



## 9. Úloha

### Měření viskozity kapalin a ověření Waldenova pravidla

#### 1 Teoretický úvod

##### 1.1 Viskozita kapalin

Viskozita popisovaná také jako vnitřní tření je vlastnost všech reálných kapalin, která se projevuje třením k sobě přiléhajících vrstev kapaliny při jejich vzájemném pohybu. Pohybují-li se sousední vrstvy kapaliny různými rychlostmi, vzniká na jejich rozhraní tečné (smykové) napětí, které brání v pohybu. **Dynamická viskozita  $\eta$**  vyjadřuje sílu, která je nutná k tomu, aby se uvnitř kapaliny vrstva o jednotkové ploše pohybovala ve své rovině jednotkovou rychlostí proti druhé rovnoběžné vrstvě vzdálené 1 m. Jednotkou dynamické viskozity je tedy  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s} = \text{Pa} \cdot \text{s}$ . Vedle dynamické viskozity existuje také **kinematická viskozita  $\nu_k$** , která vyjadřuje vztah mezi dynamickou viskozitou  $\eta$  a hustotou kapaliny  $\rho$  podle vztahu

$$\nu_k = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}). \quad (1)$$

Viskozita je významně závislá na teplotě a pro její teplotní závislost lze odvodit vztah

$$\eta = \frac{6kT}{l_2^3 f_{02}} e^{\frac{W_2}{kT}} (\text{Pa} \cdot \text{s}), \quad (2)$$

kde  $l_2$  je střední volná dráha molekuly,  $f_{02}$  je kmitočet vlastních tepelných kmitů molekul,  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $W_2$  je výška potenciálové bariéry mezi rovnovážnými polohami molekul a  $T$  je termodynamická teplota systému.

##### 1.2 Waldenovo pravidlo

Waldenovo pravidlo je empirický vztah mezi konduktivitou (měrnou elektrickou vodivostí) kapalného dielektrika a jeho dynamickou viskozitou. Pravidlo říká, že součin těchto dvou veličin je konstantní a nezávisí na teplotě.

Elektrická vodivost (a tedy i konduktivita) nepolárních kapalin je způsobena zejména ionty vzniklými z přítomných nečistot, a také ionty, které vznikají tepelnou disociací neutrálních molekul kapaliny. V případě řešení problematiky elektrické vodivosti nepolárních kapalin lze odvodit následující vztah pro závislost konduktivity na teplotě



$$\gamma = \frac{n l_1^2 q^2 f_{01}}{6 k T} e^{-\frac{W_1}{k T}} (S \cdot m^{-1}), \quad (3)$$

kde  $l_1$ ,  $f_{01}$ , a  $W_1$  mají obdobný význam jako v případě výpočtu viskozity, ale vztahují se na ionty,  $q$  je elektrický náboj iontu a  $k$  a  $T$  mají stejný význam jako v případě výpočtu viskozity.

Kombinací vztahů (2) a (3) je získán vztah popisující vzájemnou souvislost mezi dynamickou viskozitou a konduktivitou kapalných izolantů

$$\gamma \eta = \frac{n q^2}{l_2} \cdot \frac{l_1^2}{l_2^2} \cdot \frac{f_{01}}{f_{02}} \cdot e^{\frac{W_1 - W_2}{k T}} (S \cdot m^{-1} \cdot Pa \cdot s). \quad (4)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že v případě, kdy platí rovnost  $f_{01} = f_{02}$ ,  $l_1 = l_2$  a  $W_1 = W_2$ , má nárůst konduktivity  $\gamma$  a pokles dynamické viskozity  $\eta$  s teplotou totožný charakter. Za těchto okolností jsou splněny podmínky Waldenova pravidla ve tvaru

$$\gamma \eta = \frac{n q^2}{l_2} = konst. \quad (5)$$

Obecně Waldenovo pravidlo platí v relativně úzkém intervalu teplot a pouze v některých typech kapalných izolantů. Uplatní se zejména v nepolárních kapalinách s minimálním obsahem příměsí a nečistot, pokud se v daném izolantu s teplotou nemění stupeň disociace molekul a vodivost je způsobena pouze ionty vlastní kapaliny. Čím více se uplatňuje vodivost způsobená přítomností příměsí a nečistot, tím více se chování kapalného izolantu odklání od Waldenova pravidla.

### 1.3 Vztahy potřebné pro realizované měření

Vztah pro výpočet **dynamické viskozity  $\eta$** :

$$\eta = t \cdot (s' - s) \cdot k \quad (mPa \cdot s), \quad (6)$$

kde

$s$  je hustota měřené kapaliny při dané teplotě ( $kg \cdot m^{-3}$ ),

$s'$  je hustota kuličky =  $8,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ ,

$k$  je konstanta kuličky =  $9 \cdot 10^{-5} \text{ mP} \cdot m^3 \cdot kg^{-1}$ ,

$t$  je doba pádu kuličky ve viskozimetru (s).



Tab. 1: Závislost hustoty testovaného oleje na teplotě.

| $\vartheta$ (°C)             | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    | 55    | 60    |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> ) | 925,5 | 922,0 | 918,5 | 915,0 | 911,5 | 908,0 | 904,5 | 901,0 |

Vztah pro výpočet rezistivity  $\rho$ :

$$\rho = \frac{R \cdot C_0 (pF)}{0,0859} = R \cdot 362,05 \quad (\Omega \cdot cm), \quad (7)$$

kde

$R$  je celkový odpor dielektrika ( $\Omega$ ),

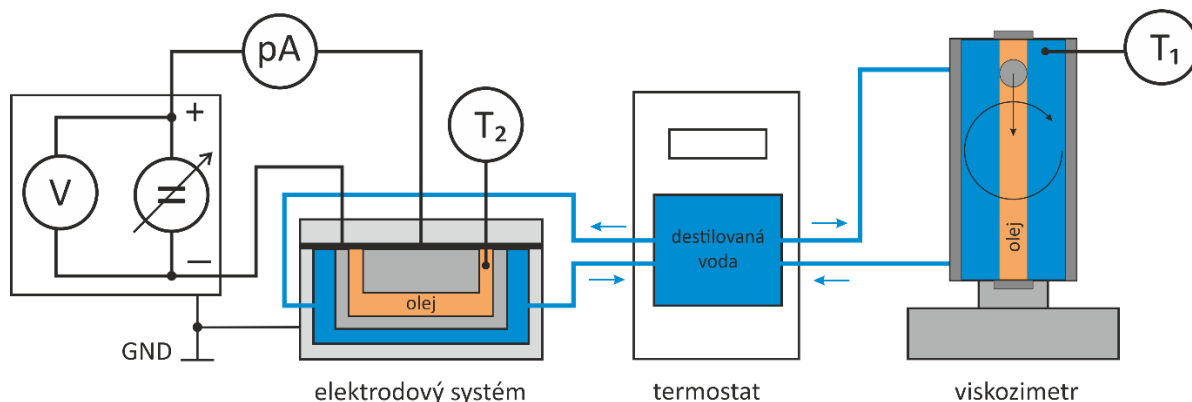
$C_0$  je kapacita měrného kondenzátoru s dielektrikem vzduch,  $C_0 = 31,1$  pF.

## 2 Zadání úlohy

- 1) Změřte teplotní závislost konduktivity  $\gamma$  daného vzorku minerálního oleje. Pro měření konduktivity použijte měření měrného vnitřního odporu voltampérovou metodou prováděné pomocí elektrodového systému pro kapalná dielektrika.
- 2) S pomocí Höpplerova viskozimetru změřte teplotní závislost dynamické viskozity  $\eta$  pro stejný typ oleje.
- 3) V obou případech použijte pro temperování lázně viskozimetru i elektrodového systému cirkulační termostat. Měření realizujte při laboratorní teplotě a poté v teplotním intervalu od 30 °C do 60 °C.
- 4) Výsledky měření shrňte do tabulek a vytvořte grafy závislostí  $\gamma = f(\vartheta)$ ,  $\eta = f(\vartheta)$  a  $\gamma\eta = f(\vartheta)$ . Z průběhu poslední zmíněné závislosti usuzujte na platnost Waldenova pravidla pro proměřované kapalná dielektrika (minerální olej).

## 3 Používané přístroje a další laboratorní vybavení

- zdroj stejnosměrného napětí (se zabudovaným voltmetrem)
- přesný ampérmetr (pikoampérmetr)
- elektrodový systém (měřící kondenzátor) pro kapalná dielektrika (s teploměrem)
- Höpplerův viskozimetr (s teploměrem)
- stopky (pro měření rychlosti pohybu kuličky ve viskozimetru)
- cirkulační termostat



Obr. 1: Schéma zapojení pro měření viskozity a konduktivity oleje (pA – pikoampérmetr, V – voltmetr, T<sub>1</sub> – měření teploty vody ve viskozimetru, T<sub>2</sub> – měření teploty oleje v elektrodovém systému).

## 4 Postup měření

1. Zapojte obvod dle schématu a nechte ho odsouhlasit vedoucím cvičení. Pro připojení pikoampérmetru použijte šedý koaxiální vodič (červeně označený konektor).
2. Zapněte zdroj stejnosměrného napětí a pomocí potenciometru nastavte napětí na svorkách na 20 V.
3. Počkejte 30 s (kvůli odeznění přechodových dějů) a zapněte pikoampérmetr pomocí tlačítka POWER na čelním panelu.
4. Po naběhnutí nastavuje přístroj měřicí rozsah automaticky. Je však třeba počítat s tím, že jednotlivé operace trvají relativně dlouhou dobu, proto nespěchejte. Pro lepší měření je vhodnější nastavit pevný rozsah pomocí tlačítka MAN./AUTO a tlačítkem ↑SET zvýšit rozsah o jednu úroveň. Displej by měl zobrazovat proud v pikoampérech ( $10^{-12}$  A) s přesností na jedno desetinné místo. Toto nastavení by mělo vyhovovat po celou dobu měření.
5. Z teploměru, který je součástí viskozimetru, a z teploměru v elektrodovém systému odečtěte teplotu (nemusí být nutně v obou případech stejná). Odečtěte proud z ampérmetru. Otočte nádobu viskozimetru a pomocí stopky změřte čas, za který urazí kulička ve viskozimetru dráhu vymezenou krajními ryskami.
6. Kromě zjištění elektrického proudu a doby pohybu kuličky mezi ryskami viskozimetru při laboratorní teplotě proveďte měření při teplotách v intervalu od 30 °C do 60 °C s krokem 5 °C. Olej v elektrodovém systému se ohřívá výrazně pomaleji než olej ve viskozimetru.



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



*Podklady ke cvičení z předmětu KET/ELTM*

*FEL, ZČU v Plzni*

7. Zapněte cirkulační termostat a nastavte teplotu 70 °C.
8. Sledujte rostoucí teplotu vody v plášti viskozimetru (v podstatě shodná s teplotou oleje) a teplotu oleje v elektrodovém systému. Při dosažení požadované teploty vždy změřte čas pohybu kuličky mezi ryskami v trubici viskozimetru a odečtěte hodnotu proudu z ampérmetru (v jiném čase).
9. Po skončení měření vypněte pikoampérmetr a zdroj napětí a začněte chladit vodu v cirkulačním termostatu nastavením teploty 20 °C.