

Reologické chování tekutin – stanovení reogramů – [RC]

(Oldřich Holeček, Andra Nistor, Martin Kroupa, Pavel Kupka, Jiří Charvát)

1. Úvod

Při proudění tekutin působí na tekutinu smykové napětí a systém koná práci. Práce smykového napětí se mění na teplo a tento proces pak nazýváme vnitřní tření (disipace mechanické energie). Viskozita je látková vlastnost, která udává jaký je odpor proti vzájemnému pohybu jednotlivých částic tekutin, respektive jak snadno se tekutina poddává napětí. Čím vyšší je viskozita, tím větší bude odpor tekutiny k pohybu. Znalost viskozity tekutin (tj. reologické chování) je proto důležitá např. při sdílení hmoty, míchání či dopravě tekutin.

2. Teorie

2.1. Viskozita newtonských a neneutronských tekutin

V ideální tekutině neexistují smyková (tečná) napětí τ . U reálných tekutin se tečná napětí nevyskytují pouze v případě, že se tekutina nepohybuje. Při proudění tekutin mají dvě sousední vrstvy (proudnice) rozdílné rychlosti a na rozhraní mezi nimi vzniká smykové napětí, které je důsledkem viskozity tekutiny.

Vztah mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí v tekutinách popisuje Newtonův zákon viskozity. Představme si tekutinu, která se nachází mezi dvěma rovnoběžnými deskami, jejichž vzdálenost h je konstantní (Obr. 1). Horní deska o ploše A plave na tenké vrstvě tekutiny konstantní rychlostí v a spodní deska je v klidu. Po určité době pozorujeme ve vrstvě tekutiny lineární rychlostní profil a síla F potřebná k tomu, abychom udrželi desku v rovnoměrném pohybu, je pak dána vztahem

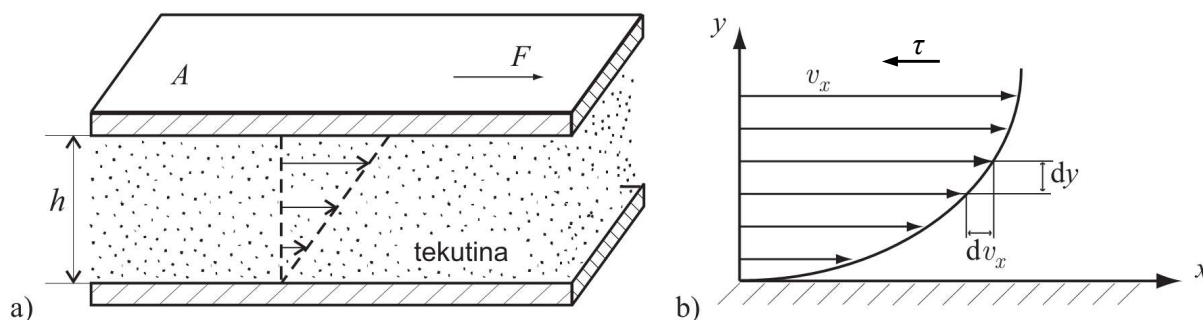
$$F = \tau A = -\eta \frac{v}{h} A, \quad (1)$$

$$\tau = -\eta \frac{v}{h}, \quad (2)$$

kde η je dynamická viskozita, která má jednotku Pa·s. Pokud rovnici (2) zapíšeme v diferenciálním tvaru, získáme Newtonův zákon viskozity

$$\tau = -\eta \frac{dv_x}{dy} = -\eta \gamma, \quad (3)$$

kde γ je gradient smykové rychlosti a má jednotku s^{-1} .



Obr 1: a) Lineární a b) nelineární rychlostní profil v tekutině

Tekutiny, jejichž reologické chování lze popsat Newtonovým zákonem viskozity, nazýváme newtonskými. Mezi newtonské tekutiny patří všechny plyny i páry a mnoho běžných tekutin. Tekutiny, jejichž reologické chování nelze popsat Newtonovým zákonem viskozity, nazýváme nenewtonskými tekutinami. Pro nenewtonské tekutiny platí analogická rovnice jako pro newtonské

$$\tau = -\eta_a \frac{dv_x}{dy} = -\eta_a \gamma, \quad (4)$$

kde je η_a zdánlivá dynamická viskozita, která není konstantní a závisí na smykové rychlosti. Tokové chování nenewtonských tekutin lze plně popsat pouze pomocí reologických křivek za dané teploty. Reologické křivky (reogramy) popisují závislost smykového napětí τ na smykové rychlosti γ . Nenewtonské tekutiny se dle tokového chování rozdělují na:

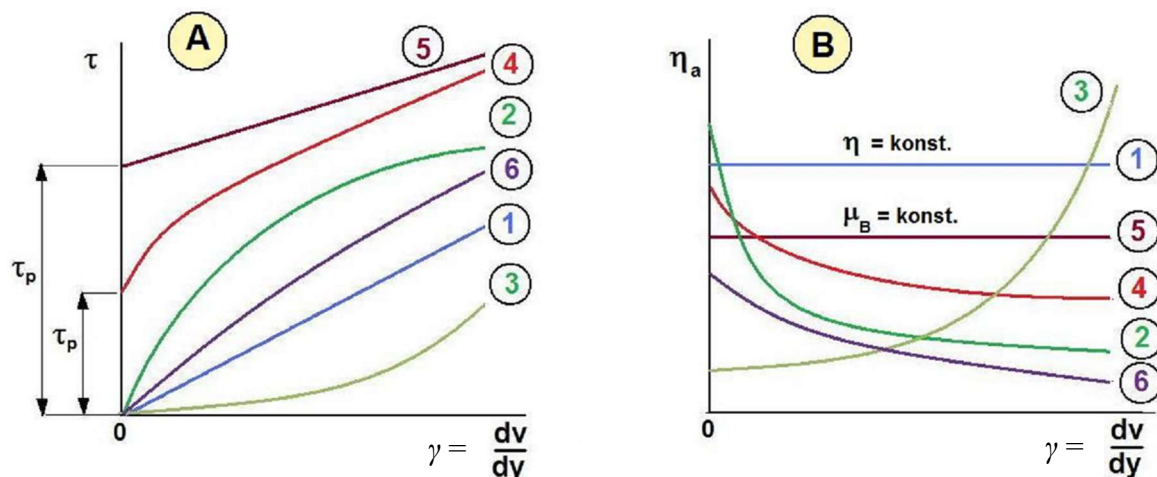
1. Pseudoplastické a dilatantní – viskozita je závislá na smykové rychlosti
2. Binghamské – vykazují mez toku
3. Tixotropní a reopektické – časově závislá viskozita

Pseudoplastické tekutiny jsou řidnoucí tekutiny, což znamená, že jejich zdánlivá viskozita při rostoucím gradientu rychlosti začne klesat. Tyto tekutiny tečou i při malém napětí, což je vítanou vlastností v průmyslu. Tato vlastnost totiž snižuje energetickou náročnost při dopravě či míchání. Mezi pseudoplastické tekutiny patří např. suspenze nesouměrných částic, některé koloidní roztoky, taveniny a roztoky polymerů, barvy, latexy apod. S rostoucím rychlostním gradientem se částice či molekuly začnou orientovat ve směru pohybu tekutiny. Předpokládá se, že tato orientace je okamžitá již při působení malých smykových napětí. Pokud změna struktury nastane až po určité době, pak takové tekutiny nazýváme *tixotropní*.

Dilatantní tekutiny jsou houstnoucí tekutiny, což znamená, že jejich zdánlivá viskozita při rostoucím gradientu rychlosti začne růst. Mezi dilatantní tekutiny patří např. rozpouštědla barev, škrobové mazy, beton, některé polymerní roztoky nebo med. Při malých rychlostních gradientech tekutina působí jako mazivo mezi částicemi. Avšak při vyšších rychlostních gradientech se částice začnou uspořádávat do vrstev a suspenze se mírně roztáhne (dilatuje). V důsledku toho vzroste mezerovitost mezi částicemi a tím i smykové napětí. Běžněji se však setkáváme s *reopektickou tekutinou*, kde dilataci suspenze pozorujeme s určitým zpožděním (tento jev nazýváme reopexie).

Binghamské tekutiny jsou ideálně plastické tekutiny. U těchto tekutin dochází k toku až po překročení počátečního smykového napětí též nazývané dynamická mez toku. Po dosažení tohoto napětí se původně stabilní struktura tekutiny rozpadne a začne se chovat newtonovsky. Mezi Binghamské tekutiny patří např. koncentrované kašovitě a zrnité suspenze, průmyslové a odpadní kaly, gely apod.

Ukázky reogramů a závislostí zdánlivých viskozit na gradientu smykové rychlosti některých nenewtonských tekutin jsou zobrazeny na Obr. 2.



Obr. 2: Ukázky A) reologických křivek a B) závislostí zdánlivých viskozit tekutin na smykové rychlosti. Tekutina: 1) newtonská, 2) pseudoplastická, 3) dilatantní, 4) skutečná plastická, 5) Binghamova – ideálně plastická, 6) Eyringův model

Pro nenewtonské tekutiny není zdánlivá viskozita látkovým parametrem (konstantou), ale proměnnou veličinou. Ani zdánlivá, ani diferenciální viskozita nejsou pro nenewtonské tekutiny konstantní, a proto se pro fyzikální hodnocení těchto tekutin používá závislosti smykového napětí na gradientu rychlosti vyjádřením pomocí tzv. reologických modelů (Tab. 1).

Tab 1: Některé reologické modely pro reogramy nenewtonských tekutin bez inflexních bodů

Název modelu	Rovnice
Lineární	$\tau = \eta \gamma$
Ostwaldův	$\tau = A \gamma^B$
Hyperbolický	$\tau = A + \frac{B}{\gamma}$
Steiger Oryův	$\gamma = A \tau + B \tau^3$

3. Cíl práce

Cílem této práce je stanovit druhy tokového chování z reologických křivek několika různých vzorků tekutin. U pseudoplastické tekutiny vybrat vhodný model, který nejlépe popisuje tokový průběh tekutiny, a stanovit konstanty daného modelu. U vzorku skutečně plastické tekutiny určit mez toku.

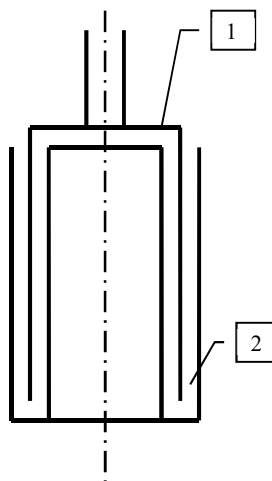
4. Popis zařízení

Viskozitu budeme měřit na rotačním viskozimetru Rheolab QC od firmy Anton Paar. Většina rotačních viskozimetrů funguje tak, že vzorek kapaliny je umístěn mezi dvěma blízkými plochami o známé geometrii, z nichž jedna je pevná a druhá se otáčí. Měří se frekvence otáčení a moment síly, kterým je třeba na otáčející se plochu působit, aby se udržela konstantní

frekvence otáčení. Řešením rovnic toku za předpokladu, že proudění tekutiny v mezeře mezi plochami je laminární, se dá pro dané geometrické uspořádání odvodit vztah

$$\eta = \frac{C M_f}{2\pi f}, \quad (5)$$

kde C je pro danou geometrii měřicího systému konstanta, M_f moment síly a f frekvence otáčení. Rheolab QC má několik vyměnitelných měřících systémů s různou geometrií, přičemž pro tuto úlohu používáme systém s označením DG42. Schematický náčrtek systému DG42 je na Obr. 3. Pro tento systém je vztah pro konstantu C velmi složitý, proto ho zde neuvádíme.



Obr. 3: Měřicí systém DG42 reometru Rheolab QC; 1 – otáčivý dutý válec, 2 – válcová mezera

5. Postup práce

Na začátku laboratorního cvičení dostane pracovní skupina pracovní list s údaji o požadovaném složení roztoků a následně asistent sdělí experimentální podmínky, za kterých se budou jednotlivé vzorky proměřovat. Poté zapneme reometr a vyčkáme, až skončí automatický test přístroje a na displeji se objeví menu. Během zapínání přístroje by neměla být hřídel měřící cely zapojena do reometru. Před měřením velmi opatrně vyjmeme měřicí systém a do válcové mezery injekční stříkačkou s plastovou špičkou vpravíme asi 10 ml vzorku. Následně dutý válec s hřídelí zasuneme do mezery. Pokud část vzorku přeteče otvory, které jsou z tohoto důvodu vytvořeny na horní ploše dutého válce, odsajeme přebytek vzorku injekční stříkačkou či buničinou. Zasuneme sestavený měřicí systém do reometru a pomocí posuvného prstýnku zaaretujeme hřídel v reometru tak, aby se svislé čárky na prstýnku a hřídeli překrývaly. Po zaaretování dojde k načtení mikročipu, které je potvrzené pípnutím přístroje. Poté nastavíme předepsaný program měření z pracovního listu a spustíme měření. Veškerá měřená data se zapisují do paměti přístroje. Ta se po posledním měření nahrají do počítače ve formátu programu EXCEL. Studenti si na tuto úlohu přinesou flash disk, na který si pak data přenesou.

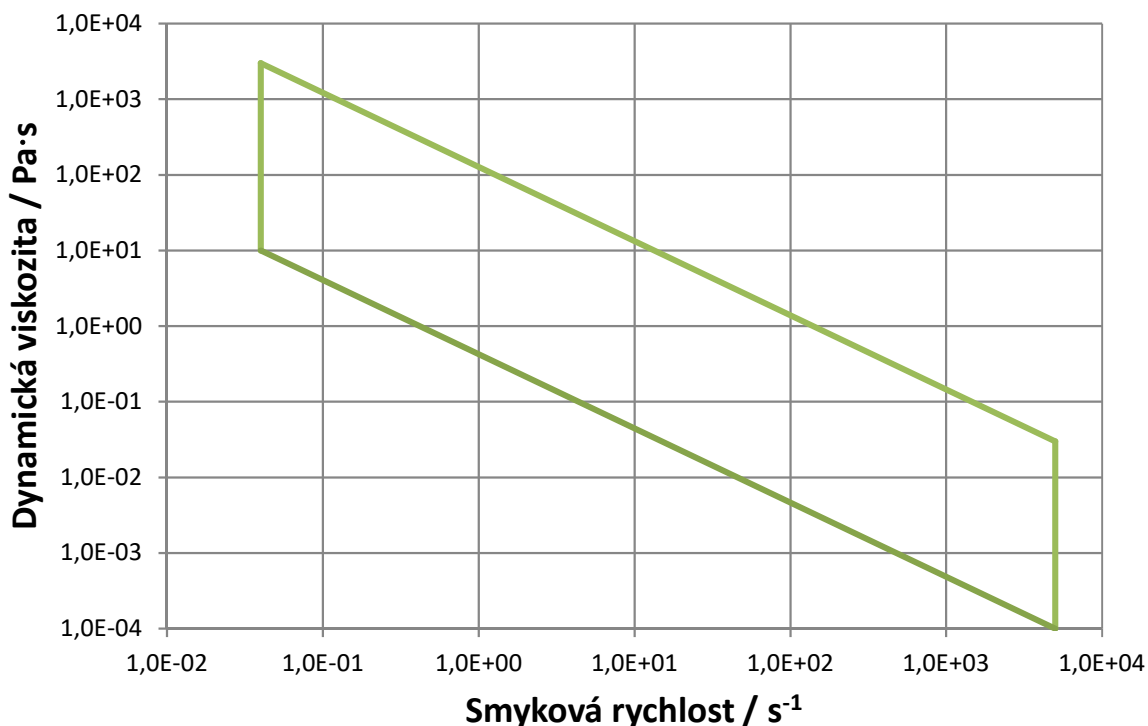
Před dalším měřením je třeba opět rozšroubovat měřicí systém, opláchnout všechny plochy, které přijdou do styku se vzorkem, čistým rozpouštědlem a papírovými utěrkami utřít do sucha. Při zpětné montáži dejte pozor, abyste nepoškodili teflonové těsnění mezi oběma díly spodní části. Při mytí pohyblivého dutého válce velmi pečlivě dbejte na to, abyste nepolili

horní konec hřídele. Je v něm zabudován mikročip, ze kterého si reometr přečte typ a hodnoty geometrických parametrů použitého měřicího systému. Pokud by mikročip přeci jen přišel do kontaktu s vodou, ihned jej pečlivě utřete čistou papírovou utěrkou a nechte před opětovnou instalací do reometru dokonale uschnout. Také o této skutečnosti ihned informujte asistenta.

Po posledním měření opět vyčistěte měřicí systém i celé pracoviště, měřicí systém uložte do originálních pouzder, přeneste data na flash disk a reometr vypněte.

6. Zpracování výsledků

V první řadě je nutné zjistit, zda se naše experimentální podmínky nacházejí v pracovní oblasti, pro které lze reometr s daným měřicím systémem použít. Experimentální podmínky mohou být zvoleny chybně v podstatě ze dvou důvodů: (i) buď volíme pro měření vzorek a použitou konfiguraci přístroje frekvenci otáčení příliš nízkou, takže hodnota momentu M_f je příliš malá a přístroj ji nemůže s dostatečnou přesností změřit, nebo (ii) volíme frekvenci otáčení příliš vysokou, v měřicím systému není laminární proudění a neplatí rovnice (5), ze které software reometru viskozitu počítá. U newtonských kapalin se chyba v obou případech projeví tím, že naměřená viskozita závisí na frekvenci otáčení, což není u těchto kapalin možné. U nenewtonských kapalin tato závislost existuje, takže si s tímto jednoduchým kritériem nevystačíme, proto je k reometru dodáván graf, na kterém je znázorněna povolená oblast měření v souřadnicích rychlosti deformace (smyková rychlost) proti dynamické viskozitě (Obr. 4). Proveďte tuto kontrolu pro vámi použité experimentální podmínky vykreslením této závislosti do jednoho grafu a porovnáním s grafem na Obr. 4. Graf pro použitou měřicí aparaturu je k dispozici v programu excel. Název souboru je „MS_DG42_oblast_mereni“ a je umístěn na ploše počítače měřicí aparatury. Nejpozději do týdne pošlete vypracovaný protokol na email a na následujícím laboratorním cvičení odevzdejte vyplněný formulář protokolu.



Obr. 4: Oblast podmínek měření, ve které výrobce zaručuje správnou funkci měřicího systému DG42,

Do protokolu vykreslete do jednoho grafu reologické křivky (závislost smykového napětí na smykové rychlosti) a do druhého grafu závislosti (zdánlivé) dynamické viskozity na smykové rychlosti všech naměřených vzorků. Stanovte druhy tokového chování jednotlivých roztoků. U pseudoplastické tekutiny, jejíž závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti neobsahuje inflexní bod, zvolte reologický model z Tab. 1, který nejlépe popisuje průběh dané křivky. Porovnejte experimentální data pouze s prvními třemi modely (např. pomocí software Microsoft Excel, Maple či MATLAB), porovnání křivek vykreslete do grafu a stanovte konstanty modelu, který nejlépe data prokládá. U skutečné plastické tekutiny určete vlastní metodou mez toku z naměřených hodnot.

7. Bezpečnostní předpisy

1. Operaci nasazování měřicího systému si musíte nechat prakticky předvést od pracovníka laboratoře. Měřicí systém je velmi přesně vyroben, jakékoliv hrubé zacházení jej může zničit a poškodit tak reometr. Pádem na podlahu se měřicí systém zničí téměř s jistotou. Jeho cena je 85 000 Kč.
2. Horní konec osy dutého válce měřicího systému obsahuje mikročip a nesmí v žádném případě přijít do kontaktu s vodou.
3. Při programem řízených operacích se nedotýkejte otáčivých částí reometru. Program může náhle nastavit vysokou frekvenci otáčení a mohlo by dojít k poranění.
4. Při jakékoliv montáži a demontáži nepoužívejte hrubou sílu, neboť by mohlo dojít k poškození přístroje. Pokud Vám určitá manipulace s přístrojem nepůjde, přivolejte asistenta.

8. Kontrolní otázky

1. Co popisují a k čemu slouží reologické křivky (reogramy)?
2. Jak dělíme nenewtonské tekutiny dle reologického chování tekutin?
3. Jak se bude měnit velikost tečného napětí s rostoucím gradientem smykové rychlosti u jednotlivých typů kapalin?
4. Které fyzikální veličiny se přímo měří na rotačním viskozimetru?
5. Jaký druh proudění musí být v rotačním viskozimetru, aby získané hodnoty viskozit byly správné?
6. Jaké jsou dvě nejčastější příčiny nesprávných výsledků při měření na rotačních viskozimetrech?
7. Jaký typ kapalin je výhodný z hlediska dopravy v průmyslu a proč?
8. Jaký vztah popisuje souvislost mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí v tekutinách?
9. V jakém směru (z hlediska směru smykové rychlosti) působí smykové napětí?