

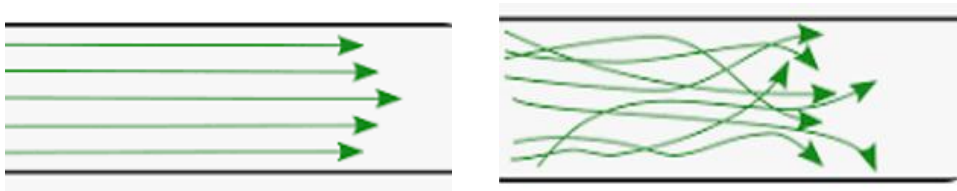
Práca 8 VISKOZITA

Úloha 8.1 Meranie viskozity kvapalín kapilárnym (Ubbelohdeho) viskozimetrom

Úloha 8.2 Meranie viskozity kvapalín telieskovým (Höpplerovým) viskozimetrom

Tekutiny je spoločný pojem pre kvapaliny a plyny. Od tuhých látok sa tekutiny líšia pohyblivosťou častíc.

Pri prúdení kvapaliny sa stretávame s pojmom **prúdnic**a - je to myslená čiara, ktorej smer je v každom bode totožný so smerom rýchlosti prúdenia tekutiny (šírky na obrázku 8.1).



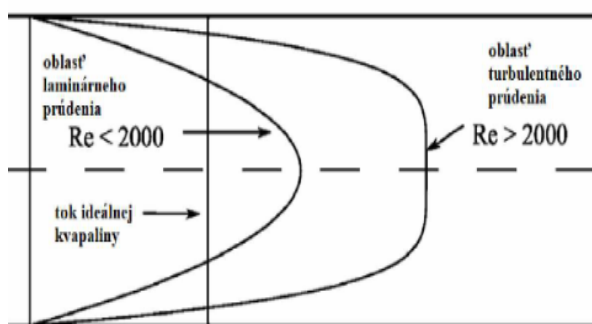
a b

Obrázok 8.1 Druhy prúdení tekutín: **a** - laminárne, **b** - turbulentné

V kvapalinách a plynoch možno pozorovať dva druhy prúdenia:

- **laminárne** - pri ktorom sa jednotlivé prúdnice v kvapaline nekrižujú, klžu po sebe (obrázok 8.1a, 8.2).

Ak kvapalina prúdi v trubici, pri stenách trubice sa pohybuje najmenšou rýchlosťou. Po nej sa pohybuje ďalšia vrstva a zase ďalšia, vždy s väčšou rýchlosťou. Najrýchlejšie sa pohybuje kvapalina v strede trubice. Takéto prúdenie reálnej kvapaliny si môžeme predstaviť ako posúvanie vrstiev tekutiny po sebe. Rozloženie rýchlostí laminárne prúdiacej kvapaliny v trubici (tzv. rýchlostný profil) pri takomto prúdení je parabolický a je znázornený na obrázku 8.2.



Obrázok 8.2 Rýchlostné profily prúdení kvapalín

- **Turbulentné** - pri ňom dochádza k vzájomnému premiešavaniu vrstiev a vzniku vírov - turbulencií (obrázok 8.1b a 8.2). Turbulentné prúdenie je nestacionárne.

Každá rýchlejšie pohybujúca sa vrstva kvapaliny pri laminárnom prúdení (obrázok 8.2), musí prekonať tangenciálne napätie (τ), ktoré závisí od veľkosti **gradiendu rýchlosti** - dv/dy a

konštanty - η vzťah (1). Tangenciálne napätie je podiel sily (F), ktorá prekoná odpor proti laminárnemu prúdeniu kvapaliny s povrchom (S) a konštantným gradientom rýchlosti:

$$\tau = \frac{dv}{dy} \eta \quad \tau = \frac{F}{S} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

τ je tangenciálne napätie [Pa]

dv/dy je gradientu rýchlosti - zmena rýchlosti v smere kolmom na smer samotnej rýchlosti

η je konštanta = dynamická viskozita [Pa s]

F je sila [N]

S je plocha [m²]

Fyzikálna vlastnosť, ktorá charakterizuje odpor tekutín proti prúdeniu sa nazýva viskozita (**vnútorné trenie**). Viskozita sa môže pozorovať iba v pohybujúcich sa kvapalinách a plynch. Viskozita jednotlivých kvapalín a roztokov závisí od:

- chemickej štruktúry
- teploty - zvyšovaním teploty viskozita látok klesá
- tlaku - zvyšovaním tlaku viskozita látok rastie

Viskozita

Dynamická viskozita (η) sa rovná sile, ktorá udelí vrstvám kvapaliny s jednotkovou plochou, vzdialeným v smere kolmom na smer prúdenia o jednotku dĺžky, jednotkový rozdiel rýchlostí. Základnou jednotkou dynamickej viskozity je Pa s.

Fluidita (tekutosť - f) je prevrátenou hodnotou dynamickej viskozity:

$$f = \frac{1}{\eta} \quad [\text{Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}] \quad (2)$$

Kinematická viskozita (ν) je podiel dynamickej viskozity (η) a hustoty kvapaliny (ρ):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{m}^2 \text{ s}^{-1}] \quad (3)$$

Kritériom na určenie druhu prúdenia je **Reynoldsovo číslo - Re**:

$$Re = \frac{\rho \nu d}{\eta} \quad [\text{bez rozmeru}] \quad (4)$$

ρ je hustota kvapaliny [kg m⁻³]

ν je stredná rýchlosť kvapaliny (cez prierez potrubia) [m s⁻¹]

η je dynamická viskozita [Pa s = kg m⁻¹ s⁻¹]

d je priemer potrubia [m]

Pri malých hodnotách ($Re < 2000$) je prúdenie laminárne, pri vyšších hodnotách je turbulentné. Reynoldsovo číslo sa používa ako kritérium pri predpovedi charakteru prúdenia pri rôznych podmienkach.

Pri viskozitných meraniach treba dodržať podmienky laminárneho prúdenia.

Metóda na stanovenie viskozity sa nazýva **viskozimetria**.

Viskozita sa meria **viskozimetrami**, ktoré pracujú na rôznych princípoch:

- **Kapilárne viskozimetre** - pri stanovení sa meria čas, za ktorý pretečie kapilárrou pri konštantnom tlaku a teplote určitý objem kvapaliny.
- **Telieskové viskozimetre** - stanovenie je založené na meraní času, za ktorý teliesko (gulôčka) prekoná vzdialenosť medzi dvoma ryskami v trubici so skúmanou kvapalinou.

- **Rotačné viskozimetre** - viskozita sa zisťuje meraním odporu, ktorý kvapaliny kladú otáčavému pohybu vhodne zvolených telies.
- **Vibračné viskozimetre** - pri meraní využívajú tlmiace schopnosti tekutiny ako dôsledok jej viskozity.

Úloha 8.1 Meranie viskozity kvapalín kapilárnym (Ubbelohdeho) viskozimetrom

Kapilárne viskozimetre využívajú na meranie viskozity Poiseuillov zákon, podľa ktorého je objem kvapaliny (V), ktorý pretiekol za čas (t) kapilárou s polomerom (r) a dĺžkou (ℓ) rovný:

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta \ell} t \quad [\text{m}^3] \quad (5)$$

Rozdiel tlakov Δp (tlakový spád) medzi začiatkom a koncom trubice:

$$\Delta p = \Delta h \rho g \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

Δh je rozdiel výšok [m]

ρ je hustota kvapaliny [kg m^{-3}]

g je tiažové zrýchlenie $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$

Po dosadení vzťahu (6) do (5) a jeho úpravou dostaneme pre dynamickú viskozitu vzťah:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta h g}{8 V \ell} \rho t \quad [\text{Pa s}] \quad (7)$$

Zlomok vo vzťahu (7) možno zahrnúť do **kapilárnej konštanty viskozimetra** - ktorú označíme A , potom pre výpočet dynamickej viskozity kvapalín dostaneme výsledný vzťah:

$$\eta = A \rho t \quad [\text{Pa s}] \quad (8)$$

Podmienkou merania pri všetkých kapilárnych viskozimetroch je laminárne prúdenie. Kvôli odchýlkam od laminárneho prúdenia zaviedol Hagen korekciu tejto rovnice jej rozšírením o člen s konštantou B :

$$\eta = A \rho t - \frac{B \rho}{t} \quad [\text{Pa s}] \quad (9)$$

Na laboratórnom cvičení však budeme používať zjednodušený vzťah pre kinematickú viskozitu:

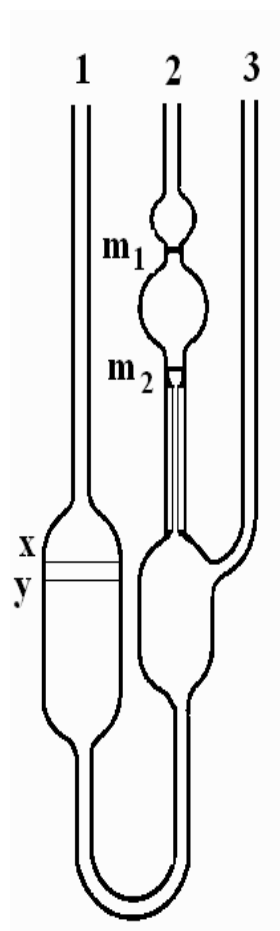
$$\nu = A t - \frac{B}{t} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

Cieľ práce

Stanoviť kinematickú a dynamickú viskozitu troch pripravených roztokov so známou hustotou kapilárnym Ubbelohdeho viskozimetrom.

Pomôcky

Ubbelohdeho viskozimeter, vodná výveva, stopky, roztoky pripravené na meranie, teplomer, destilovaná voda.



Obrázok 8.3.

Ubbelohdeho viskozimeter

Postup

Na viskozimetrické merania budete používať Ubbelohdeho viskozimeter - obrázok 8.3.

Pri meraní viskozity týmto viskozimetrom sledujem prúdenie kvapaliny v trubici (2), ktorá má v spodnej časti kapiláru. Nad kapilárou je trubica rozšírená časť trubice ohraničená ryskami m_1 a m_2 . Objem ľubovoľnej kvapaliny medzi ryskami je vždy rovnaký. Meriame čas, za ktorý objem kvapaliny pretečie kapilárou.

1. Čistý a suchý viskozimeter upevnite tak, aby bol v zvislej polohe.
2. Najprv odmerajte dobu prietoku destilovanej vody tak, že viskozimeter naplníte destilovanou vodou cez trubicu (1) tak, aby bola hladina medzi ryskami (označenie x-y).
3. Na koniec trubice (2) viskozimetra nasadíte hadičku vodnej vývevy a prstom uzatvorte trubicu (3). Nasajte kvapalinu tak, aby siahala nad hornú rysku trubice (m_1). Potom uvoľnite obe trubice (prst z trubice 3 a vodnú vývevu z trubice 2).
4. Stopkami odmerajte dobu prietoku destilovanej vody (t) od hornej rysky (m_1) po spodnú rysku (m_2).
5. Meranie destilovanej vody urobte 3-krát a namerané hodnoty (t) zapíšte do tabuľky 8.1.
6. Po skončení meraní viskozimeter opatrne zložte zo stojana, destilovanú vodu vylejte, viskozimeter vysušte vývevou a pripevnite späť na stojan.

7. Rovnako ako pre vodu postupujte pri meraniach pripravených roztokov (opakujte body 2-6). Dobu prietoku roztokov merajte ako pri vode 3-krát a hodnoty zapisujte do tabuľky 8.1.

8. Po skončení meraní roztok vylejte z viskozimetra, opláchnite ho vodou a upevnite na stojan

9. Odmerajte teplotu roztokov (t) a hodnotu zapíšte do tabuľky 8.1.

Spracovanie výsledkov

Do tabuľky 8.1 doplňte a vypočítajte:

1. Priemerné doby prietoku destilovanej vody a všetkých roztokov - $\bar{t}$ [s].
2. Hustotu destilovanej vody pri nameranej teplote roztokov z tabuľky 8.2.
3. Hustoty roztokov odpište zo štítkov na fľašiach.

4. Z kinematickej viskozity vody (ν), ktorú odčítate pre odmeranú teplotu z tabuľky 8.2, hustoty destilovanej vody a priemernej doby prietoku vody ($\bar{t}$), vypočítajte konštantu A pre použitý viskozimeter podľa vzťahu (10).

5. Hodnotu konštanty B nájdete pri práci.

6. Vypočítanú hodnotu konštanty A zapíšte do tabuľky 8.1.

7. Podľa vzťahu (10) vypočítajte kinematické viskozity meraných roztokov (ν).

8. Kinematické viskozity (ν) prepočítajte na dynamické viskozity (η) - vzťah (3).

Tabuľka 8.1 Namerané a vypočítané hodnoty na stanovenie viskozity Ubbelohdeho kapilárnym viskozimetrom

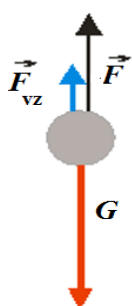
$t = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$ $B = \dots\dots\dots$ $A = \dots\dots\dots$

kvapalina	t [s]	$\bar{t}$ [s]	ρ [kg m ⁻³]	ν [m ² s ⁻¹]	η [Pa s]
destil. voda					
roztok 1					
roztok 2					
roztok 3					

Tabuľka 8.2 Hodnoty hustoty, kinematickej a dynamickej viskozity destilovanej vody pri rôznych teplotách

t [°C]	ρ_{voda} [kg m ⁻³]	ν [m ² s ⁻¹]	η [Pa s]	t [°C]	ρ_{voda} [kg m ⁻³]	ν [m ² s ⁻¹]	η [Pa s]
15	999,099	1,140.10 ⁻⁶	1,139.10 ⁻³	23	997,539	0,932.10 ⁻⁶	0,932.10 ⁻³
16	998,943	1,112.10 ⁻⁶	1,109.10 ⁻³	24	997,297	0,911.10 ⁻⁶	0,911.10 ⁻³
17	998,775	1,082.10 ⁻⁶	1,081.10 ⁻³	25	997,044	0,890.10 ⁻⁶	0,891.10 ⁻³
18	998,596	1,054.10 ⁻⁶	1,053.10 ⁻³	26	996,784	0,870.10 ⁻⁶	0,871.10 ⁻³
19	998,405	1,029.10 ⁻⁶	1,027.10 ⁻³	27	996,513	0,851.10 ⁻⁶	0,851.10 ⁻³
20	998,204	1,004.10 ⁻⁶	1,002.10 ⁻³	28	996,234	0,832.10 ⁻⁶	0,832.10 ⁻³
21	997,993	0,987.10 ⁻⁶	0,978.10 ⁻³	29	995,945	0,815.10 ⁻⁶	0,815.10 ⁻³
22	997,771	0,964.10 ⁻⁶	0,955.10 ⁻³	30	995,647	0,797.10 ⁻⁶	0,798.10 ⁻³

ÚLOHA 8.2 Meranie viskozity kvapalín telieskovým (Höpple-rovým) viskozimetrom



Meranie viskozity telieskovými viskozimetrami je založené na meraní rýchlosti pohybu známeho telieska v tekutine a táto rýchlosť je ovplyvnená viskozitou meranej kvapaliny.

Kvapaliny v dôsledku vnútorného trenia kladú odpor proti pohybu tuhých telies. Keď sa v kvapaline pohybuje guľôčka s hmotnosťou (m) polomerom (r), rýchlosťou ($\vec{v}$), pôsobia na ňu nasledovné sily - obrázok 8.4.

- **Tiažová sila** (G) pôsobí zvislo nadol a vypočíta sa podľa vzťahu:

Obrázok 8.4 Sily pôsobiace na tuhé teleso v kvapaline

$$G = m_s g = V \rho_s g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_s g \quad [\text{N}] \quad (11)$$

- Podľa Archimedovho zákona je teleso ponorené do kvapaliny nadľahčované **vztlakovou silou** (F_{vz}), ktorá sa rovná tiaži kvapaliny vytlačenej telieskom. Vztlaková sila pôsobí v opačnom smere ako tiažová sila (G) a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$F_{vz} = m_\ell g = V \rho_\ell g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_\ell g \quad [\text{N}] \quad (12)$$

- Reálna kvapalina s viskozitou (η) kladie odpor pohybu telieska.

Silu odporu prostredia (F), ktorá pôsobí proti smeru pohybu guľôčky vyjadruje **Stokesov vzťah**:

$$\vec{F} = 6 \pi \eta r \vec{v} \quad [\text{N}] \quad (13)$$

m_i sú hmotnosti telieska (guľôčky - S) alebo kvapaliny - ℓ [kg]

ρ_i sú hustoty kvapaliny (ρ_ℓ) alebo guľôčky (ρ_s) [kg m⁻³]

g je tiažové zrýchlenie

η je dynamická viskozita [Pa s]

$\vec{v}$ je rýchlosť pádu guľôčky [m s⁻¹]

Pohyb guľôčky je na začiatku zrýchlený. Po určitom čase výslednica všetkých troch síl pôsobiacich na guľôčku nadobudne nulovú hodnotu a pohyb guľôčky bude rovnomerný, čo popisuje vzťah (14).

$$G - F_{vz} - F = 0 \quad (14)$$

Po dosadení vzťahov (11)-(13) do (14), dostaneme:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_s g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_\ell g - 6 \pi \eta r \vec{v} = 0 \quad (15)$$

Ak za rýchlosť dosadíme:

$$\vec{v} = \frac{s}{t} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (16)$$

s je dráha pohybu guľôčky [m]

t je doba pádu guľôčky [s]

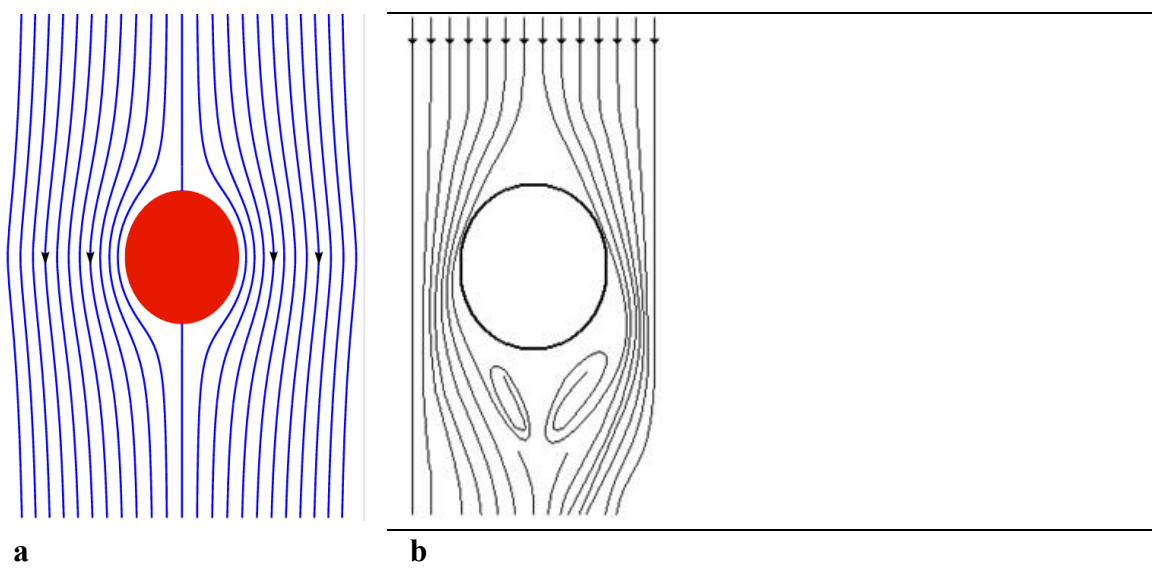
Úpravou vzťahu (15) dostaneme pre dynamickú viskozitu vzťah (17):

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{s} (\rho_s - \rho_\ell) t \quad [\text{Pa s}] \quad (17)$$

Táto teória platí v ideálnom prípade - pri laminárnom prúdení (obrázok 8.5a). Ak padá v kvapaline guľôčka, ktorej priemer je o niečo menší ako je priemer trubice viskozimetra, spôsobuje vírenie kvapaliny (obrázok 8.5b).

Po vložení guľôčky do trubice viskozimetra sa meria čas pádu guľôčky v kvapaline medzi dvomi značkami. Podmienkou je, aby pohyb guľôčky medzi značkami bol rovnomerný. Matematicky sa tento problém vyrieši zavedením konštanty viskozimetra (**K**):

$$K = \frac{2 \pi r^2 g}{9 s} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-2}] \quad (18)$$



Obrázok 8.5 Prúdnice pri obtekaní tuhého telieska v prúdiacej kvapaline
a - bez vnútorného trenia, **b**-s vnútorným trením

Po zavedení konštanty viskozimetra (**K**) do vzťahu (17), viskozita meraných roztokov sa vypočíta podľa vzťahu (19):

$$\eta = K (\rho_s - \rho_\ell) t \quad [\text{Pa s}] \quad (19)$$

Cieľ práce

Stanoviť viskozitu troch pripravených roztokov Höpplerovým telieskovým viskozimetrom

Pomôcky

Höpplerov telieskový viskozimeter, stopky, roztoky na meranie, destilovaná voda, sitko, sklenená nádobka na odpad

Postup

Merania viskozity budete robiť Höpplerovým telieskovým viskozimetrom (obrázok 8.6). Set na viskozimetrické meranie obsahuje okrem samotného viskozimetra sadu guľôčok.

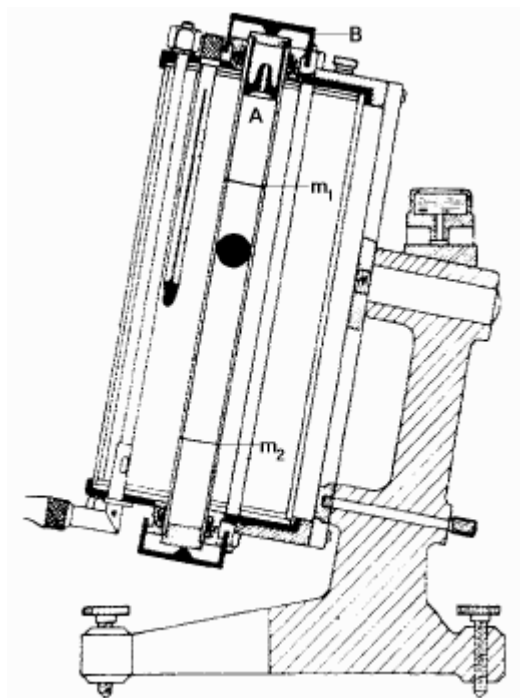
1. Pred meraním skontrolujte, či je viskozimeter čistý.
2. Z jednej strany uzatvorte viskozimeter zátkou a kovovou skrutkou **B**.
3. Po otočení sklenej časti viskozimetra o 180 °naplňte trubicu **A** najprv destilovanou

vodou.

4. Do trubice vložte guľôčku, trubicu doplňte po okraj destilovanou vodou a opäť zatvorte zátkou.

5. Skontrolujte, či v trubici **A** nie sú bublinky.

Ak bublinky v trubici sú, treba jednu zo zátok uvoľniť, doplniť systém vodou a znovu zazátkovať.



Obrázok 8.6 Höpplerov telieskový viskozimeter

6. Ak bublinky v trubici nie sú, pripravte si stopky a otočte viskozimeter do zvislej polohy, aby guľôčka mohla padat'. Keď sa guľôčka spodným meniskom (okrajom) dotkne hornej rysky na meracej trubici (**m₁**), spustíte stopky. Meranie ukončíte (vypnete stopky), keď sa ten istý bod guľôčky dotkne spodnej rysky (**m₂**).

7. Celý postup opakujte 3-krát a hodnoty doby pádu guľôčky zapisujte do tabuľky 8.3.

8. Po skončení meraní destilovanej vody zátky viskozimetra postupne odskrutkujte, kvapalinu vylejte do sklenenej misky a guľôčku zachyťte do sitka, aby sa nerozbila.

9. Viskozimeter opláchnite prvým roztokom a naplňte ho ním rovnako ako pri meraní destilovanej vody. Ak je trubica viskozimetra bez bubliniek, merajte 3-krát dobu pádu guľôčky v roztoku.

Rovnako postupujte pri meraniach ostatných roztokov.

10. Všetky namerané hodnoty zapisujte do tabuľky 8.3.

11. Odmerajte teplotu roztokov.

12. Po skončení meraní trubicu viskozimetra opláchnite destilovanou vodou a všetky pomôcky odložte.

Spracovanie výsledkov

Do tabuľky 8.3 doplňte a vypočítajte:

1. Priemerné doby pádu guľôčky v destilovanej vode a vo všetkých roztokoch - $\bar{t}$ [s].
2. Hustotu vody pre odmeranú teplotu roztokov (t), odpíšte z tabuľky 8.2.
3. Hustotu guľôčky (ρ_s) odpíšte z krabičky na guľôčku a hustoty roztokov zo štítkov na fľašiach (ρ_ℓ).
4. Zo známej dynamickej viskozity a hustoty destilovanej vody pri teplote merania, ktoré odčítate z tabuľky 8.2 a doby pádu guľôčky vo vode vypočítajte konštantu (K) pre používaný viskozimeter podľa vzťahu (19) a zapíšte ju do tabuľky 8.3.

Tabuľka 8.3 Namerané a vypočítané hodnoty na stanovenie viskozity Höpplerovým telieskovým viskozimetrom

$t = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$ $\rho_s = \dots\dots\dots \text{kg m}^{-3}$ $K = \dots\dots\dots$

kvapalina	t [s]	$\bar{t}$ [s]	ρ_ℓ [kg m ⁻³]	η [Pa s]	ν [m ² s ⁻¹]
destil. voda					
roztok 1					
roztok 2					
roztok 3					

5. Podľa vzťahu (19) vypočítajte dynamické viskozity meraných roztokov (η).
6. Kinematické viskozity (ν) vypočítajte podľa vzťahu (3).
7. Nakreslite závislosť $\eta_{\text{roztokov}} = f(\rho_{\text{roztokov}})$ pre všetky merané kvapalín Ubbelohdeho aj Höpplerovým viskozimetrom.
8. V závere vyhodnoťte, ako sa mení viskozita roztokov s ich hustotou.