

FP2–V1. Napetost površine

Ključni pojmovi

Specifična površinska energija, napetost površine, molarna napetost površine, okrajnji kut, kapilarnost, torzijski dinamometar

I. TEORIJSKI UVOD

Površinska napetost¹

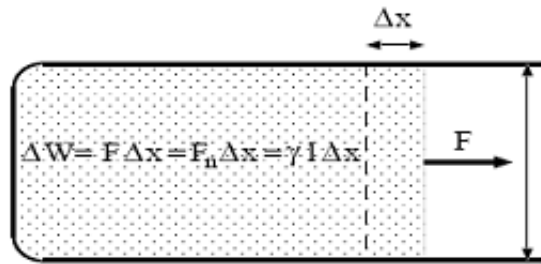
Na molekulu u tekućini djeluju sile susjednih molekula. One djeluju sa svih strana pa je rezultantna sila na dotičnu molekulu jednaka nuli (tlak je izotropan). Međutim, rezultantna sila na molekulu koja se nalazi na površini tekućine nije jednaka nuli, već je usmjerena prema unutrašnjosti tekućine. Stoga tekućina nastoji poprimiti oblik koji će imati najmanju površinu (kap vode u bestežinskom stanju ima oblik kugle). Za povećanje površine tekućine potreban je rad. Definiramo specifičnu površinsku energiju neke tekućine:

$$\gamma = \frac{dW}{dA} \quad (1)$$

koja nam kaže koliki je rad dW potrebno izvršiti da se površina tekućine poveća za dA (Slika 1 u granici $\Delta x \rightarrow dx$). Specifičnu površinsku energiju možemo shvatiti i kao silu F_n koja djeluje **okomito na rub** tekućine duljine l , a **tangencijalno površini** tekućine. Tada tu veličinu nazivamo napetost površine:

$$\gamma = \frac{F_n}{l} \quad (2)$$

Veza između prethodnih dvaju izraza je izravna uzmemo li u obzir da je $dW = F_n dx$ i $dA = l dx$.



Slika 1: Rad vanjske sile F potreban za povećanje površine tekućine za iznos $\Delta A = l \Delta x$.

Temperaturni koeficijent

Gotovo u svim tekućinama napetost površine linearno se smanjuje s povećanjem temperature:

$$\gamma(T) = \gamma_0(T_K - T) \quad (3)$$

gdje parametar T_K predstavlja ekstrapoliranu temperaturu pri kojoj bi napetost površine promijenila predznak, a γ_0 je konstanta. Ako uvedemo molarni volumen V_m (volumen koji sadrži jedan mol tvari), možemo definirati molarnu napetost površine:

$$\gamma_m = \gamma V_m^{2/3} \quad (4)$$

Eksponent posljedica je činjenice da se veličina γ odnosi na dvodimenzionalnu površinu, a molarni volumen jest trodimenzionalan pojam. Temperaturna ovisnost molarne napetosti površine dana je relacijom:

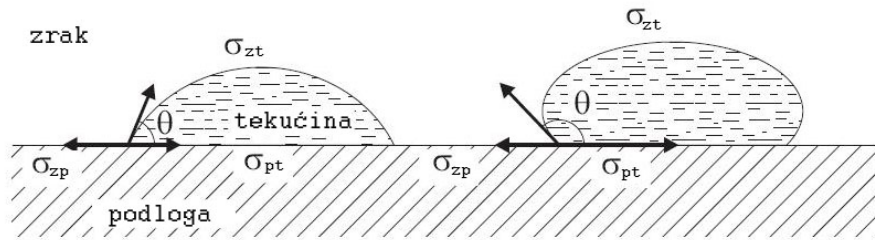
$$\gamma_m(T) = k_\gamma(T_K - T) \quad (5)$$

gdje je temperaturni koeficijent $k_\gamma = \gamma_0 V_m^{2/3}$ isti za gotovo sve tekućine (Eötvösova jednadžba) i iznosi:

$$k_\gamma = 2,1 \times 10^{-7} \text{ J/K}$$

Ako se eksperimentalno utvrdi da je k_γ veći od te vrijednosti, zaključujemo da se molekule u tekućini disociraju s porastom temperature, a ako je pak k_γ manji, molekule se asociiraju s porastom temperature.

¹ U ovome paragrafu – koji smo namjerno ostavili jednakim kao u izvorno napisanoj pripremi – nešto je formalno pogrešno napisano. Što?



Slika 2: Tekućine koje moče (lijevo) i koje ne moče podlogu (desno).

Okrajnji kut

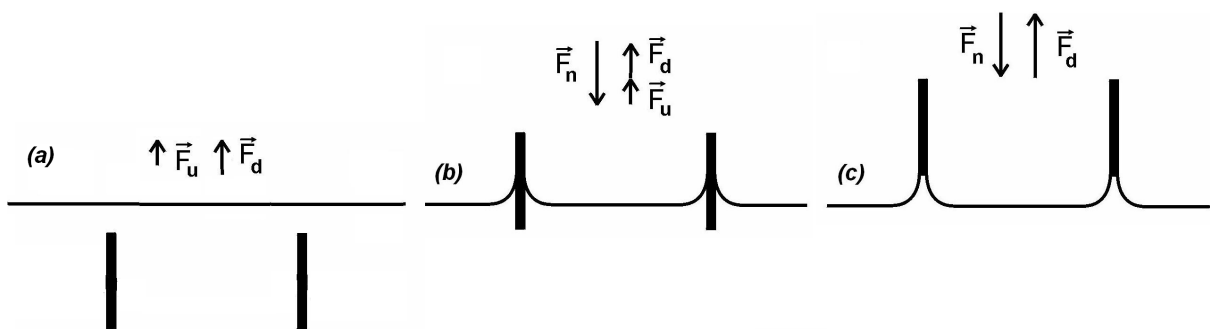
Granica čvrstog tijela i tekućine karakterizirana je okrajnjim kutom pod kojim se sastaju površina tekućine i površina čvrstog tijela (Slike 2 i 5). Za tekućine koje moče čvrstu podlogu okrajnji kut je $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, a za tekućine koje ne moče podlogu je $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$. Ako tekućina savršeno moči čvrstu podlogu, okrajnji kut je $\theta = 0^\circ$. U tom će se slučaju tekućina na čvrstoj vodoravnoj podlozi potpuno razliti do najtanjega mogućeg sloja. U protivnom slučaju savršena nemočenja, kada je okrajnji kut $\theta = 180^\circ$, tekućina će formirati kapljicu, nastojeći što više smanjiti dodirnu plohu s čvrstom površinom.

II. MJERNI UREĐAJ I MJERENJE

Metoda otkidanja prstena

U ovom dijelu vježbe mjeri se sila potrebna da se horizontalni prsten polumjera r otkine od površine tekućine (Slika 3). Uroni li se prsten u tekućinu, krak dinamometra podići će se za iznos uzgona (Slika 3a). Ispuštanjem tekućine iz posude, prsten će početi izranjati. Pretpostavimo da tekućina savršeno moči prsten. Tada je okrajnji kut $\theta = 0^\circ$, a sila napetosti površine djeluje vertikalno prema dolje. Ako je prsten djelomično uronjen u tekućinu (Slika 3b), na njega – pored težine, koju ćemo "pokupiti pod tepih" baždarenjem dinamometra na nulu – djeluju tri sile: sila dinamometra F_d , sila uzgona F_u i sila napetosti površine F_n . Daljnjim ispuštanjem tekućine prsten izranja, čime se sila uzgona smanjuje. U jednom će trenutku prsten izroniti toliko da će sila uzgona iščeznuti, a sila dinamometra bit će jednaka zbroju težine prstena i sile napetosti površine (Slika 3c). Povećamo li u tom trenutku silu za infinitezimalni iznos (što je ekvivalentno spuštanju razine tekućine), prsten će se otkinuti, a skala dinamometra (baždarenog na nulu tik prije okidanja) pokazat će nam iznos sile $F_d = F_n$. Rub tekućine l u trenutku otkidanja jednak je dvostrukom obodu prstena ($l = 2 \cdot 2r\pi$) jer uzdignuta tekućina ima dvije površine. Konačno dobivamo za površinsku napetost:

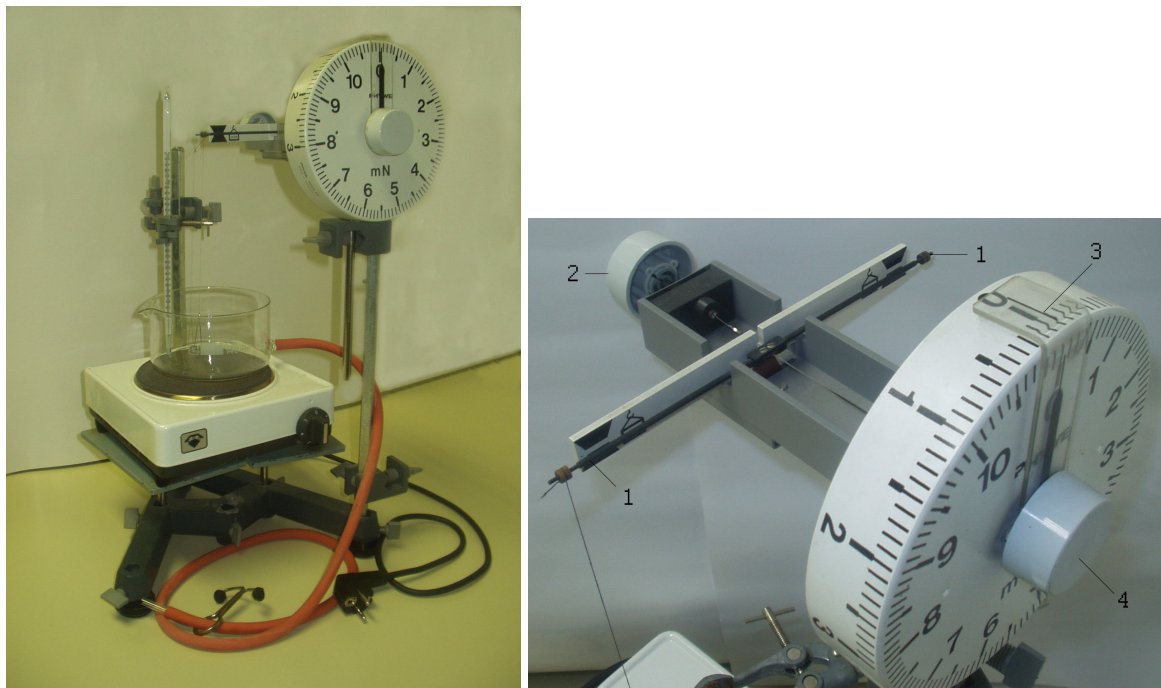
$$\gamma = \frac{F_n}{l} = \frac{F_d}{4r\pi} \quad (6)$$



Slika 3: Sile na prsten – pored težine samog prstena – u tri faze mjerenja.

Mjerenje

Čisti metalni prsten tanka ruba (ne smije se dodirivati prstima) obješen je na krak torzijskog dinamometra (oznaka 1 na Slici 4). Prije početka mjerenja, težina prstena (izvan tekućine) kompenzirana je stražnjim gumbom dinamometra (2) tako da prednja skala dinamometra (3) pokazuje nulu, a krakovi dinamometra (1) su u vodoravnom položaju. Pogledom u torzijsku nit dinamometra lako se vidi princip rada. Ulijemo vodu u veću posudu, koja se nalazi na električnom kuhalu, tako da metalni prsten bude potpuno umočen, barem 2 cm ispod površine vode (Slika 3a). Dinamometar pokazuje iznos sile uzgona (dakle, na početku mjerenja imamo $F_d < 0$). Mjerenje se provodi tako da se voda odvodi iz veće posude u manju. Protok vode se regulira Hoffmannovom stezaljkom. Iznos sile F_d se smanjuje otjecanjem vode, a krakovi dinamometra se postupno vraćaju u vodoravni



Slika 4: Mjerni postav za metodu otkidanja prstena.

položaj. Kada krakovi konačno dođu u vodoravni položaj, nastavlja se spuštavanje razine tekućine, ali krakove treba održavati u vodoravnom položaju pomoću gumba s kazaljkom (4) sve do kraja mjerenja, tako da tik prije otkidanja prstena dinomometar pokazuje nulu. Nakon otkidanja prstena od površine, očita se sila u mN (milinjutn). Tekućinu treba ispuštati vrlo polako kako bi se promjena u sili nakon otkidanja što preciznije izmjerila. Treba izvrši više mjerenja na sobnoj temperaturi dok se ne usavrši postupak mjerenja. Nakon toga vodu zagrijte na 80–90 °C (kuhalo držati upaljeno do približno 65 °C kako voda ne bi zaključala) te odredite temperaturnu ovisnost površinske napetosti za desetak različitih temperatura u ciklusu hlađenja.

Kapilarna elevacija/depresija

U drugom dijelu vježbe određuje se napetost površine promatranjem podizanja tekućine koja moči kapilaru. Uronimo li čistu cilindričnu kapilarnu cijev **unutarnjeg** polumjera r u tekućinu, razina tekućine u kapilari razlikovat će se od razine izvan kapilare (Slika 5). Obod tekućine u kapilari ima duljinu $l = 2r\pi$, a na njega djeluje sila $F_n = l\gamma = 2r\pi\gamma$. Vertikalna komponenta te sile iznosi $F_n \cos \theta$, gdje je θ okrajnji kut, a ona je u ravnoteži s težinom stupca tekućine u kapilari:

$$F_n \cos \theta = r^2 \pi \rho g h \quad (7)$$

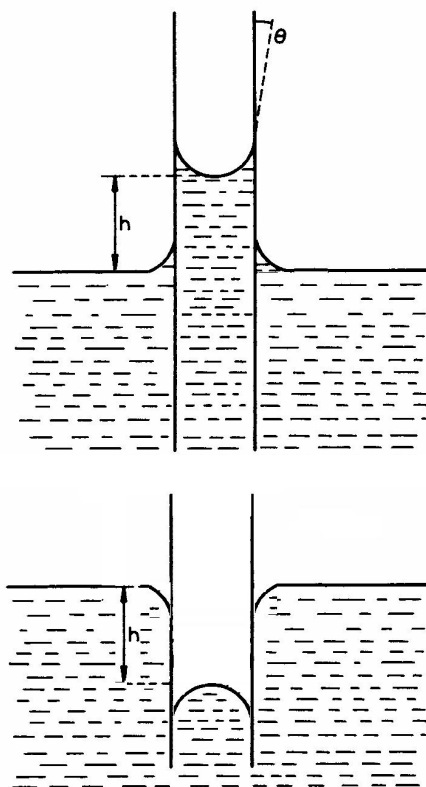
odakle slijedi:

$$\gamma = \frac{r}{2 \cos \theta} \rho g h \quad (8)$$

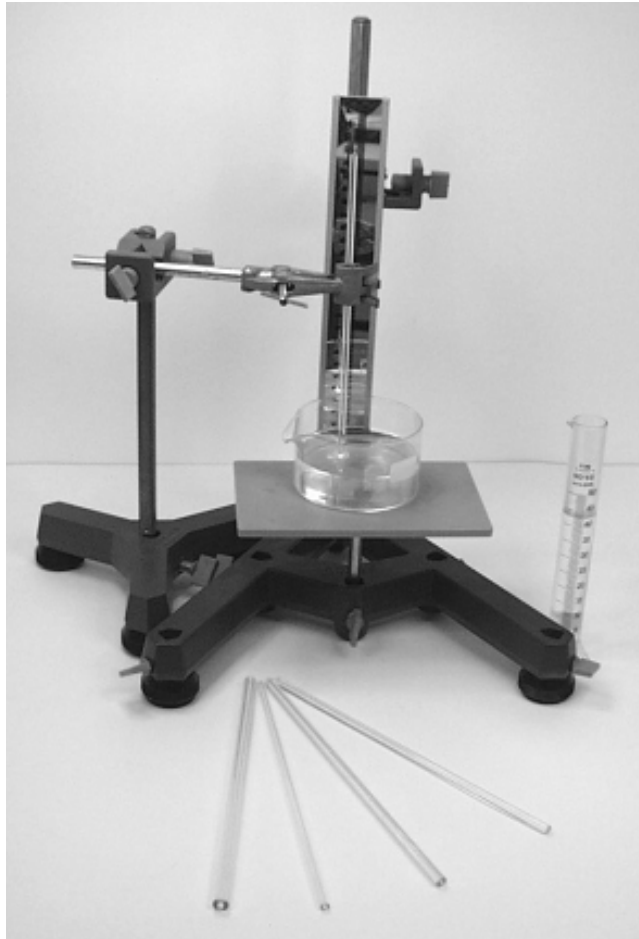
Kapilarna elevacija odgovara slučaju $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ i $h > 0$, a kapilarna depresija slučaju $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ i $h < 0$. Uz pretpostavku da tekućina savršeno moči stijenku kapilare ($\cos \theta = 1$), uzmemo li u obzir i korekciju zbog meniskusa, dobivamo:

$$\gamma = \frac{1}{2} r \rho g h \left(1 + \frac{r}{3h} \right) \quad (9)$$

gdje je sada h najniža točka u meniskusu (Slika 5).



Slika 5: Kapilarna elevacija (gore) i kapilarna depresija (dolje).



Slika 6: Mjerni postav za metodu kapilarne elevacije.

Mjerenje se izvodi tako da se staklena posuda napuni otprilike do polovice tekućinom čiju kapilarnost želimo ispitati. Dobro očišćena kapilarna cijev uroni se u menzuru u kojoj se nalazi ista tekućina. Gornji se kraj kapilare začepi prstom. Kapilara se izvadi iz menzure, uroni u tekućinu u staklenoj posudi i učvrsti za stalak. Prst se otpusti. Ovaj postupak služi da se unutarne stijenke kapilare prvotno navlaže. Visina stupca tekućine h mjeri se pomoću milimetarske skale ugrađene na stalku (paziti na paralaksu), a pogreške mjerenja se procjenjuju. Treba paziti da u kapilari nema mjehurića zraka.

Zadaci

1. Odredite površinsku napetost destilirane vode na sobnoj temperaturi metodom otkidanja. Promjer prstena je $2r = 19,65$ mm (svakako provjerite mjerenjem!).
2. Izmjerite pripadnu temperaturnu ovisnost površinske napetosti. Nacrtajte $T - \gamma$ graf te metodom najmanjih kvadrata odredite temperaturni koeficijent k_γ i temperaturu T_K . Molarni volumen vode iznosi $V_m = 18$ cm³.
3. Izmjerite površinsku napetost destilirane vode na sobnoj temperaturi pomoću kapilarnog efekta. Izračunajte opću srednju vrijednost. Promjeri kapilara jesu $(3,0 \pm 0,1)$ mm; $(2,2 \pm 0,1)$ mm; $(1,5 \pm 0,1)$ mm; $(0,8 \pm 0,1)$ mm. Za svaki slučaj, to provjerite mjerenjem jer se često lome pa mogu biti zamijenjene kapilarama novih dimenzija.