
Úloha č. 3: Měření viskozity, hustoty a povrchového napětí kapalin

jarní semestr 2025

1 Úvod

Mechanické vlastnosti kapalin hrají důležitou roli v běžném životě i v průmyslové praxi. Veličiny jako hustota, viskozita, či povrchové napětí kapalin jsou podstatné pro transport kapalin, vstříkování, mísení, při povrchových úpravách materiálů, slouží pro odhad složení kapalin a stanovení jiných fyzikálních vlastností, mají význam v dopravě, energetice apod.

V této části si veličiny popisující základní fyzikální vlastnosti kapalin nejprve zopakujeme. Následně se podíváme na metody jejich měření.

Hustota (měrná hmotnost) ρ je definována jako

$$\rho = \frac{m}{V},$$

kde m je hmotnost elementu látky o objemu V .

Dynamická viskozita η je definována Newtonovým zákonem

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

kde τ je smykové napětí mezi vrstvami kapaliny a $\frac{dv_x}{dy}$ je derivace rychlosti proudění kapaliny ve směru normály k rovině smykového napětí τ .

Její jednotkou je v soustavě SI pascalsekunda, Pa.s. V praxi se používá jednotka poise P a zejména její díl centipoise, $\text{cP} = 0,01P = 10^{-3}\text{Pa.s}$, v jehož řádu se pohybuje dynamická viskozita vody.

Viskozita (vazkost) tekutiny je způsobena vnitřním třením mezi jednotlivými vrstvami kapaliny. Je mírou toho, jak se reálná tekutina brání tečení. Převrácenou hodnotou viskozity je tekutost (fluidita).

Kapaliny, které se řídí Newtonovým zákonem (1), se nazývají newtonské kapaliny. Jejich dynamická viskozita nezávisí na smykovém napětí, je ale funkcí teploty a tlaku - závislost na termodynamické teplotě T je dána vztahem

$$\eta = A e^{\frac{B}{T}}, \quad (2)$$

kde A , B jsou konstanty. U nenewtonských kapalin viskozita závisí i na smykovém napětí. Jsou to např. různé suspenze, taveniny polymerů, plasty apod.

Kinematická viskozita ν je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Jednotkou kinematické viskozity v soustavě SI je $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. V praxi se často používá jednotka stokes, St, $\text{St} = 1 \text{cm}^2 \text{s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ a její díl centistokes, cSt $= 10^{-2} \text{St} = 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} = \text{mm}^2 \text{s}^{-1}$, v jehož řádu se opět pohybuje kinematická viskozita vody.

Využívá se s výhodou tam, kde současně hraje roli jak viskozita, tak i tíha a setrvačnost kapaliny.

Povrchové napětí, povrchová energie. Povrchové napětí je definováno jako síla F působící v rovině povrchu kapaliny kolmo na libovolnou délkovou jednotku l v povrchu kapaliny, vztažená na tuto délku

$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

Napětí v povrchové vrstvě kapaliny je důsledkem přitažlivých mezimolekulárních (kohezních) sil uvnitř kapaliny, neboť k odhalení většího počtu molekul a ke zvětšení povrchu kapaliny je zapotřebí vykonat práci. Protože na zvětšení povrchu o $dS = l dx$ je zapotřebí vykonat práci

$$dW = F dx = \sigma l dx = \sigma dS,$$

je povrchové napětí rovno povrchové energii, tj. plošné hustotě energie, kterou kapalina zvětšením povrchu získává

$$\sigma = \frac{dW}{dS}.$$

Z termodynamického hlediska je povrchová energie volnou energií potřebnou ke zvětšení povrchu za konstantního objemu, teploty a počtu částic

$$\sigma = \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial S} \right)_{T,V,N}.$$

Takto může být zavedena nejen u kapalin, ale i u pevných látek.

Povrchové napětí se běžně vyjadřuje v jednotce mN m^{-1} , která je shodná s jednotkou povrchové energie mJ m^{-2} .

Chceme-li studovat, jak se bude chovat rozhraní dvou látek (např. dvou nemísících se kapalin, kapaliny a pevné látky, apod.), musíme znát, jaké mezimolekulární síly uvnitř obou látek existují a zda-li jejich molekuly mohou vzájemně interagovat. Podle Fowkese a van Osse *et al.*¹ je volná povrchová energie látky tvořena nezávislými aditivními komponentami, které odpovídají různým mezimolekulárním interakcím

$$\sigma = \sigma^{\text{lw}} + \sigma^{\text{ab}}, \quad (3)$$

kde σ^{lw} je část odpovídající Van der Waalovým silám (Londonovým disperzním silám mezi fluktuujícími dipóly, Keesomovým silám mezi trvalými dipóly a Debyeovým silám mezi trvalým a indukovaným dipólem) a σ^{ab} acidobazickým interakcím (interakce mezi kyselinami a zásadami podle Lewisovy teorie, vodíková vazba apod.).

Vzájemnou interakci mezi dvěma fázemi s (solid), l(liquid) popisuje adhezní práce, pro kterou platí Berthelotovo kombinační pravidlo

$$W_{\text{sl}}^{\text{a}} = 2\sqrt{\sigma_{\text{s}}^{\text{lw}}\sigma_{\text{l}}^{\text{lw}}} + 2\sqrt{\sigma_{\text{s}}^{\text{ab}}\sigma_{\text{l}}^{\text{ab}}} \quad (4)$$

a mezifázovou povrchovou energii (tj. i např. povrchové napětí na rozhraní mezi dvěma kapalinami) můžeme dopočítat dosazením (4) do Duprého rovnice

$$\sigma_{\text{sl}} = \sigma_{\text{s}} + \sigma_{\text{l}} - W_{\text{sl}}^{\text{a}} = \sigma_{\text{s}} + \sigma_{\text{l}} - 2(\sqrt{\sigma_{\text{s}}^{\text{lw}}\sigma_{\text{l}}^{\text{lw}}} + \sqrt{\sigma_{\text{s}}^{\text{ab}}\sigma_{\text{l}}^{\text{ab}}}). \quad (5)$$

¹Problematikou se zabývala řada autorů, na tomto místě je uvedeno jen stručné shrnutí jejich výsledků.

2 Měření viskozity kapalin

Měření viskozity provádíme pomocí tzv. viskozimetrů. Konstrukce těchto přístrojů lze rozdělit do tří základních skupin:

1. přístroje výtokové,
2. přístroje tělískové,
3. přístroje rotační a torzní.

V dalším textu se blíže podíváme pouze na výtokové přístroje, které jsou v praktiku k dispozici.

2.1 Absolutní měření viskozity

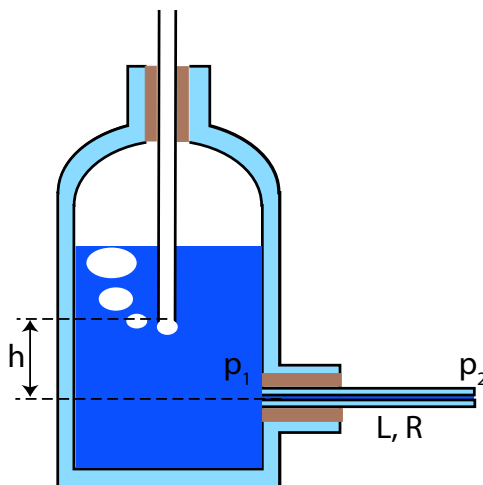
Princip funkce výtokových přístrojů spočívá v měření objemu V , který proteče trubicí délky L a poloměru R za dobu t při tlakovém spádu $p = p_1 - p_2$ mezi konci trubice. Pro proudění blízké laminárnímu platí Hagenova–Poiseuillova rovnice

$$\eta = \frac{\pi R^4 p t}{8 V L} - \frac{n \rho V}{8 \pi L t} \quad (6)$$

kde n je přibližně 1,1. Je-li Reynoldsovo číslo $Re = \frac{2 R \rho v}{\eta} < 2000$, kde ρ je hustota, v je střední rychlost proudění v kapiláře, pak lze proudění považovat za čistě laminární a výraz pro viskozitu se zjednodušuje na tvar

$$\eta = \frac{\pi R^4 p t}{8 V L}. \quad (7)$$

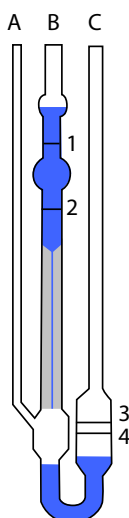
Absolutní měření viskozity lze provést pomocí Mariottovy láhve a kapiláry vhodného průměru (viz obr. 1). Mariottova láhev zajišťuje stálý tlakový spád, nezávislý na množství odečtené kapaliny. Objemové množství kapaliny, které vyteče za čas t , určíme při známé hustotě kapaliny ρ vážením. Poloměr R a délka kapiláry L jsou uvedeny na láhvi.



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

2.2 Ubbelohdeho viskozimetr

Ubbelohdeho viskozimetr je skleněný výtokový kapilární viskozimetr pro přesné relativní a s kalibrací i absolutní měření kinematické viskozity newtonských kapalin (viz obr. 2). Měření je opět založeno na využití Poiseuillova vztahu (7). Díky přítomnosti trubice A nezávisí doba průtoku na celkovém objemu kapaliny ve viskozimetru.



Obrázek 2: Ubbelohdeho kapilární viskozimetr

Postup měření

1. **Pozor, viskozimetr je velmi křehké a také velmi drahé zařízení. Pracujte s ním velmi opatrně. Hrozí zejména nebezpečí ulomení trubice A!**
2. Nejprve naplníme viskozimetr kapalinou přes trubici C tak, aby hladina sahala mezi rysky 3, 4.
3. Na trubici B nasadíme hadičku s balónkem.
4. Trubicí A zakryjeme prstem jedné ruky a pomocí balónku (druhou rukou balónek stlačíme, palcem zakryjeme otvor v balónku a balónek uvolníme) nasajeme kapalinu do trubice B tak, aby sahala poněkud nad rysku 1, budeme mít více času, když zaplní i horní nádobku.
5. Uvolníme otvor v balónku a poté i prst z trubice A.
6. Stopkami změříme dobu t , za kterou hladina v trubici B poklesne z rysky 1 na rysku 2.

Kinematickou viskozitu stanovíme ze vztahu

$$\nu = K \cdot t, \quad (8)$$

kde K je časová konstanta viskozimetru. Přehled různých tříd viskozimetrů včetně značení, přibližné hodnoty konstanty a rozsahu použitelnosti podává tabulka 1.

Neznáme-li konstantu viskozimetru, můžeme si jej zkalibrovat pomocí kapaliny o známé viskozitě $\nu_{\text{známé}}$

$$\nu = \frac{t}{t_{\text{známé}}} \nu_{\text{známé}}.$$

3 Měření hustoty kapalin

3.1 Měření hustoty metodou ponorného tělíska

Pro operativní měření hustoty lze použít digitální váhy s podvěsným vážením, případně speciální hrazdičkou, dovolující měření hmotnosti zavěšeného předmětu. Dříve se používaly speciální nerovnoramenné Mohrovy vážky. Měření je založeno na srovnání vztlakové síly působící na ponorné tělísko v kapalině o známé a neznámé hustotě.

Postup měření

1. Na spodní závěs zavěsíme ponorné tělísko v podobě krátkého teploměru.
2. Váhy vytárujeme.
3. Kapalinu o neznámé hustotě nalijeme do vhodného odměrného válce a postavíme pod váhy tak, aby tělísko bylo plně ponořeno. Získáme údaj m .
4. Totéž provedeme s kalibrační kapalinou o známé hustotě (destilovaná voda). Získáme údaj $m_{\text{známé}}$.
5. Hustotu neznámé kapaliny stanovíme ze vztahu

$$\rho = \frac{m}{m_{\text{známé}}} \rho_{\text{známé}}.$$

3.2 Pyknometrická metoda

Přesné měření měrné hmotnosti kapalin provádíme pyknometrickou metodou. Pyknometr je skleněná nádoba se zabroušeným uzávěrem. V uzávěru je tenká kapilára, kterou může unikat při zavírání pyknometru přebytečné množství kapaliny. Určení hustoty neznámé kapaliny spočívá v porovnání hmotnosti této kapaliny s hmotností stejného objemu kapaliny o známé hustotě. Označíme-li

- neznámou hustotu kapaliny ρ_1 ,
- hustotu známé kapaliny ρ_2 ,
- údaj vah s pyknometrem naplněný kapalinou s neznámou hustotou m_1 ,
- údaj vah s pyknometrem naplněný kapalinou se známou hustotou m_2 ,
- hmotnost prázdného pyknometru m ,
- hustotu vzduchu ρ_v ,

pro neznámou hustotu platí vztah

$$\rho_1 = (\rho_2 - \rho_v) \frac{m_1 - m}{m_2 - m} + \rho_v.$$

Relativní nejistota vymezení objemu kapaliny pyknometrem $r(V)$ je dána

- relativní nejistotou $r_t(V)$ v závislosti na odchylce Δt teploty pyknometru od teploty, pro kterou byl pyknometr kalibrován

$$r_t(V) = 3\alpha\Delta t,$$

kde α je součinitel teplotní roztažnosti skla, ze kterého je pyknometr vyroben. Nejistota není významná, porovnáváme-li při relativní metodě měření kapaliny o stejné laboratorní teplotě,

- relativní nejistotou $r_k(V)$ danou nejistotou polohy hladiny v kapiláře

$$r_k(V) = \frac{\Delta V_{\text{kap}}}{V_{\text{pyknometru}}}$$

Je-li průměr kapiláry 1 mm a objem pyknometru 10 cm³, je relativní nejistota vymezení objemu řádu $r_k(V) \approx 10^{-4}$.

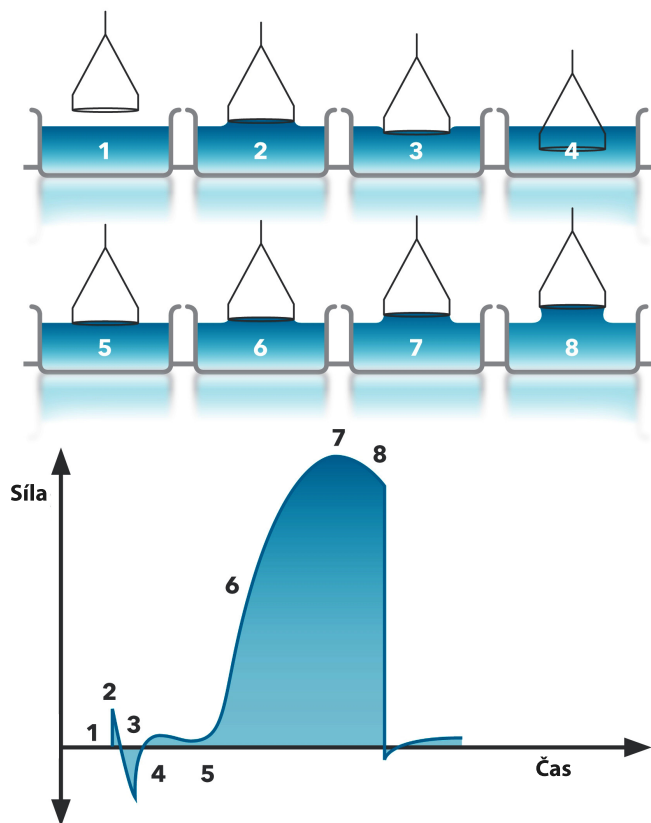
4 Měření povrchového napětí

4.1 Měření povrchového napětí du Noüyho metodou

Měření povrchového napětí metodou měření síly je založeno na vnoření vhodného objektu do studované kapaliny, stanovení smáčeného obvodu objektu a na měření přidané síly působící na objekt vlivem jeho kontaktu s kapalinou. Přitom se předpokládá, že

1. povrchové napětí nezávisí na křivosti povrchu kapaliny,
2. kapalina na ponořenou část tělesa působí pouze hydrostatickou silou (kromě povrchového napětí)
3. kontaktní úhel mezi povrchem kapaliny a svislicí na rozhraní všech tří fází je znám, případně lze předpokládat, že je roven nule.

Typicky se do kapaliny vnořují kovové objekty z platiny a iridia, u kterých je dobře splněna třetí podmínka: svislá destička (Wilhelmyho metoda), rámeček (Lenardova metoda) či kroužek (du Noüyho metoda). Nejčastěji používaný kroužek má výhodu hlavně v neexistenci problematických konců, metoda však pro přesné měření povrchového napětí vyžaduje korekce počítané numericky.



1. Kroužek je nad hladinou, váhy jsou vytárovány.
2. Kroužek se dotýká hladiny a působí na něj slabá kladná síla (směrem dolů) vlivem adheze mezi kroužkem a povrchem kapaliny.
3. Kroužek je tlačěn do kapaliny. Vlivem povrchového napětí na něj působí záporná síla (směrem vzhůru).
4. Kroužek v kapalině, malá kladná síla vlivem působení kapaliny na podpůrné drátky.
5. Při zvedání kroužku síla působící na kroužek začíná růst.
6. Růst síly se začíná zpomalovat.
7. Maximální síla.
8. Pokles síly následovaný odtržením kroužku.

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

Postup měření

1. Na digitální váhy s podvěsným vážením zavěsíme aluminiový kroužek. Povrch kroužku nesmí být znečištěn. **Samotného kroužku se rukou zásadně nedotýkejte.**
2. Spustíme program *Tensionmeter* a váhy s kroužkem ve vzduchu vytárujeme.

3. Kapalinu nalijeme do nádoby o dostatečném průměru (kolem 11 cm) a nádobku umístíme pod váhy na destičku s jemným vertikálním posuvem. Destičku nastavíme hrubým posuvem do takové polohy, kdy lze jemným posuvem nádobky kroužek zanořit do kapaliny a opět jej vytáhnout.
4. V programu *Tensionmeter* spustíme záznam měření (logování).
5. Spustíme kroužek zcela do kapaliny a pomalu a plynule ho vytahujeme. Je třeba dbát na to, aby kroužek ani kapalina nebyly při vytahování kroužku vystaveny otřesům.
6. Po odtrhnutí kroužku měření zastavíme. Naměřený průběh srovnáme s vývojem na obr. 3.

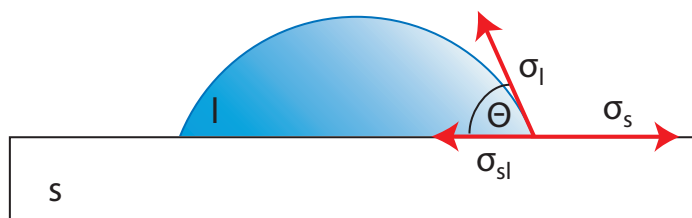
U du Noüyho metody vyhodnocujeme maximální sílu působící na kroužek, *nikoliv sílu potřebnou k odtržení kroužku*. Povrchové napětí pak stanovíme ze vztahu

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

kde $F_{\max}$ je maximální síla působící na kroužek, $2\pi R$ obvod kroužku a $f(R^3/V, R/r)$ Harkinsův–Jordanův korekční faktor, který je tabelován pro bezrozměrné veličiny R^3/V a R/r ; $V = \frac{F_{\max}}{(\rho - \rho_v)g}$ a r je poloměr drátku, ze kterého je kroužek vyroben.

4.2 Měření složek povrchového napětí metodou kontaktního úhlu přisedlé kapky

Při této metodě je na vodorovný očištěný vzorek pevné látky o vhodné povrchové energii nanesena jedna nebo více kapek testovacích kapalin a je měřen kontaktní úhel, který svírá tečna k profilu kapky v místě styku všech tří fází (pevná látka, kapalina a její pára) s rovinou povrchu pevné látky (viz obr. 4). V rovnováze, která se ustaví do několika sekund od nakápnutí, platí Youngova rovnice



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

$$\sigma_s = \sigma_{sl} + \sigma_l \cos \Theta, \quad (9)$$

kde σ_l a σ_s jsou volné povrchové mezifázové energie kapaliny a pevné látky vůči páře kapaliny a σ_{sl} mezifázová povrchové energie rozhraní kapalina – pevná látka. Θ je již zmiňovaný rovnovážný kontaktní úhel.

Kombinací Youngovy a Dupreho rovnice (5) dostaneme rovnici Youngovu–Dupreho

$$(1 + \cos \Theta)\sigma_l = 2(\sqrt{\sigma_s^{lw}\sigma_l^{lw}} + \sqrt{\sigma_s^{ab}\sigma_l^{ab}} + \dots), \quad (10)$$

kterou lze použít ke stanovení povrchové energie a jejích složek z hodnoty kontaktního úhlu.

Chceme-li změřit disperzní složku povrchového napětí vody, zvolíme si povrch, který má povrchovou energii pouze disperzního charakteru $\sigma_s = \sigma_s^{lw}$, např. teflon. Na pravé straně Youngovy–Dupreho rovnice pak bude vystupovat pouze jedna odmocnina ze součinu disperzních složek, ostatní odmocniny budou rovny nule. Změříme-li na tomto povrchu kontaktní úhel s vodou Θ_{H_2O}

a s jinou kapalinou se známou disperzní složkou Θ_{kal} , dvojnásobnou aplikací Youngovy–Dupreho rovnice dostaneme

$$\begin{aligned}(1 + \cos \Theta_{\text{H}_2\text{O}})\sigma_{\text{H}_2\text{O}} &= 2\sqrt{\sigma_{\text{s}}^{\text{lw}}\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{lw}}} \\ (1 + \cos \Theta_{\text{kal}})\sigma_{\text{kal}} &= 2\sqrt{\sigma_{\text{s}}^{\text{lw}}\sigma_{\text{kal}}^{\text{lw}}}\end{aligned}$$

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

$$\frac{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{lw}}}{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\sigma_{\text{kal}}^{\text{lw}}}{\sigma_{\text{kal}}} \frac{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}}{\sigma_{\text{kal}}} \left(\frac{1 + \cos \Theta_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + \cos \Theta_{\text{kal}}} \right)^2. \quad (11)$$

Jako kalibrační kapalinu je výhodné použít např. metylenjodid (CH_2I_2), který má povrchovou energii rovněž čistě disperzního charakteru, a tedy $\sigma_{\text{kal}} = \sigma_{\text{kal}}^{\text{lw}}$.

K měření využijeme měřič kontaktního úhlu.

Postup měření

1. Spustíme ovládací program, na stolek položíme vzorek a mikropipetou nakápneme kapky. **Pro každou kapalinu použijeme zvláštní špičku!**
2. Kapky posunem stolku zaostříme, zvolíme si vhodné jméno souboru a obě kapky sejmem (*Capture*).
3. Přejdeme do záložky *Analysis*. Vpravo zvolíme soubor se snímkem kapky. Klikneme do obrazu tak, abychom označili oba krajní body kapky, kde se stýkají všechny tři fáze, a třetí bod zvolíme v horní části kapky. Program při třetím bodu vykreslí proloženou kružnici a vypíše hodnotu kontaktního úhlu. Nejsme-li však s proložením profilu kapky spokojeni, bod smažeme pravým kliknutím na něj a umístíme jej znovu.

Úkoly

1. Určete teplotní závislost viskozity vody Ubbelohdeho viskozimetrem. Viskozimetr naplňte podle potřeby destilovanou vodou a ponořte do skleněného válce naplněného kohoutkovou vodou o vhodné teplotě. Počkejte, až se kapalina uvnitř viskozimetru ohřeje a proveďte měření. Viskozitu stanovte pro tři teploty (kolem 20, 30 a 40 °C). Doba průtoku je cca 15 minut, takže měření skombinujte s dalšími experimenty. Konstanta viskozimetru Schott je $K = 1,063 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-2}$, $r(K) = 0,65 \%$ (p 95 %). **Do viskozimetru dávejte jen destilovanou vodu!**

Možný způsob zpracování výsledků: pomocí hustoty z kalkulátoru VŠCHT Praha [1] určete k naměřeným hodnotám kinematické viskozity viskozitu dynamickou. Vypočtené hodnoty vynesete do grafu spolu se teoretickou závislostí (2), jejíž konstanty získáte prokladem dat z tabulky 2, nebo přímo s interpolační formulí pro vodu [2]. Odhadněte přesnost svých měření.

2. Změřte hmotnost vody, která vyteče z Mariottovy láhve za určitý čas. Čas měřte stopkami, vodu nechte stékat do váženky a její hmotnost určete vážením na analytických vahách. Výšku „hladiny“ nad vnějším koncem kapiláry určete katetometrem. Vypočtete viskozitu vody podle vztahu (7), stanovte nejistotu měření. Z videa na interaktivní osnově se dozvíte, co je potřeba udělat před měřením. Poznámka: Nemá-li výtoková trubice zcela vodorovná, zvažte, který konec musíte pro správné určení tlakového spádu změřit, a jak je tento pokles výšek významný.
3. Určete hustotu lihu na základě známé hustoty vody pomocí pyknometru. Nejprve určete hmotnost prázdného a suchého pyknometru. Pak hmotnost pyknometru naplněného lihem a nakonec destilovanou vodou. Při tomto postupu se neztrácí čas vysoušením pyknometru

a zbytků lihu v pyknometru se lze zbavit opakovaným výplachem vodou, která je dostupnější než líh.

Technický líh může při polití způsobovat vysušení kůže, případně i její loupání. Citlivé osoby mohou použít rukavice.

4. Určete hustotu lihu metodou ponorného tělíska. Použijte digitální váhy s podvěsným vážením, na spodní závěs zavěste ponorný teploměr. Pokud na závěsu zůstal z předešlého měření platinový kroužek, opatrně ho sejměte, aniž byste se samotného kroužku dotýkali, a zavěste na odkladný stojánek. Ke čtení hodnot vah můžete využít digitální displej nebo program *Tensionmeter*. Jako známou kapalinu použijte destilovanou vodu.
5. Určete povrchové napětí destilované vody a lihu du Noüyho metodou kroužku. Měření opakujte 10×. Průměr kroužku je $D = (58,0 \pm 0,1)$ mm. Harkinsův–Jordanův korekční faktor je přibližně $f(R^3/V, R/r) = 0,77$.
6. Pomocí měřiče kontaktního úhlu změřte disperzní složku povrchové energie vody metodou kontaktního úhlu přisedlé kapky. Jako vzorek použijte teflonovou fólii, kalibrační kapalinou je metylen jodid. (Methylen jodid sami nepoužívejte, kapku vám kápne vyučující.) Na očištěný a vysušený vzorek naneste mikropipetou kapky o objemu cca 1 μl , u methylen jodidu i méně, aby kapka měla kruhový průřez. **Dodržujte přísnou čistotu: pro každou kapalinu použijte zvláštní špičku a konce špičky ani samotného vzorku se nedotýkejte!** Přístrojem určete oba kontaktní úhly. Dopočítejte zbylou polární složku povrchové energie vody ($\sigma^{\text{ab}} = \sigma - \sigma^{\text{lw}}$) a porovnejte výsledky s tabulkovými hodnotami.
7. Proved'te celkový úklid pracoviště. Vylijte kohoutkovou vodou z odměrného válce, Ubbelohdeho viskozimetr ponechejte naplněný. Z nádobek vylijte destilovanou vodu, líh vraťte do láhve. Pyknometr ponechte otevřený, aby mohl vyschnout. Špičky a jednorázový samolepicí vzorek teflonu vyhoďte do odpadu.

Reference

- [1] VŠCHT Praha: Hustota kapalin, tabulky. <https://uchi.vscht.cz/studium/tabulky/hustota-kapalin>.
- [2] VŠCHT Praha: Dynamická viskozita vody. <https://uchi.vscht.cz/studium/tabulky/viskozita-kapalin>.

A Užití v praxi

Co se týče měření hustoty kapalin, kromě metod uvedených v této úloze a jejich variant se zejména v různých odvětvích průmyslu hojně využívá další metoda – měření tzv. oscilačním hustoměrem. Při měření touto metodou se přivede malé množství kapaliny do kapiláry, která je nejčastěji tvaru U. Tato kapilára se následně na jednom místě rozkmitává a na jiném místě se měří frekvence jejích kmitů. Ze zjištěné rezonanční frekvence kapiláry, která závisí na hmotnosti její kapalně náplně, a z jejích geometrických vlastností lze následně určit hustotu kapalně náplně. Tato metoda se vyznačuje vysokou přesností (např. u přístroje „Anton Paar DMA 5000 M“ výrobce uvádí přesnost $5 \cdot 10^{-6} \text{ g cm}^{-3}$) a malou spotřebou vzorku.

B Tabulky

Značení		Průměr kapiláry (mm)	Konstanta K (přibl.)	Rozsah ν ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$)
DIN	ISO			
0	-	0.36	0.001	0.3 – 1
0c	-	0.47	0.003	0.5 – 3
0a	-	0.53	0.005	0.8 – 5
I	I	0.63	0.01	1.2 – 10
Ic	Ia	0.84	0.03	3 – 30
Ia	-	0.95	0.05	5 – 20
II	II	1.13	0.1	10 – 100
IIc	IIa	1.50	0.3	30 – 300
IIa	-	1.69	0.5	50 – 500
III	III	2.01	1	100 – 1000
IIIc	IIIa	2.65	3	300 – 3000
IIIa	-	3.00	5	500 – 5000
IV	IV	3.60	10	1000 – 10000
IVc	IVa	4.70	30	3000 – 30000
IVa	-	5.34	50	6000 – 30000
-	V	6.30	100	> 10000

Tabulka 1: Ubbelohdeho viskozimetr – třídy. Podle materiálů firmy Schott.

$t [^\circ\text{C}]$	$\nu [\text{mm}^2 \text{s}^{-1}]$	$\eta [10^{-3} \text{Pa.s}]$	$\rho [\text{kg.m}^{-3}]$
10	1.3062	1.3059	999.74
20	1.0037	1.0019	998.22
30	0.8013	0.7978	995.64
40	0.6584	0.6533	992.21
50	0.5536	0.5470	988.04

Tabulka 2: Závislost kinematické a dynamické viskozity a hustoty vody na teplotě. Údaje byly vypočítány na základě skriptů na stránkách VŠCHT Praha viskozita kapalin a hustota kapalin.

Kapalina	σ	σ^{lw}	σ^{ab}	σ^+	σ^-	η [poise]
Water	72.8	21.8	51.0	25.5	25.5	0.010
Glycerol	64.0	34.0	30.0	3.92	57.4	14.90
Formamide	58.0	39.0	19.0	2.28	39.6	0.0455
Ethylene glycol	48.0	29.0	19.0	1.92	47.0	0.199
Methylene iodide	50.8	50.8	0	0	0	0.028
α -Bromonaphthalene	44.4	43.4	≈ 0	0	0	0.0489
Chloroform	27.15	27.15	0	3.8	0	0.00473
Ethanol	22.4	18.8	≈ 2.6	≈ 0.019	≈ 68	0.01074
Methanol	22.5	18.2	4.3	≈ 0.06	≈ 77	0.00544
Toluene	28.5	28.5	0	0	2.3	0.00604
Benzene	28.9	27.1	≈ 0	0	2.8	0.00604
Carbone tetrachloride	27.0	27.0	0	0	0	0.00908
Cyclohexane	25.5	25.5	0	0	0	0.00912
Tetradecane	26.6	26.6	0	0	0	0.0218
Dodecane	25.35	25.35	0	0	0	0.01493
Decane	23.8	23.8	0	0	0	0.00907
Octane	21.6	21.6	0	0	0	0.00542
Heptane	20.3	20.3	0	0	0	0.00409
Hexane	18.4	18.4	0	0	0	0.00326

Pevná látka	σ	σ^{lw}	σ^{ab}	σ^+	σ^-
Teflon	18.5	18.5	0	0	0
Polyisobutylene	25.0	25.0	0	0	0
Polypropylene	25.7	25.7	0	0	0
Polyethylene	33.0	33.0	0	0	0
Nylon 6,6	37.7	37.7	0	0	0
PMMA	40.6	40.6	0	0	12.0
Polystyrene	42.0	42.0	0	0	1.1
Polyvinyl alcohol	42.0	42.0	0	0	17–57
Polyvinylchloride	43.8	43.0	0.75	0.04	3.5
Coal	39.8	39.8	0	0	2.5
Talc	41.6	37.4	4.2	2.0	2.2
Calcium Carbonate	48.0	48.0	0	0	79.0
Quartz	191.0	76.0	115.0	–	–
Silica gel	48.8	42.0	6.8	58.4	0.2
Bentonite clay	55.5	41.2	14.3	1.5	33.3
α -Alumina	44.8	43.7	1.1	0.004	80.5
Barite	52.9	26.2	26.7	1.5	118.9

Tabulka 3: Povrchové energie kapalin a pevných látek (v mJ m^{-2}).