

# 1A. Napetost površine – 05.03.

## 1. Ključni pojmovi

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

## 2. Teorijski uvod

**Površinska napetost:** 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

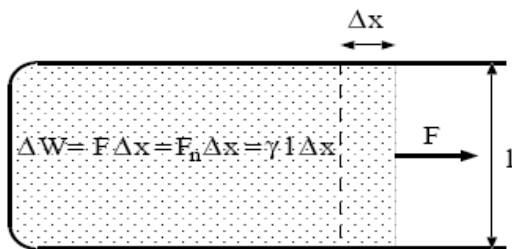
$$\gamma = \frac{dW}{dA} \quad (1)$$

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  $l$ , tangencijalno površini tekućine. Tada tu veličinu nazivamo napetost površine,

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

Dakle, ista veličina  $\gamma$  definirana je na dva različita načina.



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

**Temperaturni koeficijent:** U gotovo svim tekućinama napetost površine linearno se smanjuje s povećanjem temperature,

$$\gamma(T) = \gamma'(T_K - T), \quad (3)$$

gdje parametar  $T_K$  predstavlja ekstrapoliranu temperaturu pri kojoj bi napetost površine promijenila predznak, a  $\gamma'$  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  $2/3$  posljedica je činjenice da se veličina  $\gamma$  odnosi na dvodimenzionalnu površinu, a molarni volumen jest trodimenzionalan pojam. Temperaturna ovisnost molarne napetosti površine dana je relacijom

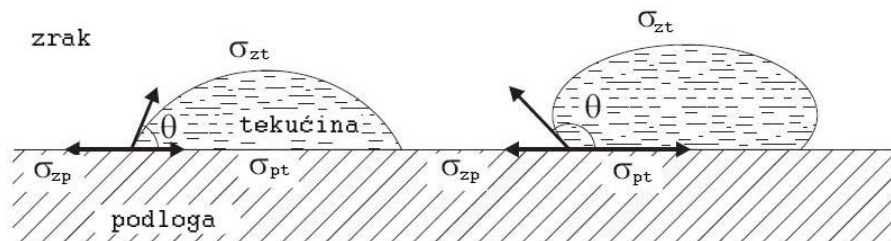
$$\gamma_m(T) = k_\gamma (T_K - T), \quad (5)$$

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

$$k_\gamma = 2.1 \cdot 10^{-7} \text{ J/K}. \quad (6)$$

Ako se eksperimentalno utvrdi da je  $k_\gamma$  veći od te vrijednosti, zaključujemo da se molekule u tekućini disociraju

s porastom temperature, a ako je pak  $k_\gamma$  manji, molekule se asociiraju s porastom temperature.



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

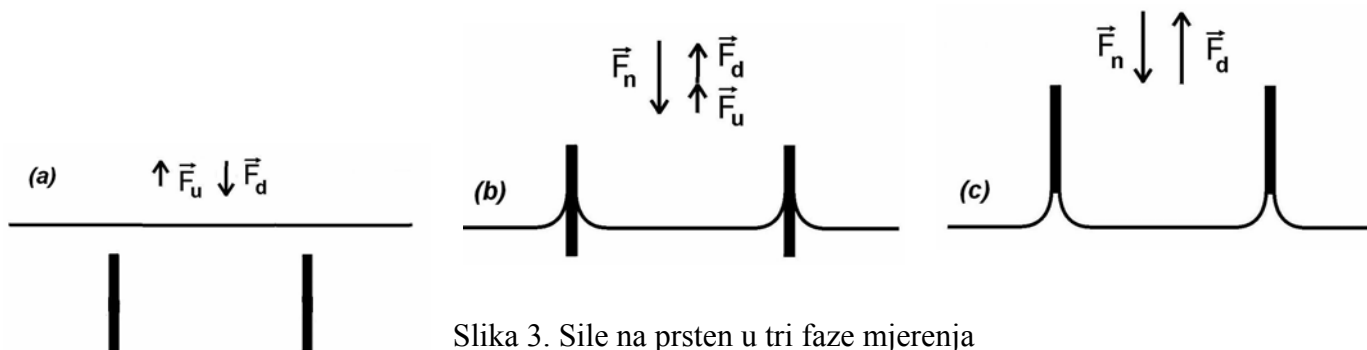
**Okrajnji kut:** Granica čvrstog tijela i tekućine karakterizirana je okrajnjim kutom pod kojim se sastaju površina tekućine i površina čvrstog tijela (vidi slike 2 i 5). Za tekućine koje moče čvrstu podlogu okrajnji kut je  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ , a za tekućine koje ne moče podlogu je  $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ . 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.

### 3. Mjerni uređaj i mjerenje

U ovoj vježbi napetost površine određivat ćemo primjenom dviju metoda: metodom otkidanja prstena (Du Nouy) i metodom kapilarne elevacije.

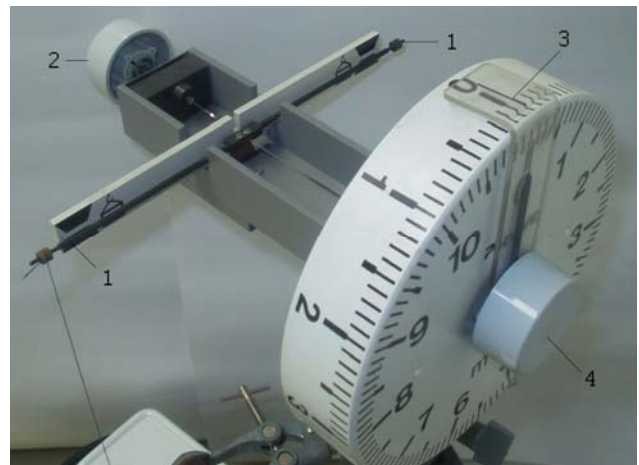
**Metoda otkidanja prstena:** U ovom dijelu vježbe mjeri se sila  $F$  potrebna da se horizontalni prsten polumjera  $r$  otkine od površine tekućine (slika 3). Uroni li se prsten u tekućinu, krak dinamometra podići će se za iznos uzgona (slika 3.a). Ispuštanjem tekućine iz posude, prsten će početi izranjati. 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 3.b), na njega 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 sili napetosti površine (slika 3.c). Povećamo li u tom trenutku silu za infinitezimalni iznos (što je ekvivalentno spuštanju razine tekućine), prsten će se otkinuti, a skala dinamometra pokazat će nam iznos sile  $F$ . 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

$$\gamma = \frac{F_n}{l} = \frac{F_n}{4r\pi} = \frac{F_d}{4r\pi}. \quad (8)$$



Slika 3. Sile na prsten u tri faze mjerenja

**Mjerenje:** Čisti metalni prsten tanka ruba (ne smije se dodirivati prstima) obješen je na krak torzijskog dinamometra ((1) na slici 4.b). 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 3.a). 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. Sila  $F_d$  se smanjuje s otjecanjem vode a krakovi dinamometra se postepeno vraćaju u vodoravni položaj. Kada krakovi konačno dođu u vodoravni položaj nastavlja se spuštanje razine tekućine, ali krakove treba održavati u vodoravnom položaju pomoću gumba s kazaljkom (4) sve do kraja mjerenja. U trenutku otkidanja prstena od površine, očita se sila u mN (milinjutn). Tekućinu treba ispuštati vrlo polako kako bi se sila 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.



Slika 4. Mjerni postav za metodu otkidanja prstena

**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 6). Obod tekućine u kapilari ima duljinu  $l = 2r\pi$ , a na njega djeluje sila  $F = l\gamma = 2r\pi\gamma$ . Vertikalna komponenta te sile iznosi  $F \cos\theta$ , gdje je  $\theta$  okrajnji kut, a ona drži ravnotežu težini stupca tekućine u kapilari

$$F \cos \theta = r^2 \pi \rho g h \quad (9)$$

ili

$$\gamma = \frac{r}{2 \cos \theta} \rho g h. \quad (10)$$

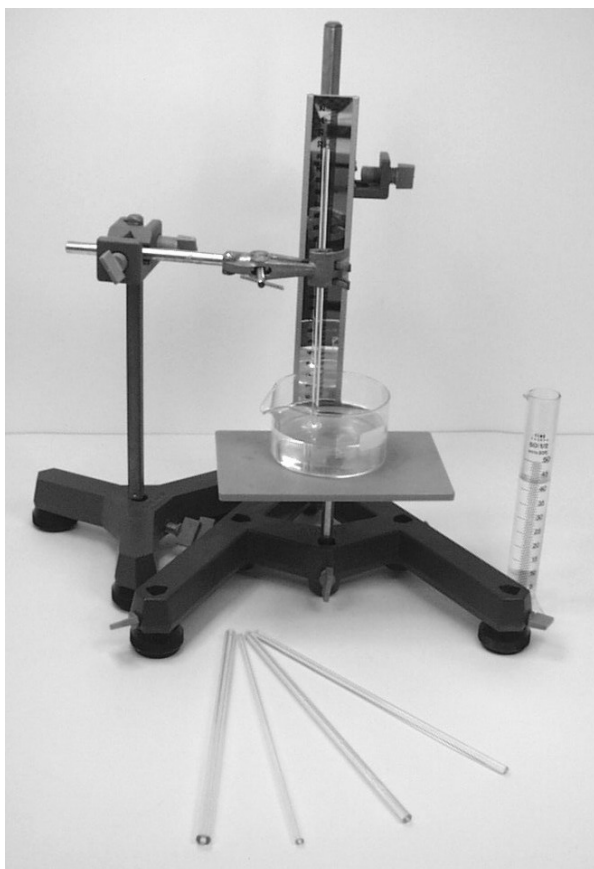
Kapilarna elevacija odgovara slučaju  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  te  $h > 0$ . Kapilarna depresija je također opisana izrazom (10), ali je  $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$  te  $h < 0$ .

Ako tekućina savršeno moči stijenku kapilare, onda je  $\cos \theta = 1$ . Uzmemo li u obzir i korekciju zbog meniskusa, dobivamo

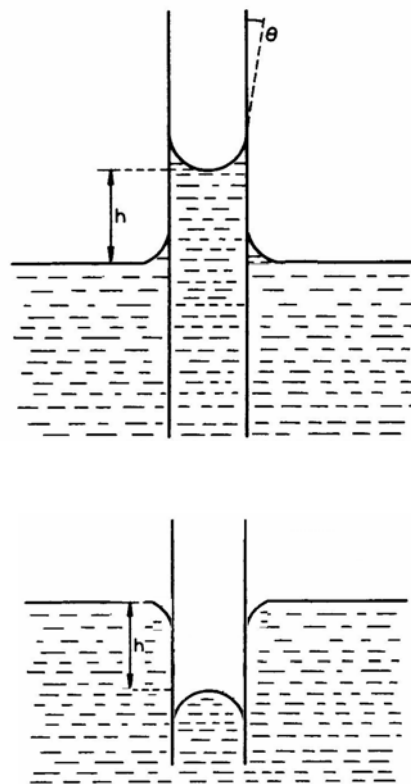
$$\gamma = \frac{1}{2} r \rho g h \left( 1 + \frac{r}{3h} \right), \quad (11)$$

gdje je sada  $h$  najniža točka u meniskusu.

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 unutarnje stijenke kapilare prvotno navlaže. Visina stupca tekućine  $h$  mjeri se pomoću milimetarske skale ugrađene na staklu (paziti na paralaksu), a pogreške mjerenja se procjenjuju. Treba paziti da u kapilari nema mjehurića zraka.



Slika 5. Mjerni postav za metodu kapilarne elevacije



Slika 6. Kapilarna elevacija (gore) i kapilarna depresija (dolje)

#### 4. Zadaci

1. Odredite površinsku napetost destilirane vode na sobnoj temperaturi metodom otkidanja. Promjer prstena je  $2r = 19.65$  mm.
2. Izmjerite pripadnu temperaturnu ovisnost površinske napetosti. Nacrtajte  $\gamma - T$  graf i obradite podatke pomoću MNK.
3. Iz MNK parametara izračunajte temperaturni koeficijent  $k_\gamma$  te temperaturu  $T_K$ . Molarni volumen vode iznosi  $V_m = 18 \text{ cm}^3$ .
4. Izmjerite površinsku napetost destilirane vode na sobnoj temperaturi pomoću kapilarnog efekta. Izračunajte opću srednju vrijednost. Polumjeri kapilara jesu  $(1.78 \pm 0.05)$  mm;  $(1.11 \pm 0.05)$  mm;  $(0.76 \pm 0.03)$  mm;  $(0.46 \pm 0.02)$  mm.