
VISCOSITEIT VAN VLOEISTOFFEN

1) Inleiding

Viscositeit is een eigenschap van vloeistoffen (en gassen) die belang heeft voor de stromingseigenschappen van de vloeistof. Dit speelt een rol in allerlei domeinen. Zo hangt de smering van een motor sterk af van de juiste viscositeitseigenschappen van de smeerolie. Maar ook stroming door pijpleidingen of bloedvaten wordt hierdoor bepaald. Het begrip viscositeit geldt in principe zowel voor gassen als vloeistoffen.

2) De viscositeitscoëfficiënt η

Beschouw een vloeistof die zich tussen twee uitgestrekte evenwijdige platen bevindt. Wanneer men de eerste plaat tracht te verschuiven met een constante snelheid t.o.v. de andere dan zal de vloeistof tegenwerken. Hoe visceuser de vloeistof hoe meer ze zal tegenwerken.

De kracht F die nodig is om de plaat met een snelheid v te bewegen zal ons een maat geven voor de viscositeit van de vloeistof. Om tot een formule te komen gaan we als volgt te werk.

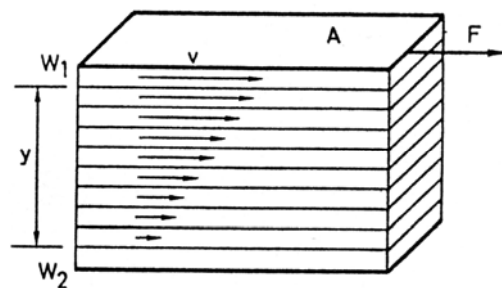
Vloeistofmoleculen vlak tegen de bovenste plaat zullen als het ware aan de plaat plakken en dus met dezelfde snelheid v meebewegen. De moleculen aan de onderste plaat hebben om dezelfde reden een snelheid nul. We kunnen ons de vloeistof voorstellen als zijnde opgebouwd uit verschillende evenwijdige laagjes met elk een snelheid die geleidelijk afneemt van boven naar beneden. Aangezien de kracht F evenredig is met de oppervlakte A en de snelheid v en omgekeerd evenredig met de platafstand y volgt :

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{v}{y} \quad (1)$$

Hierin is η de viscositeitscoëfficiënt van de vloeistof. Bepaal zelf uit de formule de eenheid van deze coëfficiënt. Eigenlijk is deze formule enkel geldig in het speciale geval dat de snelheid lineair toeneemt met de afstand tot de plaat. Dit is echter niet steeds het geval en daarom luidt de meer algemene formule :

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

In Tabel 1 vind je de viscositeitscoëfficiënt van enkele stoffen, en dit bij verschillende temperaturen. Wanneer je de gegevens nader bekijkt stel je vast dat de η voor vloeistoffen meestal daalt met stijgende T , terwijl bij gassen net het omgekeerde het geval is.



Figuur 1.

TABEL I					
Viscositeitscoëfficiënten in Pa s					
Temperatuur °C	Castorolie	Water	Lucht	Normaal bloed	Bloedplasma
0	5,3	$1,792 \times 10^{-3}$	$1,71 \times 10^{-5}$		
20	0,986	$1,002 \times 10^{-3}$	$1,81 \times 10^{-5}$	$3,015 \times 10^{-3}$	$1,810 \times 10^{-3}$
37	-	$0,6915 \times 10^{-3}$	$1,87 \times 10^{-5}$	$2,084 \times 10^{-3}$	$1,257 \times 10^{-3}$
40	0,231	$0,6529 \times 10^{-3}$	$1,90 \times 10^{-5}$		
60	0,080	$0,4665 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-5}$		
80	0,030	$0,3547 \times 10^{-3}$	$2,09 \times 10^{-5}$		
100	0,017	$0,2818 \times 10^{-3}$	$2,18 \times 10^{-5}$		

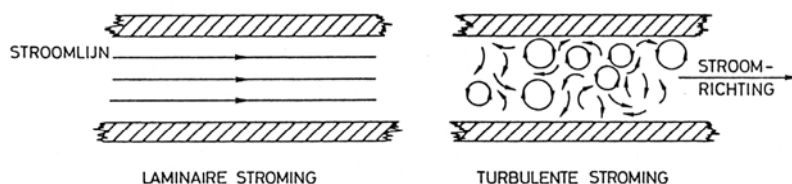
In praktische omstandigheden wordt de *kinematische wrijvingscoëfficiënt* ν gebruikt. De definitie hiervan is :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

Hierin is ρ de massadichtheid van de vloeistof. Bepaal opnieuw zelf de eenheid van ν . In oudere literatuur vindt men nog vaak CGS-eenheden : η werd uitgedrukt in *poise* wat gelijk is aan $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Voor ν gebruikte men *stokes* waarbij $1 \text{ stokes} = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

3) Laminaire stroming

Beschouwen we figuur 1. Zoals op de tekening te zien valt de vloeistof op te delen in laagjes met lineair toenemende snelheid naar boven toe. Wanneer de stroming op een dergelijke manier gebeurt spreken we van *laminaire stroming*. Deze situatie doet zich voor zolang de snelheid van de plaat voldoende klein is. Experimenteel kan men deze situatie zichtbaar maken door kleurstoffen toe te voegen aan de vloeistof. Wanneer de snelheid hoger wordt zal op een gegeven moment de stroming chaotisch worden en zullen de stroomlijnen niet meer evenwijdig lopen aan elkaar, maar zullen de verschillende laagjes in elkaar opmengen. Dit noemt men *turbulente stromingsregime*. In turbulente stroming wordt meer mechanische energie gedissipeerd dan bij laminaire. Meestal is dit ongewenst.



Figuur 2.

De overgang van laminair naar turbulent regime gebeurt bij een bepaalde snelheid v . Meestal wordt dit beschreven voor stroming in een lange cilindrische buis met straal R . Het stromingskarakter van de vloeistof wordt gegeven door de volgende dimensieloze grootheid :

$$Re = \frac{2R\rho v}{\eta} \quad (4)$$

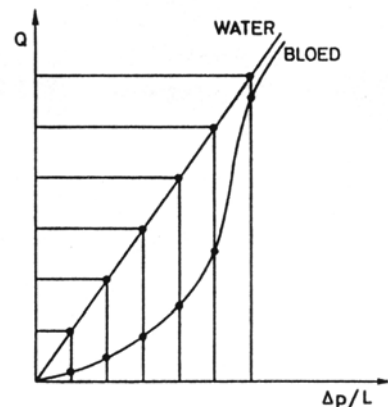
Deze grootheid noemt men het *getal van Reynolds*. Aangezien v in de teller staat wordt Re groter met toenemende snelheid wat betekent dat een grote Re duidt op een meer turbulente stroming. Voor $Re < 2000$ is de stroming laminair, voor $Re > 3000$ is ze turbulent. Voor $2000 < Re < 3000$ is de situatie onstabiel en zullen uitwendige invloeden de uiteindelijke stroming bepalen.

De laminaire stroming door cilindrische buizen werd bestudeerd door Poiseuille om de doorbloeding van bloedvaten beter te begrijpen. Stel dat over de uiteinden van een cilindrische buis met lengte L en straal R ($R \ll L$) een drukverschil Δp wordt aangelegd. Dan zal voor een vloeistof met viscositeitscoëfficiënt η een debiet Q door de buis stromen dat gegeven wordt door :

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{L} \quad (5)$$

Dit is de wet van Poiseuille. Figuur 3 toont een experimentele meting van het debiet voor verschillende waarden van $\Delta p/L$ voor resp. water en bloed. Volgens (5) zou dit een lineair verloop moeten geven. Maar voor bloed is dit duidelijk niet het geval. Vermits alle voorfactoren in (5) constanten zijn kan het niet anders dan dat η voor bloed niet constant is. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat bloed geen zuivere vloeistof is.

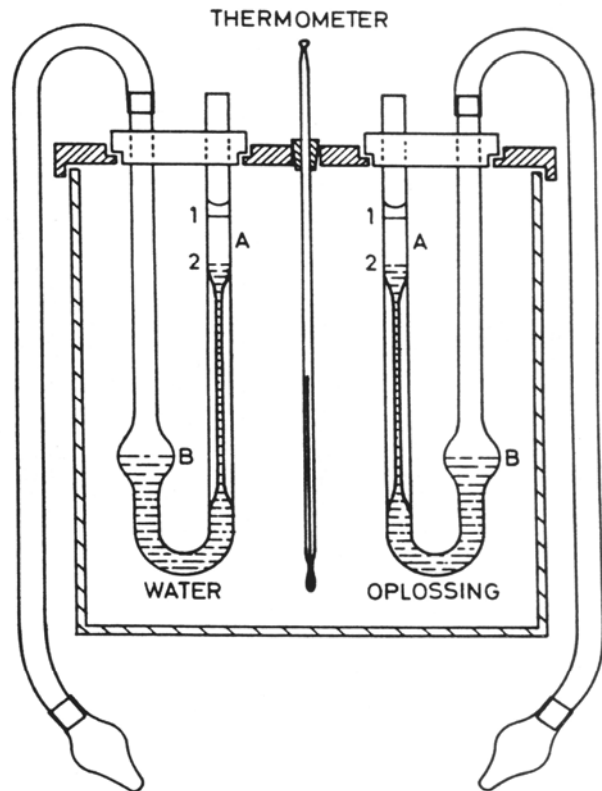
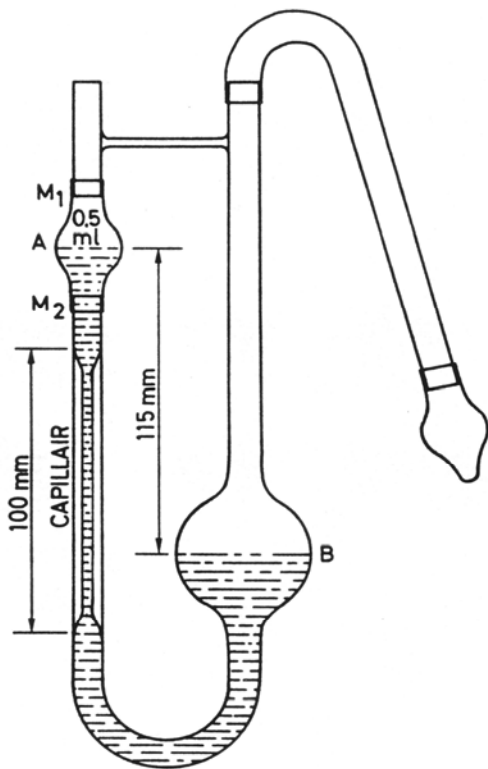
Zuivere vloeistoffen en oplossingen van kleine moleculen hebben een constante η en worden *newtoniaanse vloeistoffen* genoemd. Suspensies (deeltjes $> 0.1 \mu\text{m}$) en dispersies ($< 0.001 \mu\text{m}$) en andere vormen van oplossingen waarvoor deze lineariteit niet geldt zijn *niet-newtoniaanse vloeistoffen*.



Figuur 3.

4) Experimentele bepaling van η

Viscosimeters bestaan in allerlei uitvoeringen, al naargelang de aard van de vloeistof en de toepassing. Zo is er de viscosimeter van Hagen-Poiseuille die steunt op formule (5) die zonder referentievloeistof toelaat absolute viscositeiten te meten. Problemen hierbij zijn echter de duur en de omslachtigheid van de metingen. Bovendien is het moeilijk een constante temperatuur aan te houden in het volledige vloeistofvolume. Relatieve metingen die gebruik maken van een referentievloeistof zijn veel gemakkelijker en vaak voldoende nauwkeurig. Zuiver water is de meest gebruikte referentievloeistof omdat hiervan η nauwkeurig gekend is voor een groot temperatuursbereik. In het practicum wordt gebruik gemaakt van een dergelijke viscosimeter nl. die van Ostwald.



De viscosimeter van Ostwald staat recht op en met een pipet wordt reservoir B gevuld met een welbepaald volume vloeistof (vulvolume 3 cm^3). Door middel van een rubberdarm en een perspeertje P wordt de vloeistof uit het reservoir B via de nauwe doorgang (capillair genoemd) in reservoir A geperst tot het niveau net boven de merkstreep M_1 stijgt. Wanneer men loslaat zal de vloeistof een bepaalde *doorvloeitijd* t nodig hebben om te zakken van niveau M_1 tot M_2 . Hierbij fungeert het capillair als cilindrische buis. Voor een viskeuzere vloeistof zal dit moeilijker zijn en zal t dus groter zijn. Het volume tussen de merkstrepen is het *doorvloei volume* V en is eigen aan het apparaat. Hier bedraagt $V = 0.5 \text{ cm}^3$. Andere apparaatconstanten zijn de lengte l en de inwendige straal r van het capillair. En omdat het vulvolume ook steeds hetzelfde genomen wordt kan het gemiddeld niveauverschil h tussen de vloeistofniveaus in reservoirs A en B ook als een apparaatconstante beschouwd worden. Dan kan het gemiddeld drukverschil Δp geschreven worden als $\Delta p = h\rho g$. Met de wet van Poiseuille geeft dit voor het doorvloei volume V :

$$V = Q t = \frac{\pi r^4 h \rho g}{8\eta l} t \quad (6)$$

Als we nu alle constanten groeperen tot de *viscosimeterconstante* K :

$$K = \frac{\pi r^4 h g}{8lV} \quad (7)$$

dan wordt de viscositeitscoëfficiënt :

$$\eta = K \rho t \quad (8)$$

5) Werkopdracht

De opdracht bestaat uit drie delen :

Eerst dient de viscosimeter van Ostwald gekalibreerd te worden. Hiertoe wordt de viscositeitsconstante K bepaald met als ijkvloeistof zuiver water.

Let op : de viscosimeters zijn afgesloten met een stop om verontreiniging tegen te gaan. Vergeet deze niet te verwijderen voor de meting, en terug te plaatsen erna.

Vervolgens wordt de viscositeitscoëfficiënt η van een zuivere vloeistof of oplossing bepaald bij kamertemperatuur.

Tot slot wordt een grafiek gemaakt en worden conclusies getrokken.

a) Kalibratie : Om K te bepalen wordt gedistilleerd water gebruikt als ijkvloeistof. Noteer de temperatuur T van het bad tot op 0.05°C nauwkeurig en meet zes maal de doorvloeitijd t_w voor het water. Doe dit zo snel mogelijk na elkaar (waarom?). Voor de tijdsbepaling geldt dat er wordt afgelezen tot op 0.2s nauwkeurig.

Bereken de gemiddelde waarde \bar{t}_w en de gemiddelde fout en de bijhorende relatieve fout.

De massadichtheid van gedistilleerd water is $\rho_w = 1.000 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3} \pm 0.002 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

De viscositeit η_w bij de gemeten temperatuur lees je af in Tabel 2.

Nu kan je met formule 7 K bepalen.

b) Meting η : Nu het toestel gekalibreerd is kunnen we de viscositeit η van een andere oplossing meten. Meet opnieuw de temperatuur van het bad en meet zes maal de doorvloeitijd t_{opl} . Bereken \bar{t}_{opl} en de gemiddelde AF en RF. De massadichtheid ρ_{opl} wordt tijdens het practicum zelf gegeven.

c) Verwerk de gegevens in Tabel 2 tot een grafiek die conform is aan de richtlijnen voor grafieken. Gebruik hiervoor de waarden voor 15, 16, ..., 22 graden.

Viscositeit η van water (in 10^{-3} Pa s) als functie van temperatuur T (in $^{\circ}\text{C}$)

T	η	T	η	T	η	T	η
15.00	1.1385	17.50	1.0668	20.00	1.0019	22.50	0.9432
15.05	1.1370	17.55	1.0654	20.05	1.0007	22.55	0.9421
15.10	1.1355	17.60	1.0640	20.10	0.9995	22.60	0.9410
15.15	1.1340	17.65	1.0627	20.15	0.9983	22.65	0.9399
15.20	1.1325	17.70	1.0613	20.20	0.9970	22.70	0.9388
15.25	1.1310	17.75	1.0600	20.25	0.9958	22.75	0.9377
15.30	1.1295	17.80	1.0586	20.30	0.9946	22.80	0.9366
15.35	1.1280	17.85	1.0573	20.35	0.9934	22.85	0.9355
15.40	1.1265	17.90	1.0559	20.40	0.9922	22.90	0.9344
15.45	1.1251	17.95	1.0546	20.45	0.9909	22.95	0.9333
15.50	1.1236	18.00	1.0533	20.50	0.9897	23.00	0.9322
15.55	1.1221	18.05	1.0519	20.55	0.9885	23.05	0.9311
15.60	1.1206	18.10	1.0506	20.60	0.9873	23.10	0.9300
15.65	1.1191	18.15	1.0493	20.65	0.9861	23.15	0.9289
15.70	1.1177	18.20	1.0479	20.70	0.9849	23.20	0.9278
15.75	1.1162	18.25	1.0466	20.75	0.9837	23.25	0.9267
15.80	1.1147	18.30	1.0453	20.80	0.9825	23.30	0.9256
15.85	1.1133	18.35	1.0440	20.85	0.9813	23.35	0.9245
15.90	1.1118	18.40	1.0427	20.90	0.9801	23.40	0.9235
15.95	1.1104	18.45	1.0414	20.95	0.9790	23.45	0.9224
16.00	1.1089	18.50	1.0400	21.00	0.9778	23.50	0.9213
16.05	1.1075	18.55	1.0387	21.05	0.9766	23.55	0.9202
16.10	1.1060	18.60	1.0374	21.10	0.9754	23.60	0.9191
16.15	1.1046	18.65	1.0361	21.15	0.9742	23.65	0.9181
16.20	1.1031	18.70	1.0348	21.20	0.9730	23.70	0.9170
16.25	1.1017	18.75	1.0335	21.25	0.9719	23.75	0.9159
16.30	1.1003	18.80	1.0322	21.30	0.9707	23.80	0.9149
16.35	1.0988	18.85	1.0309	21.35	0.9695	23.85	0.9138
16.40	1.0974	18.90	1.0297	21.40	0.9684	23.90	0.9128
16.45	1.0960	18.95	1.0284	21.45	0.9672	23.95	0.9117
16.50	1.0946	19.00	1.0271	21.50	0.9660	24.00	0.9106
16.55	1.0932	19.05	1.0258	21.55	0.9649	24.05	0.9096
16.60	1.0917	19.10	1.0245	21.60	0.9637	24.10	0.9085
16.65	1.0903	19.15	1.0233	21.65	0.9626	24.15	0.9075
16.70	1.0889	19.20	1.0220	21.70	0.9614	24.20	0.9064
16.75	1.0875	19.25	1.0207	21.75	0.9603	24.25	0.9054
16.80	1.0861	19.30	1.0194	21.80	0.9591	24.30	0.9043
16.85	1.0847	19.35	1.0182	21.85	0.9580	24.35	0.9033
16.90	1.0833	19.40	1.0169	21.90	0.9568	24.40	0.9023
16.95	1.0819	19.45	1.0156	21.95	0.9557	24.45	0.9012
17.00	1.0805	19.50	1.0144	22.00	0.9545	24.50	0.9002
17.05	1.0791	19.55	1.0131	22.05	0.9534	24.55	0.8991
17.10	1.0777	19.60	1.0119	22.10	0.9523	24.60	0.8981
17.15	1.0764	19.65	1.0106	22.15	0.9511	24.65	0.8971
17.20	1.0750	19.70	1.0094	22.20	0.9500	24.70	0.8960
17.25	1.0736	19.75	1.0081	22.25	0.9489	24.75	0.8950
17.30	1.0722	19.80	1.0069	22.30	0.9477	24.80	0.8940
17.35	1.0709	19.85	1.0057	22.35	0.9466	24.85	0.8930
17.40	1.0695	19.90	1.0044	22.40	0.9455	24.90	0.8919
17.45	1.0681	19.95	1.0032	22.45	0.9444	24.95	0.8909
17.50	1.0668	20.00	1.0019	22.50	0.9432	25.00	0.8899

Naam :
Volgnummer :

Richting :
Datum :

VISCOSITEIT VAN VLOEISTOFFEN

1) Kalibratie :

$$T_{\text{bad}} = \text{_____} \pm \text{_____}$$

t_w	AF

berekening K :

$$K = \text{_____}$$

2) Viscositeitsmeting :

$$T_{\text{bad}} = \text{_____} \pm \text{_____}$$

t_{opl}	AF

berekening η :

$$\eta = \text{_____}$$

Grafiek op de achterzijde van dit blad !!