 5. De aanwezigheid van oppervlakte-actieve stoffen (onderzocht met Teepol) oefent een uiterst geringe invloed uit op de stofoverdrachtscoëfficient.

Bij eventuele voortzetting van het onderzoek lijkt het wenselijk de invloed van de viscositeit nader na te gaan, om aldus tot een verklaring te komen van het afwijkende gedrag van de stofoverdrachtscoëfficient bij $\mathcal{V} = 1,42\cdot10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec.}$ Aan een en ander dient een onderzoek naar de oplosbaarheid van CO₂ in glycerol-water-mengsels vooraf te gaan, om daardoor de juistheid van de gebruikte C_x-waarden buiten elke twijfel te stellen.

Appendix I - Berekening C - wearden van CO 2 in glycerolwater-mengsels

Door von Kiss, Lajtai en Thury (67) werden oplosbaarheden gemeten van CO_2 in glycercl-water mengsels bij 0,05; 12,5 en 25°C bij verschillende semenstellingen van de mengsels. Oplosbaarheden bij 15°C werden gemeten door von Hammel (68). De waarden van eerstgenoemde auteurs komen niet overeen met die van laatstgenoemde en geven de indruk te lang te zijn. Daarom werd getracht de oplosbaarheden van CO_2 bij 20°C te berekenen op een door <u>Van Krevelen</u> en <u>Hoftijzer</u> aangegeven wijze (62). Uit thermodynamische beschouwingen leidden zij voor het evenwicht tussen een gas en een vloeistof waarin een andere stof is opgelost een gemodižiceerde wet van Henry af:

$$pH = \langle \sigma_x opl \rangle$$

Maarin \sqrt{de} activiteitscoëfficient is, welke voor zuiver water de waarde 1 heaft en groter wordt naarmate de concentratie van de opgeloste stof (C₂) toeneemt; voor niet-electrolyten volgens:

waarin e een constante is, onafhankelijk van de temperatuur en de aard van het opgeloste gas, maar afhankelijk van de aard van de opgeloste stof.

Uit het feit dat χ voor suiver water 1 is kunnen we afleiden dat:

$$Y = \frac{C_x H_{20}}{C_x O_x}$$

zođat

$$\log \frac{\mathcal{O}_{\mathbf{x}} + 2\mathcal{O}_{\mathbf{x}}}{\mathcal{O}_{\mathbf{x}} - \mathcal{O}_{\mathbf{x}}} = c \mathcal{O}_{\mathbf{x}}$$

In figuur 9 werden de literatuurwaarden voor 15, 25 en 12,5°C uitgezet. De waarden van 25°C bleken die van 15°C zodanig te benaderen, dat aangenomen werd dat tussen deze twee temperaturen de door Van Krevelen en Hoftijzer voorgestelde procedure in het onderhavige geval inderdaad toepasbaar was. Op deze wijze werden dus de C_x-waarden voor 20°C berekend uit die bij 15°C.

(kg/m ³)	0 ₂ (gmol/1)	log Cx H20/Cx opl	Cx opl (kg/m3)
1055	2,98		1.34
1084	4,49	0,169	1,18
1099	5,27	0,197	1,10
1093	4,96	0,187	1,13
1092	4,91	0,185	1,13
TORA	4,75	0,180	1,14

Voor de gebruikte oplossingen volgt hieruit:

Met behulp van de Toets van Student werd nagegaan in hoeverre de optredende verschillen tussen de berekende waarden voor K_h en $K_{t=0}$ significant waren. Daarvoor werd er dus van uit gegaan dat de waarden van K_h en $K_{t=0}$ voor elke groep waarnemingen normaal verdeeld waren en de verschillen in elke groep dezelfde spreiding bezaten.

De berekeningen zullen zoveel mogelijk in tabelvorm gegeven worden. De wijze van berekenen en de benodigde tabellen zijn in elk willekeurig handboek voor statistiek te vinden.

A. Analyse van de resultaten van de metingen aan water.

No	^K h	Kt=0	Z _A = K _h -K _{t=}	$z_{\rm A}^2 .10^{12}$
			.10 ⁶	
1	10,40.10 ⁻⁶	9,65.10 ⁻⁶	+0,75	0,562
2	11,26	11,27	-0,01	0,0001
3	12,93	12,94	-0,01	0,0001
4	15,95	15,46	+0,49	0,240
5	15,78	16,22	-0,44	0,194
6	19,45	18,40	+1,05	1,100
7	20,59	20,30	+0,29	0,084
8	22,80	22,60	+0,20	0,040
9	27,75	26,15	+1,60	2,560
10	29,50	29,70	-0,20	0,040
		. 22	=3,72	$\Sigma z_{A}^{2} = 4,820$

$$\overline{Z}_{A} = 0,372$$
 $\Sigma Z_{A}^{2} = 4,82$ $\overline{Z}_{A}^{2} = 0,138$
 $S_{A}^{2} = 1/9$ (4,82 - 10.0,138) = 0,382 $S_{A} = 0,618$

$$t_1(Z_A) = \frac{0.372}{0.618} \sqrt{10} = 1.905 \quad Y = 9$$

Dus tweezijdige overschrijdingskans ligt tussen 0,1 en 0,05. Behoudens een betrouwbaarheid van 5% kunnen we dus zeggen dat voor de metingen aan water $K_h = K_{t=0}$.

Β.	Analyse	resultaten	van metingen	aan	glycerol-water-meng-
	sels met	e = 1055	kg/m ³ .		

No	_K ,10 ⁶	$K_{t=0}$.10	$\frac{a}{B} = \frac{K_{h}}{T} = c$	z _B ²
			.106	.1012
11	5,99	6,85	~0,8 6	0,74
12	6,97	7,90	-0,93	0,87
13	5,06	9,90	-4,84	23.4
14	9,29	10,41	-1,12	1,26
15	7,11	11,50	-4,39	19,25
16	9,06	11,79	-2,73	7,47
17	11,77	12,96	-1,19	1,42
18	11,59	-13,96	-2,37	5,61
19	13,20	15,45	-2,25	5,08
			$\overline{z} \ \overline{z}_{B}^{max} 20, 68$	$z z_{B}^{2} = 65, 10$

$$\overline{Z}_{B} = -2,30 \qquad \overline{Z}_{B}^{2} = 5,30 \qquad \overline{z}_{B}^{2} = 65,10$$

$$S_{B}^{2} = 1/8 (65,1 - 9.5,30) = 2,18 \qquad S_{B} = 1,48$$

$$t_{1}(Z_{B}) = \frac{2,30}{1,48} \sqrt{9} = 4,66 \qquad \sqrt{9} = 8$$

Dus tweezijdige overschrijdingskans is $\ll 0\,,01\,.$ Behoudens een betrouwbaarheid van 5% is $K_{t=0}$ systhematisch groter dan $K_{\rm h}\,.$

C. Analyse resultaten van metingen aan glycerol-water-mengsels met $\mathcal{Q}=$ 1084 kg/m³

No	K _h *10 ⁶	K _{t=0} .10	$d^{6} \qquad Z_{C} = K_{h} - K_{t=0}$	Z _C ²
21	10,10	9,39	+0,71	0,50
20	6,41	8,45	-2,04	4,16
22	8,63	10,62	-1,99	3,96
23	12,40	11,19	+1,21	1,46
			ZZ _α = 2,11 Σ2	$z_0^2 = 10,08$

e.e.

$$\overline{z_{c}} = -0,527 \quad \overline{z_{c}}^{2} = 0,28 \quad \sum \overline{z_{c}}^{2} = 10,1$$

$$\overline{s_{c}}^{2} = 1/3 (10,1-4.0,28) = 3,0 \qquad \overline{s_{c}} = 1,73$$

$$\overline{t_{1}}(z_{c}) = \frac{0,527}{1,73} \sqrt{4} = 0,608 \quad \forall = 3$$

Dus tweezijdige overschrijdingskans ligt tussen 0,6 en 0,5. Behoudens een betrouwbaarheid van 5% kan men dus zeggen dat $k_{\rm h} = k_{\rm t=0}$.

D. Analyse resultaten van proefmetingen aan glycerol-watermengsels.

Voor deze analyse werden de proefmetingen tezemen genomen en beschouwd als komende uit een en dezelfde verdeling.

No	K _h .10 ⁶	K _{t=0} .10 ⁶	$Z_{\rm D} = K_{\rm h} - K_{\rm t=0}$	2 _D .10 ¹²
24	7,06	9,36	-2,30	5,30
25	6,88	10,10	-3,22	10,19
26	5.02	8,91	-3,89	15,15
27	4,69	8,78	-4,09	16,80
		Ž	$z_{\rm D} = 13,50 z_{\rm D}^2 =$	47,44

 $\overline{Z_{D}} = -3,38 \qquad \overline{Z_{D}}^{2} = 11,4 \qquad \overline{z} \qquad \overline{Z_{D}}^{2} = 47,44$ $s_{D}^{2} = 1/3 (47,4-4.11,4) = 0,6 \qquad s_{D} = 0,775$ $t_{1}(Z_{D}) = \frac{3,38}{0,775} \sqrt{4} = 8,73 \qquad \forall = 3$

Dus tweezijdige overschrijdingskans is << 0,01 Behoudens een onbetrouwbaarheid van 5% is $K_{t=0}$ systhematisch groter dan K_{h} .

E. Analyse van resultaten van metingen aan Teepol-oplossingen, 0.0028%.

ЙO	K _h .10 ⁶	×t=0.10 ⁶	^Z E ^{-K} h ^{-K} t=0 .10 ⁶	² 3 ² .10 ¹²
28	12,22	11971	+0,49	0,241
29	11,94	13,16	-1,22	1,485
30	15,70	15,85	-0,15	0,023
31	17,50	17,78	-0,28	0,079
32	20,25	19,05	+1,20	1,440
33	22,20	21,70	+0,50	0,250
34	22,20	22,90	-0,70	0,490
35	24,70	26,65	-1,95	3,800
		- 	$\Sigma Z_{\rm E} = -2,11 \Sigma Z_{\rm E}^2$	= 7,788

 $\overline{Z_{\rm E}} = -0,264 \qquad \overline{Z_{\rm S}}^2 = 0,0699 \qquad \Sigma \ \overline{Z_{\rm E}}^2 = 7,788$ $S_{\rm E}^2 = 1/7 \ (7,788 - 8.0,0699) = 1,031 \qquad S_{\rm E} = 1,015$ $t_1(Z_{\rm E}) = \frac{0.264}{1,015} \quad \sqrt{8} = 0,735 \qquad Y = 7$

Hieruit volgt een tweezijdige overschrijdingskane die ligt tussen 0,5 en 0,4. Behoudens een betrouwbaarheid van 5% is dus $K_h = K_{t=0}$

F. Analyse van resultaten van metingen aan Teepol-oplossingen, 0,011%.

.10 ⁶	
	.1012
36 9,95 11,4 5 -1,50	2,25
37 11,16 13,21 -2,05	4,20
38 17,40 15,25 +2,15	4,61
39 17,42 16,85 +0,57	0,325
40 17,50 19,55 -1,95	3,80
41 20,55 20,81 -0,26	0,068
42 23,35 22,99 .0,36	0,130
43 26,15 25,41 +0,74	0,548
$\Sigma u = -1.94 \Sigma u^2 = -1.004$	15.93

$$Z_{p} = -0,243 \qquad Z_{p}^{-2} = 0,0591 \qquad \sum Z_{p}^{-2} = 15,93$$

$$S_{p}^{-2} = 1/7 (15,93 - 8.0,0591) = 2,21 \qquad S_{p}^{-2} = 1,49$$

$$t_{1}(Z_{p}) = \frac{0,243}{1,49} \ \forall B = 0,461 \qquad \forall = 7$$

Hieruit volgt een tweezijdige overschrijdingskans die ligt tussen 0,7 en 0,6.

Behoudens een betrouwbaarheid van 5% is dus $K_h = K_{t=0}$.

Oversicht der gebruikte symbolen

ø"		, absorptiesnelheid per eenheid van oppervlak	t Xr/m ² eaa
ø _m		, absorptiesnelheid	ks/sen
K.		, totale stofoverdrachtscoefficient	m/see
ĸ _¢		, stofoverdrachtscoefficient in gasfase	m/see
K ^L		, stofoverdrachtscoefficient in viceistoffese	a/see
$\kappa_{\mathbf{h}}$, overdrachtscoefficient berekend uit de hel-	and an a ch
		ling van de log p_{m}/c_{-} va t-curve	m/see
$\mathbb{K}^{t=0}$, overdrachtscoefficient berekend uit de log	ng kara a
		ϕ_m/c_x vs t -curve d.m.v. extrapolatic naar	
K.		totale statements by as a	m/sec
-to t		, totale stoloverurachtscoefficient in de	
		vioeistoriase en peschouwd als te zijn ont-	
V		Staan t.g.v. vrije en gedwongen convectie	m/sec
turb	1	toreageabracht in de vloeistoffase,	
Į,		teweeggebracht door gedwongen convectie	m/sec
T.C.	1	terracauscoerricient in de vloeistoffase,	
12 3		teweeggebracht door vrije convectie	m/sec
V. V. O.	0 3	bii bet transfillent in de vloeistoffase	
12		of the toerental $n = 0$	m/sec
5.A.	ŝ j	Verschil tussen overeenkomstige waarden van	
73		h en htmo	m/sec
1 L	ġ	gasurur Hereite	N/m^2
а С	9	nenry-constante	sec ² /m ²
vo v	9	aanvangsconcentratie in vloeistoffase	kg/m ²
V X	ŷ	verzaalgingsgasconcentratie in vloeistof-	₩ <u>₩</u>
ñ			kg/m ²
~	3	gasconcentratie in vloeistoffase	kg/m ²
2	Þ	glygerolconcentratie in glycerol-water-	
A		mengsels	nol/liter
A C	9	oppervlak van geroerde vloeistof	n [∠]
0	ş	aikte van Laminaire vloeistoffilm	1
<u> </u>	9	contactija aan het oppervlak	360
**	13	gemladelde contacttijd aan het oppervlak	sec
22	9	tractionele snelheid van oppervlaktever-	
15%		versing	l/sec
6)	Ś	diffusiecoefficient van gas in vloeistof	² /sec

- 35 -

.

\mathcal{M}	9	dynamische viscositeit van vloeistof	Nsec/m ²
Š.	9	kinematische viscositeit van vloeistof	m ² /sec
é	9	dichtheid van geroerde vloeistof	kg/m ³
ΔP	9	verschil in dichtheid van met gas verzadig-	
l		de vloeistof en zuivere vloeistof	kg/m ³
Х	9	oppervlakte-spanning van vloeistof	N/m^2
n	9	toerental van roerder	omw/sec
t	9	moment van waarneming, gerekend vanaf de be-	
		gintijd van het waargenomen verschijnsel	sec
g	Ş	versnelling van de zwaartekracht	m/sec ²
D	9	diameter van het geroerde vat	m
d	9	uitwendige diameter roerder	m
W	9	hoogte roerderbladen	m
H	9	hoogte vloeistofspiegel in vat	m
V	Ż	volume vloeistof in vat	č _m
\mathbf{Sh}	9	getal van Sherwood	
Se	9	getal van Schmidt	
Re	9	getal van Reynolds	
(fr	寥	getal van Grashoff	
fr	Ŷ	getal van Froude	
₩e	38	getal van Weber	

.

Literatuuroverzicht

1. R.C.L. Bosworth, Physics in Chemical Industry p. 425. (Mc Millan & Co, London 1950) 2. J.G. van de Vusse, Mixing by agitation of miscible liquids (Diss. Delft 1953) 3. A.W. Hixson, S.J. Baum, Ind. Eng. Chem. 33, 478, 1433 (1946) en Ind. Eng. Chem. 34, 120, 194 (1942) 4. E.M. Nack, R.E. Marriner, Chem. Eng. Progr. 45 , 545, (1949) 5. A.J. Johnson, Chen-Jung Huang, A.I.Ch.S. Journal, 2, 412 (1956) 6. A.W. Bixson, M.J. Smith, Ind. Eng. Chem. 41, 973 (1942) 7. T.H. Chilton, T.B. Drew, R.H. Jebens, Ind. Eng. Chem. 36, 510 (1944) 8. C.V. King, P.L. Howard, Ind. Eng. Chem. 29, 75 (1937) 9. H. Kreussold, Chem. Ing. Techn. 23, 177, (1951) 10. W.L. Badger, J.C. Wood, E.R. Whittemore, Chem.Met. Eng. 27, 1176 (1922) 11. R.E.J. Dodd, J. Phys. Chem. <u>31</u>, 1761 (1927) 12. H. Kramers, W.H. Knoll, Ingenieur <u>63</u> Ch 9, 67, (1951) 13. H. Kramers, W.H. Knoll, G.M. Baars, Chem. Eng. Sci. 2, 35, (1953) 14. W. Möhle, Chem. Ing. Techn. 21, 355 (1949) 15. W. Möhle, Chem. Ing. Techn. 24, 495 (1952) 16. Shinji Nagata, Masamichi Yanagimoto, Tohei Yokoyama, Memoirs Fac. Eng. Lyoto Univ. <u>18</u> IV, 444 (1956) 17. E. Brunner, Z. Phys. Chem. A 47 56, 190 (1904) j.dem 51 95, 494 (1905) 18. C.V. King, J. Am. Chem. Soc. 57, 828 (1935) 19. N. Nernst, Z. Physik. Chem. 15, 148 (1904) 20. A.W. Hixson, A.R. Tenney, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, <u>31</u>, 113 (1935) 21. A.M.L. White, E. Brenner, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 30, 585 (1934) 22. A.M.L. White, S.D. Sumerford, Chem. Met. Eng 43, 370 (1936) 23. J.H. Rushton, Chem. Eng. Progress 46, 470 (1950) 24. G. Mc Lean, E.F. Lyons, Ind. Eng. Chem. 30, 489 (1938) 25. J.H. Aushton, D.E. Mack, H.J. Everett, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 42, 441 (1946)

- 38 -
- 26. J.H. Rushton, J.Y. Oldshue, Chem. Eng. Progress <u>49</u>, 161, 267, (1953)
- 27. J.O. Hinze, B.G. van der Regge Zijnen, Appl. Sci. Res. Al, 435, (1949)
- 28. A.M.L. White, E. Brenner, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 30, 585 (1934)
- 29. S.A. Miller, Ch. A. Mann, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. <u>40</u>, 709, (1944)
- 30. Shinji Nagata, Naoya Yoshioka, Tohei Yokoyama, Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 17 III, 175 (1955)
- 31. Shinji Aagata, Tohei Yokoyama, Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 17 IV, 253 (1955)
- 32. Shinji Nagata, Tohei Yokoyama, Hiroyuki Maeda, Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 18 I, 13 (1956)
- 33. D.E. Mack, Chem. Eng. 47, 109 (1951)
- 34. J. Hiel, Chem. Met. Eng 28, 1077 (1923)
- 35. H.O. Forrest, B.E. Roetheli, R.H. Brown, Ind. Eng. Chem. 23, 650 (1931)
- 36. W. Keller, Z. Physik. Chem. A 431 (1929)
- 37. B.A. Bakhmeteff, The Mechanics of Turbulent Flow, (Princeton Un. Press, 1936)
- 38. L. Prandtl, Essentials of Fluid Dynamics, (Blackie & Son Ltd, London, 1952)
- 39. Th. von Kärmán, J. Aeronautical Sc. 1, 1, (1934)
- 40. G.K. Batchelor, The Theory of Homogenous Turbulence, (University Press Cambridge, 1953)
- 41. Th. von Kármán, J. Aeronautical Sc. 4, 131 (1937)
- 42. Th. von Kármán, L. Howarth, Proc. Roy. Soc (London) A 164, 192 (1938)
- 43. G.I. Taylor, Proc. Roy. Soc. (London) A 102, 541 (1923)
- 44. G.I. Taylor, Proc. Roy. Soc. (London) A 151, 494 (1935)
- 45. G.I. Taylor, Proc. Roy. Soc. (London) A 157, 546 (1935)
- 46^a H.L. Dryden, Ind. Eng. Chem. <u>31</u>, 416 (1939)
- 46. Th. J. Hanratty, A.I. Ch.E. Journal 2, 359 (1956)
- 47. W.G. Whitman, Chem. Met. Eng. 29, 147 (1923)
- 48. W.K. Lewis, W.G. Whitman, Ind. Eng. Chem. 16, 1215 (1924)
- 49. R. Higble, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. <u>31</u>, 365 (1935)
- 50. P.V. Danckwerts, Ind. ing. Chem. 43, 1460 (1951)
- 51. P.V. Danckwerts, Am. Inst. Chem. Engrs. 1, 456 (1955)

- 52. Th. Goodgame, T.K. Sherwood, Chem. Eng. Sc. 3, 37 (1954) 53. M.Kh. Kishinevskii, Zh. Priklad. Khim. 22, 1173 (1949) 54. M.Kh. Kishinevskii, Zh.Priklad. Khim. 24, 542 (1951) 55. M. Kh. Kishinevskir, R.M. Novik, Zh. Priklad. Khim. 26, 673 (1953)-56. M. Kh. Kishinevskii, Zh. Priklad. Khim. 27, 382 (1954) 57. M. Kh. Kishinevskil, S.M. Faler, 20. Priklad. Khim. 26, 579 (1953) 58. M. Kh. Kishinevskiï, Zh. Priklad. Khim. 27, 450 (1954) 59. M.Kh. Rishinevskiï, 60. G.A. Morris, J. Jackson, Absorption Towers (1953) 61. J.H. Perry, Chemical Engineers' Handbook, 540 (London 1950) 62. D.W. van Krevelen, P.J. Hoftijzer, XXI ème Congrès International de Chimie Industrielle, Bruxelles, Sept. 1948, p. 168 63. Intern. Crit. Tables V, 23 64. R.A.T.O. Nysing, Diss. Delft 1957 (nog te verschijnen) 65. Tables Annuelles Constantes et Données Numériques 12 (7), 14 (1939) 66. E.R.G. Eckert, A.J. Diaguila, Trans. A.S.M.E. 76, 497 (1954)67. A. von Riss, I. Laitaj, G. Thury, Z. Anorg. Chem. 253,
 - 346 (1937)
- 68. A. von Hammel, Z. Physik. Chem. 90, 121 (1915)

	Afmeting in mm	Verhouding
Hoogte vat	320	
Diameter vat D	224	D
Diameter roerder d	56	1/4 D = d
Asdikte roerder	5,28	
Afstand roerder-bodem van vat	112	1/2 D
Breedte roerderbladen	14	1/4 d
Hoogte roerderbladen w	7	1/8 d
Hoogte vloeistofspiegel	224	D
Breedte keerschotten	22,4	1/10 D
Dikte deksel	8,2	
Diameter deksel	272	
Dikte vatwand	5	

Tabel I - Afmetingen van het geroerde vat

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	T _w oc	Tg () (kg/sec)	0 _x (kg/m ³)	ø _m /c _x
148	22,4	10	29,8	20,7	19,4	6,2.10-7	1,70	3,65.10
	60,5	10	33,7	20,5	20,5	5,46	1,71	3.19
	88,9	10	35,6	20,5	20,1	5,18	1,71	3.03
	117,6	10	39,2	20,4	20,1	4,71	1,72	2,74
	155,5	5	21,6	20,3	20,1	4,27	1,72	2,48
198	8,9	· 10	25,5	20,3	18,7	7,29	1,72	4,23
	35,8	10	25,5	20,1	18,6	7,26	1,72	4,22
	72,1	10	29,0	20,0	18,5	6,36	1,73	3,68
	119,5	10	33,2	19,9	18,8	5,57	1,74	3,20
	149,3	10	36,6	19,8	18,7	5,05	1,74	2,90
	158,2	10	38,5	19,7	18,8	4,81	1,75	2,75
	201, 9	5	22,7	19,5	18,7	4,07	1,76	2,31
247	13,8	10	22,3	20,0	16,8	8,35	1,73	4,82
	53,3	10	24,4	19,9	17,6	7,47	1,74	4,29
	103,8	10	29,0	19,8	17,9	6,38	1,74	3,67
	152,3	. 5	17,4	19,3	17,9	5,34	1,77	3,02
	193,0	5	20,3	19,1	17,9	4,57	1,78	2,56
298	13,9	10	18,4	20,0	21,0	9,97	1,74	5,72
	48,9	10	21,2	20,0	21,8	8,63	1,74	4,96
	78,3	10	24,3	20,0	19,8	7,58	1,74	4,36
	107,5	10	27,7	20,2	19,3	6,66	1,73	3,85
356	7,6	10	17,6	20,5	20,7	10,45	1,70	6,15
	42,9	10	20,3	20,5	21,0	9,06	1,70	5,33
	71,4	10	23,4	20,6	21,0	7,84	1,70	4,56
	112,8	10	27,2	,20,6	21,2	6,76	1,70	3,99
	149,6	10	32,6	20,7	21,0	5,64	1,70	3,32
390	8,5	10	15,6	20,7	20,6	11,79	1,69	6,97
	67,6	10	21,0	20,9	23,6	8,64	1,68	5,14
	105,9	10	25,8	21,2	23,8	7,04	1,67	4,21
	151,2	10	33,1	21,5	24,1	5,49	1,65	3,32
450	12,2	20	29,2	20,4	19,8	12,61	1,70	7,43
	38,8	10	17,7	20,3	19,5 5	LO,43	1,71	6,10
	68,6	10	20,6	20,2	18,8	9,00	1,72	5,23
	95,9	10	24,0	20,1	18,7	7,73	1,73	4,46
505	13,0	20	26,0	19,9	17,2]	14,30	1,74	8,22
	44,3	10	16,1	20,0	17,2 1	1,54	1,74	6,64
	74,6	10	19,2	20,0	17,9	9,67	1,74	5,56
	106,5	10	23,1	20,0	18,1	8,04	1,74	4,62
	135,7	10	27,7	20,0	18,3	6,70	1,74	3,85

Tabel II .- Verwerking metingen aan water.

Tabel II - Vervolg

·	n (omm/min)	Mom	Vol.	Tiją	True C	T_°C	Ø_	C.	Ø /c
	(Outw/mility		(mL)	(sec)		6	(kg/sec)	$\left(\frac{x}{kg/m^{3}}\right)$	/ m' x
	545	6,0	15	15,7	20,2	19,1	17,65207	1,72	10.26.10-7
		64,5	15	24,4	20,2	19,5	11,35	1,72	6,60
		77,7	10	18,4	20,2	20,0	10,01	1,72	5.82
		110,8	10	24,0	20,2	20,0	7,67	1.72	4.46
		139,5	10	29,1	20,2	20,0	6,33	1.72	3.68
	595	5,1	15	14,5	20,5	20,0	19,05	1.70	11,21
		28,9	15	17,7	20,5	20,0	15,60	1.70	9.17
		92,8	10	18,9	20,6	20,1	9,74	1.70	5.72
		124,2	10	24,7	20,6	20,1	7,45	1.70	4.38
		156,4	10	31,8	20,6	20,2	5.79	1.70	3.40

Tabel III	0825	Verwerking metingen	aan	glycerol-water-mengaels,
		$Q = 1055 \text{ kg/m}^{\prime}$.		

n (omw/min) Mom) min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	T_0	TO	Øm	O _{X 3}	Ø _m /C _x
200	32 0	Per	000			(kg/sec)	(kg/m)	
600	1,2,3	2	26,8	20,0	19,9	3.44.10	1,34	2,56.10-1
	40,1	5	27,0	20,0	20,7	3,40	1,34	2,54
	129,8	5	32,0	20,0	22,0	2,86	1,34	2,14
250	10,7	5	22,8	20,0	20,0	4,04	1,34	3,02
	43,8	5	23,8	20,0	21,0	3,86	1,34	2,88
	80,0	5	25,5	20,0	22,0	3,59	1.34	2.68
	135,6	5	28,7	20,0	22,8	3,18	1,34	2.37
300	13,9	5	19,7	20,0	17,1	4,72	1.34	3.52
	66,3	5	19,2	20,6	17,9	4,84	1.34	3.62
-	115,8	5	20,9	20,1	18,2	4.44	1.34	3.32
	167,9	5	22,0	20,0	18,2	4.22	1.34	3.15
350	9,6	. 5	17,1	20,0	20,7	5.37	1,34	4.07
	36,2	5	18,6	20,0	21,1	4.94	1.34	3 60
	67,7	5	20,1	20,0	21,8	4.55	7.34	3 10
	99,4	5	21,2	20.0	22.0	4.32	1.31	7940
420	18,2	5	15.7	20.0	20.1	5.87	1.34	1963
	57,8	5	17.7	20.0	19.7	5:21	1 21	4,901
	104,7	5	19.8	20.0	19.8	A.66	1994	2,0Y
	151,6	5	22.0	20.0	20.1	A 7:0	1974	2,40
450	12,8	5	16.4	80.0	18.9	5.64	1 74	2,12
	44.0	5	16.3	20,0	10,5	5 66	1,924	4,21
	78.5	5	17.1	20 0	20 0	5 20	1,)4	4,22
	149.6	5	57 6	20,0	an a	2,329	1, 54	4,02
	181 8	5	22,U	20,0 00 0	2V,0	4,920	1,34	3,18
	ل و ځر ک ځر	1	6691	20,0	20,8	4,05	1,34	3,03

Tabel III - Vervolg

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	TwoC	Tgo	Ø _m (kg/sec)	C _x (kg/m ³)	Ø _m /C _x
500	12,3	5	14,1	20,0	19,0	6,56.10	1,34	4,90.10-7
	62,2	: 5	16,1	20,0	19,9	5,72	1,34	4,26
	98,4	: 5	18,0	20,0	20,0	5,11	1,34	3,81
ang moone an ana digita na mangata kata kata kata kata kata kata kata	131,7	5	20,3	20,0	20,2	4,54	1,34	3,39
550	7,2	5	12,9	20,0	21,9	7,11	1,34	5,31
	39,2	5	13,9	20,0	21,9	6,59	1,34	4,92
	86,4	. 5	16,6	20,0	21,8	5,51	1,34	4,11
	113,7	. 5	18,1	20,0	21,4	5,06	1,34	3,77
	150,2	5	20,5	20,0	21,3	4,64	1,34	3,46
600	9,2	5	11,7	20,0	18,5	7,92	1,34	5,91
	34,3	- 5	13,1	20,0	19,0	7,06	1,34	5,27
	60,7	.5	14,3	20,0	19,2	6,47	1,34	4,83
	95,9	5	16,4	20,0	19,6	5,62	1,34	4,19
	128,3	:5	17,8	20,0	20,1	5,16	1,34	3,85
600	150,2 9,2 34,3 60,7 95,9 128,3	5 5 5 5 5 5 5	20,5 11,7 13,1 14,3 16,4 17,8	20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0	21,3 18,5 19,0 19,2 19,6 20,1	4,64 7,92 7,06 6,47 5,62 5,16	1,34 1,34 1,34 1,34 1,34 1,34	3,46 5,91 5,27 4,83 4,19 3,85

<u>Tabel IV</u> - Verwerking metingen aan glycerol-water-mengsels, $e = 1084 \text{ kg/m}^3$

n (omw/min)	Mom (Min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Two	Tgoc	Ø _m (kg/sec)	C _x (kg/m³)	Ø _m /0 _x
450	13,4	5	23,7	20,0	20,2	3,88.107	1,18	3,28
x 4	62,8	5	26,4	20,0	20,9	3,48	1,18	2,95
	157,4	- 5	31,9	20,0	21,1	2,89	1,18	2,53
500	. 9,0	5	22,1	20,0	20,8	4,17	1,18	3,53
	41,8	5	23,5	20,0	20,6	3,92	1,18	3,32
	84,7	5	26,5	20,0	20,8	3,48	1,18	2,95
	133,4	5	30,2	20,0	20,8	3,05	1,18	2,58
550	14,8	5.	20,8	20,0	20,2	4,43	1,18	3,75
	81,8	5	22,2	20,0	20,3	4,15	1,18	3,52
	142,9	5	26,3	20,0	20,2	3,50	1,18	2,97
600	11,0	5	19,4	20,0	21,2	4,73	1,18	4,01
	46,7	5	20,5	20,0	21,6	4,46	1,18	3,78
	100,6	5	24,9	20,0	21,8	3,68	1,18	3,12
The second se	134,6	5	27,5	20,0	22,0	3,33	1,18	2,82

.
(kg/m ³)	n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Two	Tg ^o c	Ø _m (kg/sec)	0 (kg/m ³)	Ø _m /C _x
1099	605	10,2	5	23,2	20,9	21,1	3,95.107	1,10	3,59.107
		46,0	5	24,5	20,9	21,5	3,74	1,10	3,40
		94,1	5	27,4	20,9	20,8	3,36	1,10	3,05
		129,8	5	29,1	20,9	20,2	3,17	1,10	2,88
1093	650	10,7	5	21,2	20,2	17,7	4,38	1,13	3 , 88
		49,0	5	22,4	20,0	18,1	4,14	1,13	3,66
		84,0	5	23,8	20,0	19,2	3,88	1,13	3,44
		120,4	5	26,4	20,0	20,9	3,48	1,13	3,08
1092	550	10,8	5	23,4	20,0	18,9	3,95	1,13	3,49
		61,9	5	25,6	20,0	20,7	3,59	1,13	3,18
		98,6	5	26,6	20,0	20,6	3,46	1,13	3,06
		128,2	5	27,6	20,0	20,2	3,34	1,13	2,96
1089	504	7,2	5	23,4	20,0	19,6	3,94	1,14	3,46
I .		42,3	5	23,8	20,0	19,7	3,88	1,14	3,40
		85,0	5	25,5	20,0	19,4	3,62	1,14	3,18
т.		120,7	5	28,2	20,0	19,5	3,27	1,14	2,87

<u>Tabel V</u> - Verwerking proefmetingen aan glycerol-watermengsels

• • • •

Tabel	VI	62514	Verwerking	metingen	aan	Teepol-oplossingen:	0,0028	%
-------	----	-------	------------	----------	-----	---------------------	--------	---

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Two	Tgoc	Ø _m (kg/sec)	С _х (kg/m ³)	ø _m /c _x
205	5,5	5	11,7	20,1	19,8	7,87.1047	1,73	4,55 .0⁻⁷
	36,4	5	13,1	20,1	20,2	7,06	1,73	4,08
	69,9	5	14,4	20,1	21,1	6,38	1,73	3,69
	99,7	5	15,9	20,1	21,9	5,76	1,73	3,33
250	8,6	5	10,5	20,1	22,1	8,71	1,73	5,04
	33,2	5	11,4	20,2	22,1	8,03	1,72	4,66
	71,1	5	13,3	20,3	22,2	6,88	1,72	4,00
	121,3	5	14,6	20,4	22,6	6,25	1,72	3,63
300	10,8	10	18,2	20,6	19,0	10,18	1,70	5,98
	44,7	10	19,8	20,4	19,4	9,32	1,71	5,45
	84,7	5	18,2	20,2	20,2	7,56	1,72	4,39
	108,0	5	12,8	20,2	20,3	7,21	1,72	4,19
	146,4	5	15,9	20,2	21,2	5,78	1,72	3,36
365	6,3	10	16,3	20,0	26,0	11,09	1,73	6,41
	41,8	10	18,1	20,3	25,7	9,98	1,72	5,79
	75,7	10	21,8	20,9	25,5	8,29	1,68	4,93
	96,5	5	12,7	21,1	25,1	7,11	1,67	4,26

Tabel VI - Vervolg

n (omw/min)	Mom (nin)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	TwoC	Tg ^o o	Ø _m (kg/sec)	С _ж (kg/m3)	Ø _m /O _x
400	7,6	10	14,6	20,6	25,1	12,40107	1,70	7,30107
	34,0	10	17,4	20,6	25,8	10,38	l,70	6,10
	74,1	10	21,5	21,2	26 , 1	8,40	1,68	5,00
	96,5	10	24,1	21,6	25,9	7,49	1,65	4,54
450	6,6	10	13,0	20,2	22,8	14,05	1,72	8,16
	37,8	10	15,7	20,2	22,9	11,61	1,72	6,76
	68,7	10	18,4	20,3	22,9	9,91	1,72	5,76
	101,3	10	22,5	20,3	23,0	8,11	1,72	4,71
500	12,1	10	12,5	20,4	19,8	14,78	1,72	8,59
	37,2	10	14,6	20,4	20,0	12,61	1,72	7,34
	73,3	5	9,3	20,4	,20,2	9,90	1,72	5,75
	102,2	5	10,5	20,4	20,9	8,76	1,72	5,09
550	5,1	10	11,1	20,6	22,8	16,51	1,70	9,72
	41,2	10	14,2	20,7	21,9	12,89	1,69	7,62
	83,7	10	17,8	20,8	22,0	10,29	1,68	6,12
	126,7	5	12,6	20,9	22,1	7,26	1,68	4,32

ł

Tabel VI	1 -	Verwerking	metingen	aan	Teepol-oplo	ssingen:	0,011%
----------	-----	------------	----------	-----	-------------	----------	--------

n (omw/min)	Mom (MIN)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Two	Tg ^o o	Ø _m (kg/sec)	C _x (kg/m ³)	ø _m /c _x
200	8,6	5	12,2	20,6	18,9	7,59.0-7	1,70	4,4610-7
	34,4	5	13,1	20,6	18,8	7,06	1,70	4,15
	55,4	5	13,9	20,4	18,4	6,67	1,71	3,90
	82,1	5	14,7	20,2	18,3	6,31	1,72	3,67
250	6,6	5	11,2	20,6	20,4	8,23	1,70	4,84
	32,7	5	11,4	20,7	20,2	8,09	1,69	4,79
	79,7	5	13,1	20,7	19,7	7,04	1,69	4,16
	101,3	5	14,1	20,4	19,2	6,56	1,71	3,84
300	15,8	10	19,2	20,2	19,2	9,62	1,72	5,60
	53,7	5	11,4	20,1	19,9	8,08	1,73	4,68
	97,2	5	13,8	20,0	20,5	6,67	1,73	3,85
	126,8	5	15,7	20,0	20,4	5,87	1,73	3,39
350	3,3	5	8,4	20,6	19,1	11,00	1,70	6,46
	26,4	5	9,1	20,5	19,1	10,18	1,70	5,98
	46,7	5	10,3	20,5	19,4	8,97	1,70	5,27
	64,2	5	11,1	20,5	19,8	8,30	1,70	4,89

Tabel VII - Vervolg

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Ť _₩ ^O C	Tg ^o C	Ø _m (kg/sec)	C (kg/m ³)	Ø _m /C _x
400	9,6	ÍO	14,3	20,2	22,3	12,8010-7	1,72	7,43.D ⁻⁷
	31,3	10	16,9	20,2	22,9	10,80	1,72	6,28
1	64,1	10	19,7	20,6	23,1	9,28	1,70	5,46
	99,9	10	21,9	20,8	23,4	8,33	1,69	4,93
450	4,9	10	13,5	20,5	19,9	13,65	1,70	8,04
	27,8	10	15,1	20,5	20,1	12,21	1,70	7,19
	50,7	10	17,2	20,4	20,1	10,71	1,71	6,26
1	65,9	10	19,0	20,4	20,1	9,70	1,71	5,67
500	4,17	10	12,1	20,1	19,4	15,30	1,73	8,84
	36,1	10	14,8	20,1	20,1	12,44	1,73	7,19
	82,4	10	19,2	20,1	20,9	9,56	1,73	5,53
	128,2	10	23,1	20,1	21,8	7,93	1,73	4,58
600	3,4	10	10,4	20,1	17,4	17,90	1,73	10,35
	32,1	10	13,3	20,1	18,0	13,95	1,73	8,05
	66,6	10	16,6	20,1	18,8	11,14	1,73	6,44
	103,9	10	21,0	20,0	18,9	8,81	1,73	5,10

Tabel VIII - Verwerking meting aan Teepol-oplossing: 0,034%

n (omw/min)	Mom (min)	Vol. (ml)	Tijd (sec)	Twc	TgoC	Ø _m (kg/sæ) .107	° kg/m≯	Ø _m /C _x
600	5,3	10	10,8	20,7	19,9	17,08	1,69	10,10
	25,7	10	12,5	20,7	20,0	14,75	1,69	8,73
	40,7	10	13,7	20,7	20,2	13,48	1,69	7,96
	6							

Tabel IX

No	n (omw/min)	T,°c	KAh (m ³ /sec)	KA t=0 (m ² sec)	K _{t=0} (m/sec)	$e_{(kg/m^3)}$	(Nsec/m ²)	(m ² /sec)	(m ² /sec)	nd ² Y	Etot. D ² . y ² .	$\frac{k-tot}{2/3} \sqrt{1/3}$	ARR	γ
1	148	20,5	4,09.10-7	3,80.10-7	'9,65.10 ⁻⁶	998	0,993.10-3	1,005.10-6	15,42.1010	0,77.104	2,46.102	7,22.1 0 ²	1,71.10-3	1,01.10"
2	198	19,9	4,44	4,45	11,27	998	1,007	1,026	15,19	1,01	2,88	8,45	1,74	1,05
3	247	19,6	5,10	4,96	12,94	998	1,015	1,032	15,08	1,25	3,28	9,72	1,75	1,06
4	298	20,0	6,29	6,10	15,46	998	1,005	1,020	15,20	1,53	3,92	11,65	1,74	1,04
5	356	20,6	6,21	6,40	16,22	998	0,991	1,000	15,47	1,86	4,14	12,11	1,70	1,00
6	390	21,2	7,66	7,25	18,40	998	0,977	0,980	15,72	2,08	4,69	13,70	1,67	0,96
7	450	20,3	8,10	8,00	20,30	998	0,997	1,010	15,34	2,32	5,15	15,21	1,72	1,02
8	505	20,0	8,98	8,90	22,60	998	1,005	1,020	15,20	2,59	5,74	17,00	1,74	1,04
9	545	20,2	10,93	10,30	26,15	998	1,000	1,015	15,30	2,81	6,63	19,52	1,72	1,03
10	595	20,6	11,61	11,70	29,70	998	0,991	1,000	15,47	3,11	7,56	22,20	1,70	1,00
	ana	an n	0 26	2.76	6.85	1055	1.50	1.421	11.96	0.74	1.66	5,32	1.27	2.02
10	200	20,0	29,20	3.11	7.90	1055				0.92	1,92	6,26		and the second
12	200	20,0 ·	7 00	3.00	9.90	1055				1.11	2,40	7.85		- 14
12	250	00 0	2.66	4.17	10.41	1055				1,29	2,53	8,22		
15.5	190	20,0	2.80	4.52	11.50	1055				1,55	2,79	9,10		
16	ARG	2010	3.57	A.64	11.79	1055				1,66	2,86	9,34		
17	500	20.0	4.64	5.11	12.96	1055				1,85	3,14	10,26		
19	550	20.0	4.56	5.50	13.96	1.055				2,03	3,39	11,02		
19	600	20,0	5,20	6,09	15,45	1055	1,50	1,421	11,96	2,21	3,74	12,21	1,27	2,02
					0.45	1004	0.55	2,350	8.70	1.00	1.86	6.98	1 08	
20	450	20,0	2,52	2,22	0,47	1004	6922			1.11	2.08	7.75	an g V Y . I	2,71
21	500	20,0	3,98	2,10	2,22	1004				1.22	2.36	8.74	-	
22	550	20,0	3,40	4,19	10,02	1004	0.55	0 750	8.70	1.34	2.47	9.24	17 00	
23	600	20,0	4,88	4,41	11,17	1084							1,09	2,24
0.4	605	20.0	2.78	3.69	9.36	1099	3.50	3,18	7,17	1,00	1,97	7,96	1.00	lio.i
06	650	20.0	2.71	3.98	10.10	1093	3,08	2,82	7,93	1,20	2,13	8,35	1.03	7.95
06	660	20.0	1.98	3.51	8.91	1092	3,00	2,74	7,91	1,01	1,91	7.43	11.03	7.50
27	504	20,0	1,85	3,46	8,78	1089	2,81	2,58	8,19	1,02	1,91	7,34	1,05	6,68
												<u> </u>		

$\frac{\text{k-tot.}}{\frac{2/3}{10} \cdot \gamma^{1/3}}$	<u>P</u>	$-\nu^2$	Gr	Sc Asia	(X _{V.C.})0	Ktot/(Ky.c.)o	Ktot-Kturb	K turb (Ky.c.)	K _{turb}	$\frac{K_{turb}}{p^{1/2} y^{1/2}}$	$\frac{K_{turb}}{D^{2/3} \sqrt{1/3}}$
7,22.102	1,71.10 ⁻³	1,01.10-12	18,7.107	0,651.103	5,76.10-6	1,67	0,580	1,09	6,28.10-6	1,60.102	4.71.10 ² %.5
8,45	1,74	1,05	18,3	0,676	5,50	2,04	0,498	1,56	8,59	2,16 12,1	6,45 36.2
9,72	1,75	1,06	18,2	0,685	5,50	2,35	0,395	1,95	10,72	2,72	8,05 41
11,65	1,74	1,04	18,5	0,671	5,60	2,76	0,300	2,46	13,80	3,50 161	10,40 18.3
12,11	1,70	1,00	18,8	0,646	5,77	2,81	0,287	2,52	14,53	3,72	10,88 61.0
13,70	1,67	0,96	19,2	0,623	5,82	3,16	0,228	2,93	17,08	4,35 24.4	12,70 7/.1
15,21	1,72	1,02	18,6	0,658	5,67	3,58	0,170	3,41	19,35	4,91 27,5	14,50 84.3
17,09	1,74	1,04	18,5	0,671	5,60	4,03	0,123	3,91	21,90	5,56 31.2	16,49 92.5
19,52	1,72	1,03	18,5	0,563	5,60	4,67	0,085	4,58	25,65	6,52 366	19,20 67
22,20	1,70	1,00	18,8	0,647	5,77	5,15	0,057	5,09	29,40	7,49 11,200	22,00 723
5,32	1,27	2,02	6,95	1,19	3,92	1,75	0,590	1,16	4,54	1,10 612	3,52 199
0,20 7 00						2,01	0,490	1,52	5,95	1,45 8,1	14,72 26,8
(****)						2,52	0,350	2,17	8,50	2,06 11,5	6,74 37./
0,24						2,66	0,320	2,34	9,16	2,23 12.5	7,24 40,5
391U						2,93	0,262	2,67	10,46	2,54 14.2	8,26 162
3,24 10.96						3,01	0,250	2,76	10,81	2,62 10/7	8,55 4.0.0
						3,31	0,202	3,11	12,20	2,96 16,6	9,66 14,7
L≟gU2 10.01 ·						3,65	0,171	3,39	13,30	3,23 10.1	10,51 129
*6961	1,27	2,02	6,95	1,19	3,92	3,94	0,132	3,81	14,94	3,62 20,3	11,81 6670
6, 98	1,00	5,51	2,18	2,70	2,59	3,26	0,210	3,05	7,90	1,74 0,03	6,51 365
8.74						3,62	0,165	3,45	8,94	1,98 /11	7,37 4/3
9.24						4,10	0,118	3,98	10,30	2,29 12.8	8,46 47,4
	1,0 9	2,51	2,18	2,70	2,59	4,31	0,102	4,21	10,89	2,40 /3.4	8,99 (b,M
7,96	1,00	10,1	1,09	4,44 -	2,00	4,68	0.085	1 50	91.0	T OZ JA	7 90 122
8,35	1,03	7,95	1,43	3,56 1	2,18	4.63	0,086	4923	2,70	200 ha	A TO NE R
7,43	1,03	7,50	1,52	3,46	2,23	4.00	0.125	+1)24 3 Q7	7,7V 0 67	2.95	7 16 16 2
7,34	1,05	6,68	1,74	3,15 []-	2,38	3.69	0.158	3.52	0,07	- 107 10.4	7 04 24.45

No	K (m/sec)	(oaw/min)	T _W d	(m^2/sec)	nd ^e V
28	11.71.10-6	205	20,1	0,988.10-6	1,09.1
29	13.16	250	20,2	0,991	1,32
30	15.85	300	20,3	0,995	1,58
31	17.78	365	20,5	1,002	1,91
32	19.05	400	21,0	0,984	2,13
 33	21.70	450	20,3	0,995	2,37
34	22,90	500	20,4	0,998	2,62
35	25,65	550	20,7	1,009	2,85
36	11,45	200	20,5	1,002	1,05
37	13,21	250	20,6	1,006	1,30
38	15,25	300	20,1	0,988	1,59
39	16,85	350	20,5	1,002	1,83
40	19,55	400	20,5	1,002	2,09
41	20,81	450	20,5	1,002 .	2,34
42	22,99	500	20,1	0,988	2,65
43	25,41	600	20,1	o , 988	3,18
44	27,20	600	20,7	1,009	3,11

<u>Tabel X</u> - derekeningen overdrachtscoëfficient als functie van Re voor Teepol-oplossingen.

D

N

 $\sqrt{}$

.







10 Deelstrepen is 15 m.m.

Druk N.V. "Mercurius", W'veer.



10 Deelstrepen is 15 m.m.

Druk N.V. "Mercurius", W'veer.



¹⁰ Deelstrepen is 15 m.m.







10 Deelstrepen is 15 m.m.

Druk N.V. "Mercurius", W'veer.



0001 0-0/ 1 V 0 V 0/ ∇ \odot Ó R 0 Ø Net JOIX Ø 0 0 0.0]

W

ылаяты пексовог. моючектек и^{нг}эхээ

metrupic var var Veer,

East min of much inspiratees to is m 0,8 The verwacht man let al $\frac{ded}{B} \iff \left(\frac{md^2}{V}\right)^{0,0} \left(\frac{V}{B}\right)^{0,1}$ of k in D1-a) y (d-0,8) Neemaan bat D met & Jamenbaugh Degreen DVP = constant / by count T) Du V-B mitra) w-Blind)

Wit de medany, mide we liger ligh see goede y 1 gen reachte Gen lighe volge

m

(not a) 1 = -1

$$d = 0, \beta = \beta + \alpha \beta = -1$$

 $Mm \ \alpha = \frac{1}{3} \ hrd 1 \ \beta = 0, 8$
 $d = \frac{1}{2} \ \mu \ \beta = 1, 4$

(wal b)

$$d = \frac{1}{2} \qquad \beta = 1.4 \qquad \text{Holyman Myany is}$$

$$f = 0.94 \qquad \text{Im } d = \frac{1}{3} \qquad \text{normal} \qquad \beta = 0.71 \qquad \text{Hankpu, is Jus h}$$

$$d = \frac{1}{2} \qquad \text{horder} \qquad \beta = 1.32 \qquad \text{Herb } \frac{1}{2} \qquad \text{Jerb} \qquad \frac{1}{3} \qquad \frac{1}{$$

a, i, dres heel at dolls beter · to Day do 1/2 -

2/8 100

$\frac{O}{V}$	
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	
(10,0) 2.58 (10,0) 2.58 (10,0) $(10,0)$	
(4) - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 -	
$\rightarrow p.66$	

2/0 160