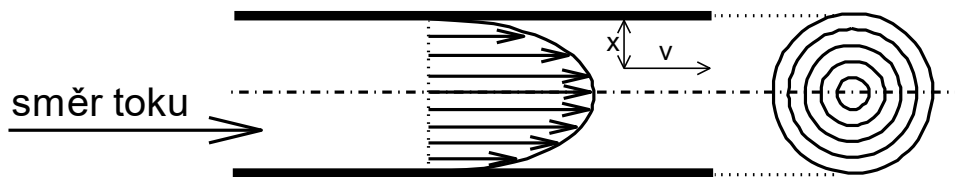


11. VISKOZITA

Přitažlivé síly mezi molekulami kapaliny se projevují v odporu, který zpomaluje pohyb kapalin. Kvantitativně tento jev popisuje veličina zvaná viskozita. Ta je tedy projevem vnitřního tření, které brzdí pohyb kapaliny při jejím průtoku trubici. Rozdělíme-li si průřez trubice na soustředná mezikruží, lze velikost brzdě síly, působící na vrstvičku kapaliny vzdálenou od stěny trubice dx a pohybující se vůči ní rychlostí dv (Obr.), vyjádřit Newtonovým zákonem viskózního toku:



Obr. XI-1: Rychlostní profil uvnitř kapaliny proudící trubicí

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dx} \quad (\text{XI-1}),$$

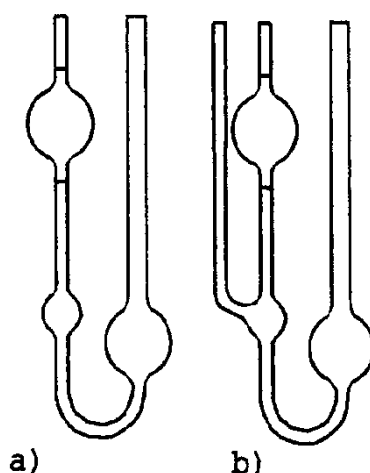
kde S je styčná plocha kapaliny se stěnou trubice. Konstanta úměrnosti η vystupující v rovnici (XI-1) je tzv. dynamický viskozitní koeficient nebo zkráceně dynamická viskozita. Hlavní jednotkou dynamické viskozity je Pa.s, dříve používanou jednotkou byl poise ($1 \text{ P} = 10^{-1} \text{ Pa.s}$). Za pomoci Newtonova zákona viskózního toku odvodil Poiseuille rovnici pro průtok určitého objemu kapaliny V za čas t trubicí o délce l a poloměru r :

$$V = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p \cdot t}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (\text{XI-2}),$$

kde Δp je rozdíl tlaků na začátku a na konci trubice. Viskozita se projevuje též při pohybu těles v kapalinách. Pohyb kulové částice o poloměru r v kapalině o viskozitě η rychlostí v popsal Stokes rovnici:

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (\text{XI-3}).$$

Pro měření viskozity kapalin bylo vyvinuto několik typů viskozimetrů, z nichž nejpoužívanější jsou viskozimetry průtokové (též kapilární) využívající Poiseuilleova vztahu a viskozimetry kuličkové, pracující na základě Stokesovy rovnice.



Obr. XI-2: Základní typy kapilárních viskozimetrů: a) Ostwaldův, b) Ubbelohdeho

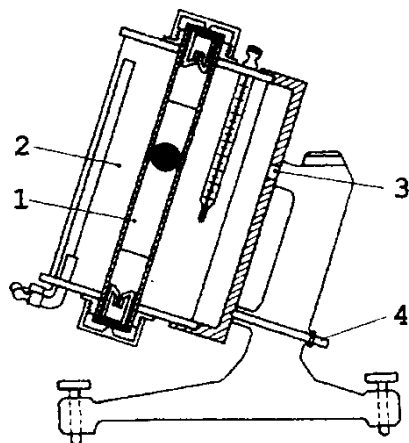
U průtokových viskozimetrů se měří doba průtoku přesně určeného objemu kapaliny kapilárou vhodného průměru (podle požadovaného rozsahu měření viskozitního koeficientu). Typickým představitelem této skupiny viskozimetrů je tzv. Ostwaldův viskozimetr či zdokonalený viskozimetr Ubbelohdeho (Obr. XI-2). Při průtoku kapaliny kapilárou neplatí přesně předpoklady o laminárním proudění použité Poiseuillem při odvození jeho vztahu, proto se provádí měření viskozity těmito viskozimetry relativně. Při tomto relativním měření se srovnávají doby průtoku měřené kapaliny a kapaliny o známé viskozitě (např. voda). Hnací silou průtoku kapaliny kapilárou je v tomto případě hydrostatický tlak sloupce kapaliny, jehož hodnota je ovlivněna hustotou kapaliny. Proto je třeba při výpočtu neznámé viskozity uvážit rozdílné hustoty měřených kapalin ρ_1 , ρ_2 :

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (\text{XI-4}).$$

Rovněž v případě kuličkových viskozimetrů, založených na měření doby pádu kuličky ve viskózním prostředí, nejsou zcela přesně zachovány podmínky, pro něž byla odvozena Stokesova rovnice. Proto se i v tomto případě provádí měření viskozity relativně, vzhledem k vhodnému standardu. Za tímto účelem jsou již výrobcem proměřeny viskozity standardu s danou dvojicí kulička – trubice, použitou ve viskozimetru, a neznámá viskozita se počítá z doby pádu kuličky t podle rovnice, obsahující tuto konkrétní charakteristiku viskozimetru v konstantě K , zvané kuličková konstanta

$$\eta = t \cdot (\rho_k - \rho) \cdot K \quad (\text{XI-5}),$$

kde ρ_k je hustota materiálu kuličky a ρ je hustota měřené kapaliny. Typickým představitelem této skupiny viskozimetrů je Höpplerův viskozimetr (Obr.).



Obr. XI-3: Höpplerův viskozimetr: 1-měrná trubice s kuličkou, 2-termostatovaný plášť, 3-otočný závěs, 4-západka

Z dalších typů viskozimetrů je třeba ještě jmenovat viskozimetry výtokové (měří se doba výtoku přesného objemu kapaliny z kalibrovaného otvoru v nádobě) a viskozimetry rotační (měří se brzdící síla, jakou působí kapalina na válcové či kuželové těleso, které v ní rotuje). Viskozita kapalin výrazně závisí na teplotě, přičemž tvar této závislosti je obdobný závislosti rychlosti reakce na teplotě:

$$\eta = A \cdot \exp(\Delta E_{\text{vis}}/RT) \quad (\text{XI-6}),$$

kde ΔE_{vis} je tzv. aktivační energie viskózního toku a A je empiricky určená konstanta (ostatní veličiny mají obvyklý význam).

Viskozita kapalin a její teplotní závislost má velký význam nejen v technické praxi (doprava a míchání kapalin, maziva), ale je důležitou veličinou i ve výzkumné sféře, např. při studiu roztoků polymerů. Ze závislosti viskozity roztoků polymerů na jejich koncentraci lze určit průměrnou molekulovou hmotnost daného polymeru. Mezi hodnotou tzv. limitního viskozitního čísla (vnitřní viskozity) $[\eta]$ a molekulovou hmotností rozpuštěného polymeru totiž platí empirický Houwinkův-Kuhnův-Markův vztah:

$$[\eta] = K \cdot M^a \quad (\text{XI-7}),$$

kde K , a jsou experimentálně určené koeficienty a M je průměrná molekulová hmotnost polymeru. Limitní viskozitní číslo $[\eta]$ se získá extrapolací tzv. viskozitního čísla (redukované viskozity)

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} \quad (\text{XI-8}),$$

na nulovou koncentraci c rozpuštěného polymeru. Vlastní hodnotu specifické viskozity η_{sp} , nutnou pro výpočet viskozitního čísla, lze určit přímo z viskozitních měření roztoku polymeru a rozpouštědla:

$$\eta_{sp} = (\eta - \eta_0)/\eta_0 = \eta_{rel} - 1 \quad (\text{XI-9}),$$

kde

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} \quad (\text{XI-10}),$$

a η, η_0 jsou viskozity roztoku, resp. rozpouštědla. Při použití dostatečně zředěných roztoků polymerů lze v rovnici (XI-4) pro určení viskozity z měření kapilárním viskozimetrem položit $\rho_0 = \rho$, čímž se značně zjednoduší určení relativní viskozity

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t}{t_0} \quad (\text{XI-10a}),$$

(t a t_0 jsou doby průtoku roztoku a čistého rozpouštědla).

Úkol A: Určete aktivační energii viskózního toku pro vodu na základě měření teplotní závislosti jeho viskozity Höpplerovým viskozimetrem

Experimentální vybavení:

- Höpplerův viskozimetr
- termostat
- stopky

Pracovní postup: Měrná trubice Höpplerova viskozimetru je naplněna destilovanou vodou a uvnitř trubice je skleněná kulička. Za pomoci termostatu, propojeného s pláštěm viskozimetru, vytemperujeme trubici na 25°C (podle teploměru umístěného přímo v temperovacím plášti

viskozimetru). Po ustálení požadované teploty otočíme viskozimetrem o 180° až západka zaskočí do nové polohy. Tím se uvede kulička do pohybu, přičemž změříme dobu jejího průchodu mezi krajními ryskami trubice (dráha 10 cm). Čas si zapisujeme do Tabulky XI-1. Měření opakujeme minimálně 3x, přitom rozptyl naměřených časů od průměrné hodnoty by neměl převyšovat 5 s. Při měření kontrolujeme, jestli se v trubici neobjevila vzduchová bublina. Pokud ano, informujeme o tom vedoucího cvičení a ten bublinu odstraní. Po skončení měření při jedné teplotě přestavíme termostat na novou teplotu a po jejím ustálení provedeme měření podle předchozího postupu. Měření provádíme pro teploty 25 až 50°C v krocích po 5°C. (Po ukončení všech měření vypněte pouze termostat; viskozimetr nerozebírejte a nevylévejte vodu!)

Tabulka XI-1: Doby pádu kuličky Höpplerova viskozimetru a hodnoty viskozity pro vodu

t [°C]	t [s]	\bar{t} [s]	η [mPa.s]	η [Pa.s]	$\ln \eta$	T [K]	1/T [K ⁻¹]
25							
30							
35							
40							
45							
50							

Pozn. Logaritmujeme viskozitu ($\ln \eta$) v jednotkách [Pa.s] !!!

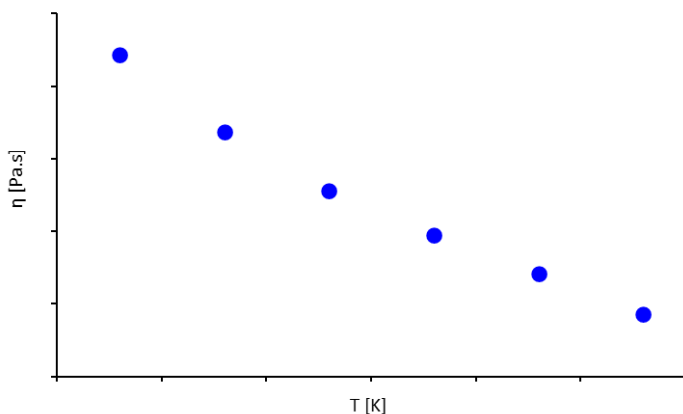
Tabulka XI-2: Teplotní závislost hustoty vody

t [°C]	25	30	35	40	45	50
ρ_{voda} [g.cm ⁻³]	0,99705	0,99565	0,99403	0,99222	0,99022	0,98804

Vyhodnocení:

Höpplerův viskozimetr patří do třídy Stokesovských (kuličkových) viskozimetrů. Měření provádíme relativně.

- Průměrné hodnoty doby pádu kuličky přepočítáme na hodnotu viskozity η [mPa.s] za pomoci rovnice (XI-5), kam pro kuličku dosazujeme $\rho_k = 2,217 \text{ g.cm}^{-3}$, $K = 0,0103 \text{ mPa.cm}^3.\text{g}^{-1}$.
- Dobu pádu kuličky mezi krajními ryskami trubice t dosazujeme v sekundách.
- Hustoty vody (g.cm^{-3}) pro měřené teploty jsou uvedeny v Tabulce (XI-2).
- Teplotu t [°C] převedeme na termodynamickou teplotu T [K]
- Sestrojíme závislost $\eta = f(T)$

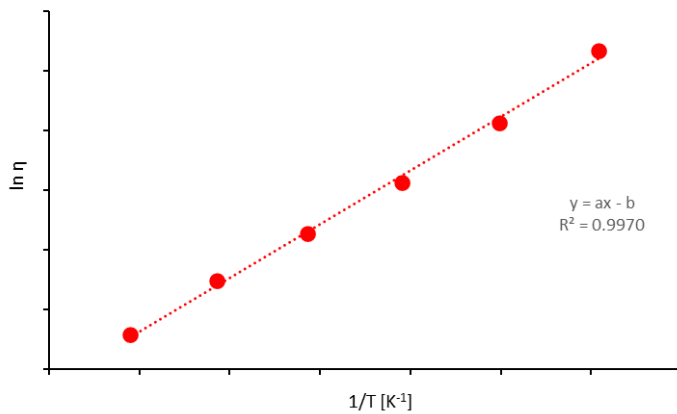


- η [Pa.s] (závisle proměnná) → osa y
- T [K] (nezávisle proměnná) → osa x
- velikost grafu alespoň 10 x 10 cm
- body izolované, nespojovat !!!
- rozsah os vhodně zvolíme dle naměřených hodnot, abychom využili celou plochu grafu pro naše naměřené

Graf XI-1: Závislost viskozity na teplotě

- Máme-li k dispozici PC a vhodný software, vyhodnotíme nelineární závislost (XI-6) nelineární regresi η proti T . Neznámými parametry zde jsou ΔE_{vis} a A .

- Sestrojíme závislost $\ln \eta = f(1/T)$



- $\ln \eta$ (závisle proměnná) → osa y
- $1/T$ [K^{-1}] (nezávisle proměnná) → osa x
- velikost grafu alespoň 10 x 10 cm
- body izolované, nespojovat !!!
- lineární závislost → proložíme přímkou, uvést rovnici přímky a koeficient R^2
- rozsah os vhodně zvolíme dle naměřených hodnot, abychom využili celou plochu grafu pro naše naměřené

Graf XI-2: Závislost $\ln \eta = f(1/T)$

- Orientační výsledek lze získat i lineární regresí $\ln \eta$ proti $1/T$

$$\ln \eta = \ln A + \Delta E_{vis} / RT \quad (XI-11)$$

- Ze **směrnice** a přímkové závislosti $\ln \eta = f(1/T)$ vyčíslíme ΔE_{vis} .

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\Delta E_{vis}}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

$$\ln \eta = \frac{\Delta E_{vis}}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln A$$

- Obecná rovnice přímky má tento tvar:

$$y = ax + b$$

resp. $y = ax - b$

kde a je **směrnice** a b je **posunutí**

- Potom tedy z rovnice přímky grafu XI-2 můžeme vypočítat ΔE_{vis}

$$a = \frac{\Delta E_{vis}}{R}$$

resp. $\Delta E_{vis} = a \cdot R$

- Do **závěru** protokolu nezapomeňte uvést:

- co bylo cílem úlohy, co jste stanovovali, jak jste to provedli
- kde jsou uvedena data (např. v tabulce 1 atd.) a grafické závislosti (např. Graf 1 atd.)
- uveďte hodnotu energie viskózního toku pro vodu (nezapomeňte na jednotky!)

- pokud se něco nepovedlo, nezapomeňte to uvést a napsat pravděpodobnou příčinu nepřesnosti

Úkol B: Z měření koncentrační závislosti viskozity roztoku škrobu určete jeho průměrnou molekulovou hmotnost

Experimentální vybavení:

- roztok škrobu o koncentraci $10 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$
- Ubbelohdeho kapilární viskozimetr
- termostat
- stopky
- odměrná baňka o objemu 100 cm^3
- nálevka
- 2 kádinky 100 cm^3
- pipeta 25 cm^3

Pracovní postup: Manipulaci s viskozimetrem vám ukáže a vysvětlí vedoucí cvičení. Viskozimetr naplníme základním roztokem škrobu ($10 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$) tak, aby jeho hladina sahala v dolní nádobce mezi vyznačené rysky (asi 20 cm^3). Roztok škrobu lejeme do trubičky viskozimetru o největším průměru. Potom si trochu pustíme vakuum, lehce položíme ukazovák na užší trubičku (bez baniček), hadičku s vakuem přiložíme k druhé úzké trubičce (s baničkami) a vakuem přesajeme roztok do horní menší baničky. Po odpojení vakua měříme dobu, za kterou proteče příslušný objem kapaliny kapilárou (tj. dobu, za kterou poklesne hladina z horní rysky nad větší baničkou na rysku dolní). Měření opakujeme minimálně třikrát, jednotlivá měření by se neměla lišit o více než 5% měřené hodnoty.

Pro další měření napipetujeme do 100 cm^3 odměrné baňky 75 cm^3 základního roztoku škrobu ($10 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$) a doplníme po rysku destilovanou vodou. Z viskozimetru vylejeme předešlý roztok, naplníme jej a změříme dobu průtoku podle předchozího postupu.

Dále pokračujeme se zředováním roztoku škrobu (75 cm^3 předchozího roztoku škrobu se zředí v odměrné bance na 100 cm^3 dest. vodou) a proměřováním viskozity podle předchozího postupu. Měření ukončíme při poklesu koncentrace škrobu v roztoku pod $1 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$ (musíme si

dopředu spočítat!). Na závěr provedeme měření s čistou destilovanou vodou (doba průtoku je nejkratší).

Vyhodnocení:

- Nejdřív si musíme spočítat, kolikrát budeme ředit škrob, aby koncentrace škrobu klesla pod $1\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$.

$$c_1 \cdot V_1 = c_2 \cdot V_2$$

$$10 \cdot 0,075 = c_2 \cdot 0,100$$

$$\frac{10 \cdot 0,075}{0,100} = c_2$$

$$c_2 = 7,5\text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$$

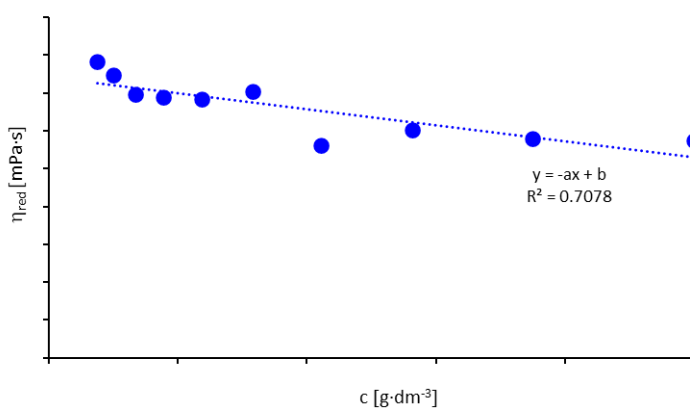
- Stejně postupujeme dál s výpočtem až se dostaneme na koncentraci pod $1\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$.
- Se znalostí rovnic (XI-9) a (XI-10a) vypočítáme specifickou viskozitu v jednotkách $[\text{mPa}\cdot\text{s}]$

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 = \frac{t}{t_0} - 1$$

kde t je čas průtoku roztoku škrobu dané koncentrace

t_0 je čas průtoku destilované vody

- Pomocí rovnice (XI-8) vypočítáme redukovanou viskozitu v jednotkách $[\text{mPa}\cdot\text{s}]$
- Sestrojíme závislost $\eta_{red} = f(c)$



- η_{red} $[\text{mPa}\cdot\text{s}]$ (závisle proměnná) → osa y
- c $[\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}]$ (nezávisle proměnná) → osa x
- velikost grafu alespoň 10×10 cm
- body izolované, nespojovat !!!
- lineární závislost → proložíme přímkou, uvést rovnici přímky a koeficient R^2
- rozsah os vhodně zvolíme dle naměřených hodnot, abychom využili celou plochu grafu pro naše naměřené hodnoty

Graf XI-3: Závislost redukované viskozity na koncentraci škrobu

