

# FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

## Fyzikální praktikum 1

**Zpracoval:** Lukáš Lejdar

**Naměřeno:** 16. dubna

**Obor:** F

**Skupina:** Út 16:00

**Testováno:**

Úloha č. 3:

**Měření viskozity, hustoty a povrchového napětí kapalin**

$T = 21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

$p = 101,35\text{ kPa}$

$\varphi = 47,7\text{ }\%$

## 1. Úvod

Úloha je zaměřená na základní mechanické vlastnosti kapalin a metody jejich měření. Pokusím se ty nejdůležitější veličiny nejdřív krátce shrnout.

I v kapalině probíhá efekt podobný tření. Molekuly proudící blízko sebe spolu různě interagují a mají tendenci svoji rychlost srovnávat. Tento efekt popisuje Newtonův zákon pro laminárně proudící kapaliny zavedením **dynamické viskozity**  $\eta$ , jako konstantu přímé úměry

$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy}, \quad (1)$$

kde  $\tau$  je smykové napětí mezi vrstvami kapaliny a  $\frac{dv_x}{dy}$  je derivace rychlosti proudění kapaliny ve směru normály k rovině smykového napětí  $\tau$ . S dynamickou viskozitou se často setkáme v podílu s hustotou kapaliny. Konvenčně tuto veličinu definujeme jako **Kinematickou viskozitu**  $\nu$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

Další důležitou vlastností kapalin je tzv. **povrchové napětí**  $\sigma$ . Definujeme ho jako sílu působící v rovině povrchu kapaliny, kolmo na libovolnou délkovou jednotku v povrchu kapaliny, vztaženou na tuto délku.

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad (3)$$

Podle Fowkese a van Osse et al. působí v povrchové vrstvě různé mezimolekulární síly, které aditivně přispívají k celkovému povrchovému napětí. Většinu z nich lze zahrnout do dvou větších kategorií acidobazických interakcí a Van der Walsových sil.

$$\sigma = \sigma^{\text{lw}} + \sigma^{\text{ab}} \quad (4)$$

## 2. Teorie

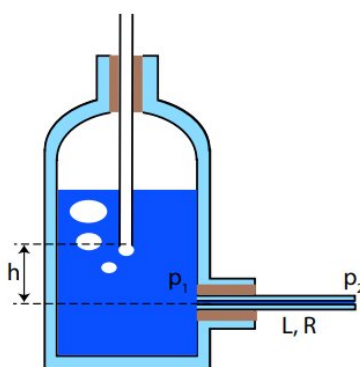
### 2.1. Absolutní měření viskozity kapalin

Pokud kapalina proudí v kapiláře laminárně, platí zjednodušený tvar Hagenovy – Poiseuillovy rovnice

$$\frac{dV}{dt} = v\pi R^2 = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta L} \quad (5)$$

kde  $\Delta p$  je tlakový spád mezi konci trubice,  $L$  délka trubice,  $R$  poloměr trubice a  $\frac{dV}{dt}$  okamžitý průtokový objem. Mariottova láhev z obrázku 1 dokáže zajistit stálý tlakový spád, čímž se vztah dále zjednoduší na tvar

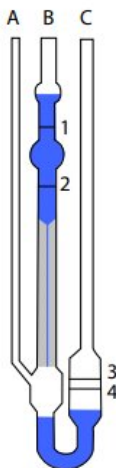
$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8VL}. \quad (6)$$



Obrázek 1: Mariottova láhev s kapilárou pro absolutní měření viskozity.

### 2.2. Ubbelohdeho viskozimetr

Ubbelohdeho viskozimetr na obrázku 2 je právě připravený k měření. Na kapiláře se díky trubici A vytváří tlakový rozdíl  $\Delta p = h(t)\rho g + p_{Atm} - p_{Atm}$  a kapalina z trubice B tak může protékat do spodních baněk. Pokud je proudění laminární, platí opět Poiseuillův vztah (4).



Obrázek 2: Ubbelohdeho kapilární viskozimetr

Uvažujme časový interval od momentu  $t_1$ , kdy hladina v trubici B mívá rysku 1 do chvíle  $t_2$ , kdy mívá rysku 2.

$$\eta \frac{dV}{dt} = \frac{\pi R^4}{8L} \Delta p \quad (7)$$

$$\eta A(h) dh = \frac{\pi R^4}{8L} h \rho g dt \quad (8)$$

$$\frac{\eta}{\rho} \int_{h_1}^{h_2} \frac{A(h)}{h} dh = \frac{\pi R^4}{8L} g \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (9)$$

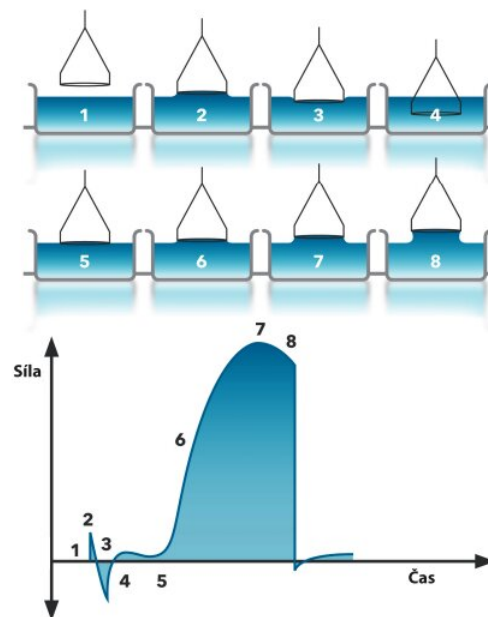
Všechny konstanty vystupující na pravé straně jsou nezávislé na vlastnostech měřené kapaliny, stejně jako Integrál na straně levé. Můžu tak psát

$$\nu = K(t_2 - t_1), \quad (10)$$

kde  $\nu$  je kinematická viskozita,  $t_2 - t_1$  čas za který oteče kapalina od rysky 1 k rysce 2 a  $K$  časová konstanta viskozimetru. Časovou konstantu je pro měření nejdřív potřeba zkalibrovat pomocí kapaliny se známou kinematickou viskozitou.

### 2.3. Měření povrchového napětí du Noüyho metodou

Du Noüyho metoda spočívá v měření síly působící podél obvodu ponořeného objektu. Na podvěsné váhy pověsím železný kroužek, váhy vytáruji a pod kroužek položím misku s kapalinou na desku s vertikálním posuvem. Misku začnu pomalu zvedat, dokud se celý kroužek neponoří a pak ji zase pomalu vytahuji. Celý proces by měl probíhat jako na obrázku 3.



Obrázek 3: Závislost síly působící na kroužek při jeho ponoru a vytahování. Převzato z <http://www.attension.com>

Povrchové napětí bude odpovídat největší síle kterou dokázala kapalina působit na délku kroužku

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{4\pi R} \cdot f\left(\frac{R^3}{V}, \frac{R}{r}\right), \quad (11)$$

kde  $R$  je poloměr kroužku a  $f\left(\frac{R^3}{V}, \frac{R}{r}\right)$  Harkinsův-Jordanův korekční faktor, který je tabelován pro bezrozměrné veličiny  $\frac{R^3}{V}$  a  $\frac{R}{r}$ ;  $V = \frac{F_{\max}}{(\rho - \rho_v)g}$  a  $r$  je poloměr drátku.

## 2.4. Měření hustoty metodou ponorného tělíska

Tato metoda využívá Archimedova zákona pro měření hustoty kapaliny. Změříme vztlak působící na plně ponořené těleso v kapalině o známé hustotě a v kapalině s neznámou hustotou. Výslednou hodnotu získáme ze vztahu

$$\rho = \frac{m}{m_{\text{známé}}} \rho_{\text{známé}} \quad (12)$$

## 2.5. Měření hustoty pyknometrem

Pyknometr je skleněná nádoba, kterou lze naplnit velmi přesným, ale neznámým objemem kapaliny. Zvlášť zvážím hmotnost  $m$  prázdného pyknometru, hmotnost  $m_1$  pyknometru naplněného kapalinou o neznámé hustotě  $\rho_1$  a hmotnost  $m_2$  pyknometru naplněného kapalinou o známé hustotě  $\rho_2$ .

$$\rho_1 = (\rho_2 - \rho_1) \frac{m_1 - m}{m_2 - m} + \rho_{\text{vzduchu}} \quad (13)$$

## 2.6. Měření složek povrchového napětí metodou kontaktního úhlu přisedlé kapky

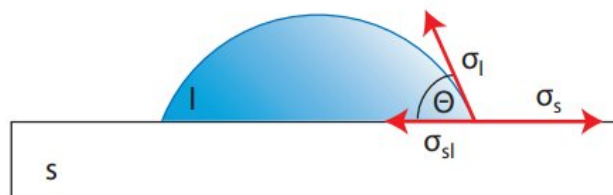
Povrchové napětí nejčastěji měříme na rozhraní kapalina - vzduch, jelikož vzduch nereaguje ani s kapalinou, ani sám se sebou. Nevznikne žádný příspěvek od molekul vzduchu a nic neoponuje přitažlivým silám mezi molekulami kapaliny, které se tím v součtu projeví všechny. Dupreho rovnice (14) naopak popisuje případ, kdy obě látky na rozhraní mají vlastní povrchové napětí  $\sigma_s$ ,  $\sigma_l$  a zároveň spolu interagují.

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2\sqrt{\sigma_s^{\text{lw}} \sigma_l^{\text{lw}}} - 2\sqrt{\sigma_s^{\text{ab}} \sigma_l^{\text{ab}}} \quad (14)$$

Cílem měření je zjistit, jak se známá hodnota povrchového napětí  $\sigma_l$  rozkládá do složek  $\sigma_l^{\text{lw}}$ ,  $\sigma_l^{\text{ab}}$  ze vztahu (4) a jak bude podle vztahu (14) reagovat s jinými materiály. Kapka nanesená na vhodný povrch jako na obrázku 4, je právě co hledáme. Pro úhel  $\theta$ , který svírá tečna k profilu kapky v místě styku všech tří fází platí Youngova rovnice

$$\sigma_s = \sigma_{sl} + \sigma_l \cos(\theta), \quad (15)$$

kde  $\sigma_l$  a  $\sigma_s$  jsou povrchové mezifázové energie kapaliny a pevné látky vůči páře kapaliny a  $\sigma_{sl}$  mezifázová povrchové energie rozhraní kapalina – pevná látka.



Obrázek 4: Youngova rovnováha na rozhraní tří fází u přisedlé kapky

Kombinací Youngovy a Dupreho rovnice dostaneme rovnici Youngovu-Dupreho:

$$(1 + \cos(\theta))\sigma_l = 2\sqrt{\sigma_s^{\text{lw}} \sigma_l^{\text{lw}}} + 2\sqrt{\sigma_s^{\text{ab}} \sigma_l^{\text{ab}}} \quad (16)$$

Pro další zjednodušení nám nezbyvá, než si půjčit nějaké poznatky z chemie. Teflon má například povrchovou energii pouze disperzního charakteru, tj.  $\sigma_s = \sigma_s^{\text{lw}}$  a na pravé straně rovnice tak bude vystupovat jediná odmocnina. Dál můžeme jako kalibrační kapalinu použít metylenjodid ( $\text{CH}_2\text{I}_2$ ), který má povrchovou energii rovněž čistě disperzního charakteru.

$$(1 + \cos \theta_{\text{H}_2\text{O}})\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 2\sqrt{\sigma_{\text{s}}^{\text{lw}}\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{lw}}} \quad (17)$$

$$(1 + \cos \theta_{\text{kal}})\sigma_{\text{kal}} = 2\sqrt{\sigma_{\text{s}}^{\text{lw}}\sigma_{\text{kal}}^{\text{lw}}} \quad (18)$$

Po vydělení obou rovnic pro poměr disperzní a celkové povrchové energie vody platí

$$\frac{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{lw}}}{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}}{\sigma_{\text{kal}}} \left( \frac{1 + \cos \theta_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + \cos \theta_{\text{kal}}} \right) \quad (19)$$

### 3. Výsledky měření

#### 3.1. Absolutní měření viskozity

Pomocí katetometru jsem změřil výškový rozdíl  $h$  vyústění trubičky a úrovně kapiláry

$$h = 11.43\text{cm} \quad (20)$$

#### 3.2. Stanovení nepřímo měřené veličiny

### 4. Závěr