

FOLYADÉK BELSŐ SÚRLÓDÁSÁNAK MÉRÉSE

Sáray István, Wiener Csilla, Szommer Péter, Zavaczki Csilla

1. Elméleti háttér

Viszkozitás

Ha pohárban lévő mézet kiskanállal gyorsan kevergetjük, akkor egy idő után a pohár is forogni kezd anélkül, hogy a kiskanállal a pohárhoz érnénk. Ebben az esetben a méz hozza forgásba a poharat. A jelenséget *belső súrlódás*nak nevezzük. Ilyenkor a mozgó folyadékban az egymáshoz képest nemnulla relatív sebességű folyadékrétegek között érintő irányú erők, súrlódási erők ébrednek.

A folyadék mozgása közben ébredő súrlódási erőket a következő kísérlettel határozhatjuk meg. Vegyünk két párhuzamos, A területű merev síklemezt, amelyek közül az alsót rögzítsük le. Öntsük a lemezek közé a vizsgálni kívánt folyadékot, majd mozgassuk a felső lapot kis v sebességgel. A mérések azt mutatják, hogy vékony folyadékréteg esetén a felső lap mozgatásához szükséges F erő egyenesen arányos A -val és a lemezek egymáshoz viszonyított v relatív sebességével, és fordítottan arányos a lemezek d távolságával. A belső súrlódási erő tehát

$$F = \eta A \frac{v}{d},$$

ahol az η arányossági tényezőt belső súrlódási vagy viszkozitási együtthatónak nevezzük; értéke függ a folyadék anyagi minőségétől. Mértékegysége

$$\frac{N}{m^2} s = Pa \cdot s.$$

(Régebbi mértékegysége a most már nem használatos poise; $1P = 0,1 \cdot Pa \cdot s$).

Súrlódó folyadékoknál – ahol tehát a folyadék mozgása közben súrlódási erő lép fel – ha a folyadék különböző sebességű, egymással párhuzamos rétegekre bontható, *lamináris* vagy *réteges áramlás*ról beszélünk. Egy kritikus sebesség fölött azonban az áramlási kép megváltozik: örvények képződnek, és az áramvonalak szabálytalan, ide-oda kanyargó görbéket alkotnak. Ezt az áramlást *turbulens* vagy *kavargó áramlás*nak nevezzük.

Stokes-féle súrlódási törvény

Ha egy golyót áramló folyadékba helyezve a golyó környezetében lamináris áramlás alakul ki, akkor a belső súrlódás miatt a folyadék a golyóra erőt gyakorol. A *Stokes-féle súrlódási törvény* azt mondja ki, hogy az r sugarú, a folyadékhoz képest v sebességgel mozgó gömb alakú golyóra a sebességgel arányos

$$F = 6\pi\eta r v$$

közegellenállási erő hat, ahol η a folyadék viszkozitása.

Ha a golyót folyadékba ejtjük, akkor a fenti erőn kívül még a nehézségi erő és a felhajtóerő is hat rá. A golyó az egymással ellentétes irányú nehézségi erő és felhajtó erő eredőjének

irányába gyorsul. Ha a folyadék sűrűsége kisebb a golyó sűrűségénél, akkor a golyó lefelé kezd esni és egészen addig gyorsul, amíg a sebességével arányosan növekvő, de azzal ellentétes irányú közegellenállási erő nagysága el nem éri ennek az eredő erőnek a nagyságát. Ebben a pillanatban a golyóra ható erők eredője nulla lesz:

$$mg - F_{fel} - 6\pi\eta rv = 0.$$

A golyó ezután már nem gyorsul tovább, állandó sebességgel mozog lefelé. Ez az erőegyensúly elég hamar bekövetkezik, így a golyó mozgása a folyadékban egy rövid átmeneti szakasz után egyenletesnek tekinthető.

Felhasználva, hogy a felhajtóerő $F_{fel} = V\rho_g g$ és a gömb térfogata $V = \frac{4\pi}{3}r^3$, az előbbi egyenlet felírható sűrűségek segítségével:

$$\frac{4\pi(\rho_g - \rho_f)r^3g}{3} - 6\pi\eta rv = 0.$$

Ebből a viszkozitási együttható:

$$\eta = \frac{2(\rho_g - \rho_f)r^2g}{9v}.$$

Reynolds szám

A Stokes-féle súrlódási törvény csak lamináris áramlás esetén érvényes. Megmutatható, hogy a lamináris áramlás turbulenssé válása függ az áramlás átlagos v sebességétől, az áramlásra geometriailag jellemző r hossz mérettől valamint a folyadék ρ sűrűségétől és η viszkozitásától. Az áramlás csak addig marad lamináris, amíg az

$$Re = \frac{\rho rv}{\eta}$$

dimenziótlan mennyiség, az úgynevezett *Reynolds-szám* el nem ér egy kritikus értéket.

A Stokes-féle törvény érvényességének feltétele az, hogy a Reynolds szám értéke 0,1 alatt legyen. (Itt az áramlást geometriailag jellemző paraméter a golyó sugara, v pedig a golyó és a folyadék relatív sebessége, azaz a golyó sebessége.)

2. A mérés leírása

A glicerín belső súrlódási együtthatóját kétféle módszerrel határozzuk meg: Höppler-féle viszkoziméterrel és a Stokes-féle törvényen alapuló méréssel.

Höppler-féle viszkoziméterrel való mérés

A Höppler-készülék mérésre kész állapotban találjuk a mérőhelyen (1.ábra). A mérés abból áll, hogy megmérjük azt a t időt, amely alatt a golyó a csőben a legfelső jelvonaltól a legalsó jelvonalig süllyed. Mivel a folyadékoszlop átmérője csak kicsit nagyobb a golyó átmérőjénél, ezért a viszkoziméterben lévő folyadék (jelen esetben a glicerín) viszkozitása a Stokes-féle törvény alapján nem számítható. A viszkozitás ehelyett az alábbi empirikus összefüggéssel határozható meg:

$$\eta = K(\rho_g - \rho_f)t,$$

ahol K a golyóállandó, értéke az alkalmazott összeállításra vonatkozólag $0,13 \text{ milliPacm}^3/\text{g}$, ρ_g a golyó sűrűsége, értéke $8,1 \text{ g/cm}^3$ és ρ_f pedig a glicerin sűrűsége. Ez utóbbit a mérőhelyen található areométerrel mérjük, amelyet a gyakorlatvezetőtől kell elkérni.



1. ábra. Höppler-féle viszkoziméter.

Stokes-féle törvényen alapuló mérés

Az 1000ml-es mérőhengert megtöltjük glicerinnel úgy, hogy a folyadékszint kb. 3 cm-rel a legfelső osztásvonal fölött legyen (2. ábra). A mérőhengert közrefogó két helyzetjelzőt beállítjuk egymástól körülbelül 25-30 cm távolságra, lehetőleg igazodva a mérőhenger osztásvonalaihoz, és megmérjük pontosan a jelzővonalak távolságát. A golyótartó dobozokból csipesszel kivesszük a megfelelő méretű golyót, és csavarmikrométerrel legalább három irányból megmérjük a golyó átmérőjét. Az (1) képletben szereplő r sugarat a három átmérő átlagából számítjuk. A megmért átmérőjű golyót csipesszel a glicerinbe mártva, de a folyadékfelszín közelében tartva elengedjük, és stopperrel megmérjük az esési időt. Ezt a mérést minden golyónagyság esetében legalább háromszor végezzük el. Az ejtési kísérleteket csak az e célra szánt, külön dobozokban tárolt, válogatott golyókkal hajtsuk végre. Minden egyes golyónak, amelynek megmérjük az esési idejét, meg kell mérni az átlagos átmérőjét! (Azaz egy golyóméret esetén ez legalább kilenc átmérőmérést jelent.)



2. ábra. Glicerinnel töltött mérőhenger helyzetjelzőkkel.

Figyeljünk arra, hogy a golyók ne legyenek vizesek, és a glicerinben ne tapadjon hozzájuk légbuborék, mert ez teljesen meghamisítaná az eredményeket.

A golyók ρ_g sűrűségének mérése

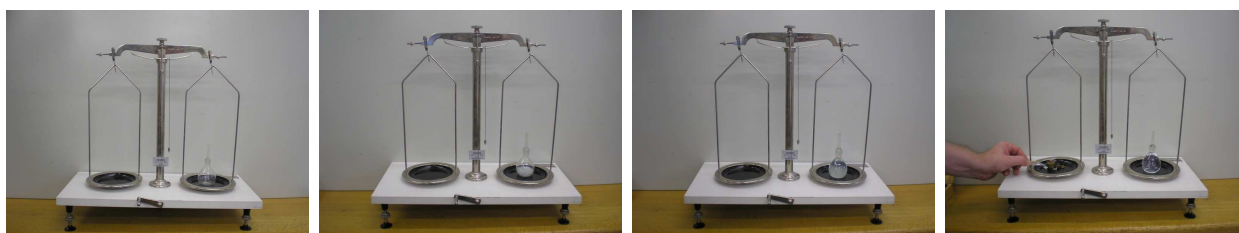
Az η kiszámításához szükség van a golyók anyagának ρ_g sűrűségére is, amelyet piknométer segítségével mérhetünk meg a legegyszerűbben (3.ábra). A piknométer voltaképpen egy üvegdugóval ellátott üvegedény, amelynek térfogata pontosan meghatározott, reprodukálható érték. Mérésnél az üvegdugónak mindig rajta kell lenni a piknométeren, és az edénynek kívülről száraznak kell lennie.



3.ábra. Piknométer és golyók a golyósűrűség meghatározásához.

Először megmérjük a piknométer súlyát üresen (μ_1) (4a. ábra), majd a mérendő szilárd testtel (üveggolyókkal) együtt (μ_2) (4b.ábra). A kellő pontosság elérésére a piknométert legalább félig töltjük meg golyókkal. (Az üveggolyók sűrűségméréséhez odakészített kis dobozban lévő (méret szerint nem válogatott) üveggolyókat *mind* öntsük a piknométerbe.)

Ezután hozzátöltjük a golyókhoz az ismert sűrűségű folyadékot, esetünkben desztillált vizet, gondosan ügyelve arra, hogy a golyókhoz tapadó légbuborékok eltávozzanak a piknométerből (4c.ábra). Ezt rázogatóssal és kivárással érhetjük el. A folyadék szintjét pontosan a piknométer dugóján lévő jelhez állítjuk be, és – gondos szárazra törlés után – ismét lemérjük a piknométer tömegét (μ_3).Végül megmérjük a csupán desztillált vízzel a jelig töltött piknométer tömegét (μ_4) (4d.ábra).



4.ábra. A golyók sűrűségének meghatározása.

Ezekből az adatokból kiszámíthatjuk a golyók sűrűségét, ugyanis a szilárd test tömege:

$$\mu = \mu_2 - \mu_1$$

A szilárd testtel egyenlő térfogatú desztillált víz tömege pedig:

$$\mu_v = (\mu_4 - \mu_1) - (\mu_3 - \mu_2) = \rho_v V,$$

ahol ρ_v a desztillált víz sűrűsége, V pedig a golyók össztérfogata. Így a szilárd test, azaz az üveggolyó sűrűsége:

$$\rho_g = \frac{\mu}{V} = \rho_v \frac{\mu}{\mu_v} = \rho_v \frac{\mu}{\mu_4 - \mu_1 - \mu_3 + \mu_2}.$$

Az egyszerűség kedvéért a szobahőmérsékletű desztillált víz sűrűsége 1g/cm^3 legyen.

Ne felejtjük el ellenőrizni, hogy teljesülnek-e a képletek érvényességi feltételei, azaz a Reynolds számok kisebbek-e a kritikus értéknél. A probléma itt az, hogy a Reynolds számok meghatározásához eleve szükségünk van η helyes értékére ahhoz, hogy megítélhessük η -ra vonatkozó mérésünk megbízhatóságát. Ezekbe a képletekbe a Höppler-féle viszkoziméterrel mért viszkozitási értéket helyettesítsük be.

Mérési feladatok

1. Határozzuk meg a glicerin viszkozitási tényezőjét Höppler-féle viszkoziméterrel. A további méréseknél az így kapott értékeket használjuk fel a Reynolds számok meghatározására. A viszkoziméter hőmérője (amennyiben nem található a berendezésben, akkor az areométerben levő hőmérő) által jelzett hőmérsékletet jegyezzük fel, ugyanis a viszkozitási együttható erősen függ a hőmérséklettől (és a glicerin nedvességtartalmától is).
2. Mérjük meg a glicerin viszkozitási együtthatóját két féle üveggolyó esetén a Stokes-féle törvény alapján, és határozzuk meg a Reynolds számokat is. Adjuk meg a kapott η hibáját. (A hibaterjedéssel számolt képletben a sűrűségadatok hibáit vegyük zérusnak.) A mérés adatait foglaljuk táblázatba.
3. Készítsünk eredménytáblázatot, amely tartalmazza a különböző mérési módszerekkel kapott viszkozitási együttható értékét és annak hibáját, a Reynolds számokat, és hasonlítsuk össze ezt a szakirodalomban található adatokkal.