

## Ćwiczenie 4

### WYZNACZANIE NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO CIECZY

#### 4.1. Podstawy teoretyczne

Powierzchnia cieczy, granicząca z innym ośrodkiem, np. z własną parą, znajduje się w warunkach szczególnych w porównaniu z pozostałą masą cieczy. Molekuły warstwy powierzchniowej, w odróżnieniu od molekuł położonych w głębi cieczy, nie są ze wszystkich stron otoczone molekułami tego samego rodzaju i oddziałują z różnymi sąsiadami w różny sposób. Dlatego też siły działające na każdą z molekuł w tej warstwie nie są zrównoważone. Wypadkowa tych sił jest skierowana w głąb cieczy i prostopadła do powierzchni, a efektem jej działania jest ciśnienie molekularne.

Oprócz ciśnienia molekularnego, skierowanego w głąb cieczy, warstewkę powierzchniową cieczy cechują siły molekularne leżące w płaszczyźnie tej warstewki. Siły te skierowane są stycznie do powierzchni, a prostopadle do pomyślanego na powierzchni elementu długości i dążą do zmniejszenia powierzchni swobodnej cieczy. Siłę działającą na jednostkę długości linii rozdziału nazywa się napięciem powierzchniowym cieczy  $\sigma$

$$\sigma = \frac{F}{l}, \quad (4.1)$$

gdzie:  $F$  – całkowita siła napięcia powierzchniowego działająca po jednej stronie linii, [N],

$l$  – długość linii rozdziału, [m].

Z poprzednich rozważań wynika również, że molekuły cieczy przemieszczające się z warstwy powierzchniowej w głąb cieczy wykonują pracę dodatnią (kierunek działania siły jest zgodny z kierunkiem przesunięcia) natomiast przemieszczeniu molekuł z głębi cieczy na jej powierzchnię odpowiada praca ujemna. Oznacza to, że przeniesienie molekuł z głębi na powierzchnię, czyli zwiększenie powierzchni cieczy, wymaga dostarczenia energii z zewnątrz. Jest to równoznaczne ze stwierdzeniem, że molekuły warstwy powierzchniowej posiadają, w porównaniu z molekułami znajdującymi się wewnątrz cieczy, pewną dodatkową energię potencjalną. Istnienie tej energii jest uwarunkowane istnieniem powierzchni cieczy, a jej wartość jest proporcjonalna do pola tej powierzchni. Stąd wynika druga definicja współczynnika napięcia powierzchniowego. Współczynnik napięcia powierzchniowego odpowiada liczbowo wzrostowi energii potencjalnej warstwy powierzchniowej cieczy związanemu z powiększeniem powierzchni swobodnej o jednostkę

$$\sigma = \frac{\Delta E_p}{\Delta S}, \quad (4.2)$$

gdzie:  $\Delta E_p$  – przyrost energii potencjalnej, [J],

$\Delta S$  – przyrost powierzchni swobodnej cieczy, [m<sup>2</sup>].

Z równania (4.2) wynika, że jednostką współczynnika napięcia powierzchniowego jest J/m<sup>2</sup>. Łatwo się przekonać, że jednostka ta jest zgodna z poprzednio ustaloną N/m.

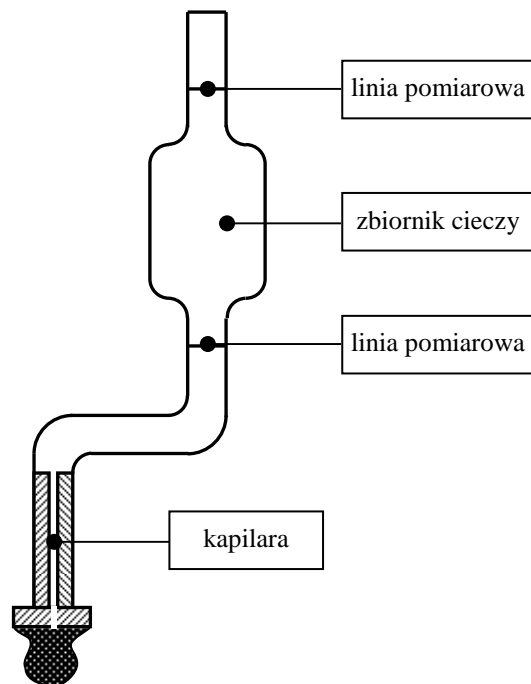
Na tle tego określenia współczynnika napięcia powierzchniowego widać, że występująca w cieczech dążność do zmniejszania powierzchni swobodnej związana jest z przechodzeniem cieczy do takiego stanu, któremu odpowiada mniejsza wartość energii potencjalnej.

Napięcie powierzchniowe zależy od:

- rodzaju cieczy; dla każdej cieczy jest ono inne, gdyż różne cząsteczki oddziałują na siebie różnymi siłami;
- temperatury; przy wzroście ruchów termicznych cząsteczek siły międzycząsteczkowe maleją i w związku z tym napięcie powierzchniowe maleje ze wzrostem temperatury stając się równe zeru w temperaturze krytycznej, w której zanika różnica między cieczą a jej parą nasyconą.

Wyznaczanie napięcia powierzchniowego cieczy przeprowadzać można trzema sposobami:

- przez rozrywanie błonki powierzchniowej wskutek jej rozciągania,
- przez pomiar wzniesienia włoskowatego w rurkach włoskowatych (kapilarach),
- na podstawie wpływu kroplowego (przy pomocy stalagmometru).



Rys. 4.1. Przyrząd do badania napięcia powierzchniowego cieczy metodą wypływu kropłowego (stalagmometr).

Metoda wypływu kropłowego bazuje na fakcie, że ciecz wypływająca pod niewielkim ciśnieniem z pionowej rurki włoskowatej nie tworzy ciągłej strugi, lecz pojedyncze, w przybliżeniu kuliste krople, które narastają do pewnych, zawsze tych samych rozmiarów, po czym odrywają się od wylotu rurki. Istotnymi cechami tego procesu jest to, że wszystkie odrywające się krople mają tę samą wielkość i że w chwili odrywania się kropli obserwuje się przewężenie w podstawie kropli przylegającej bezpośrednio do rurki. Siłą, która odrywa kroplę, jest jej ciężar  $P$ , siłą która utrzymuje kroplę u wylotu rurki, jest siła napięcia powierzchniowego błonki powierzchniowej kropli, która jest „przyklejona” do wylotu rurki. Siła napięcia powierzchniowego skierowana do góry, w początkowej fazie narastania kropli, działa na zewnętrznym obwodzie rurki  $2\pi r$ , natomiast w momencie odrywania kropli, na nieco mniejszym obwodzie przewężenia  $2\pi r_1$ .

Warunek odrywania kropli wyraża równość obu sił

$$P = 2\pi r_1 \sigma. \quad (4.3)$$

jeśli przez  $m$  oznaczymy masę odrywającej się kropli otrzymujemy

$$mg = 2\pi r_1 \sigma, \quad (4.4)$$

gdzie  $r_1$  jest promieniem przewężenia w momencie odrywania się kropli, a  $g$  przyspieszeniem ziemskim.

Aby wyznaczyć napięcie powierzchniowe  $\sigma$  danej cieczy, należałoby zmierzyć bezpośrednio promień  $r_1$  przewężenia. Uczynić tego nie można, więc trzeba ominąć tę trudność. Można wykazać, że dla tej samej rurki promień przewężenia  $r_1$  jest w przybliżeniu taki sam dla różnych cieczy o zbliżonych wartościach napięcia powierzchniowego  $\sigma$ . Biorąc takie dwie ciecze możemy napisać dla każdej z nich warunek odrywania

$$m_1 g = 2\pi r_1 \sigma_1 \quad \text{oraz} \quad m_2 g = 2\pi r_1 \sigma_2. \quad (4.5)$$

Z zależności (4.5) wynika wzór na napięcie powierzchniowe jednej cieczy liczone względem napięcia cieczy drugiej

$$\sigma_x = \sigma_w \frac{m_x}{m_w}, \quad (4.6)$$

gdzie indeks  $w$  odnosi się do cieczy wzorcowej, a  $x$  do cieczy, której napięcia powierzchniowe jest poszukiwane. Cieczą wzorcową może być na przykład czysta woda (destylowana), której napięcie powierzchniowe w temperaturze pokojowej wynosi około  $72 \cdot 10^{-3}$  N/m.

#### 4.2. Przebieg badania

Wykonanie badania laboratoryjnego polega na napełnieniu stalagmometru (rys. 4.1), przez zasysanie od góry za pomocą gruszki, cieczą wzorcową i uniemożliwieniu jej wypływu, poprzez zaciśnięcie wężyka założonego na górną rurkę przyrządu. Następnie zwalnia się zacisk i oblicza ile kropli potrzeba do opróżnienia ściśle określonej objętości  $V$  cieczy zawartej pomiędzy kreskami pomiarowymi w zbiorniczku stalagmometru. Wypływająca ciecz skapuje do naczynka i po opróżnieniu stalagmometru zostaje zważona. Zabieg ten pozwala ustalić gęstość cieczy wzorcowej.

Następnie stalagmometr należy dokładnie opłukać wodą destylowaną i osuszyć po czym napełnić cieczą, której współczynnik napięcia powierzchniowego zamierza się oznaczyć. Ponownie należy policzyć ilość kropeł, która skapnie podczas opróżniania stalagmometru oraz zważyć naczynko laboratoryjne do którego wypłynęła badana ciecz.

Jako cieczy wzorcowej można używać wody destylowanej, której gęstości i współczynniki napięcia powierzchniowego w różnych temperaturach zestawiono odpowiednio w tabeli 4.1. i 4.2.

Tabela 4.1. Gęstość wody w temperaturze od 15 do 30 °C [ $\text{kg/m}^3$ ].

°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
15	999,0986	999,0834	999,0682	999,0528	999,0373	999,0217	999,0060	998,9902	998,9742	998,9581
16	998,9420	998,9257	998,9093	998,8927	998,8761	998,8593	998,8425	998,8255	998,8084	998,7912
17	998,7739	998,7565	998,7389	998,7213	998,7035	998,6856	998,6676	998,6495	998,6313	998,6130
18	998,5946	998,5760	998,5574	998,5386	998,5198	998,5008	998,4827	998,4625	998,4432	998,4238
19	998,4043	998,3847	998,3650	998,3451	998,3252	998,3051	998,2850	998,2647	998,2444	998,2239
20	998,2033	998,1826	998,1619	998,1410	998,1200	998,0989	998,0777	998,0564	998,0350	998,0134
21	997,9918	997,9701	997,9483	997,9264	997,9043	997,8822	997,8600	997,8376	997,8152	997,7927
22	997,7700	997,7473	997,7245	997,7015	997,6785	997,6554	997,6321	997,6088	997,5854	997,5618
23	997,5382	997,5144	997,4906	997,4667	997,4427	997,4185	997,3943	997,3700	997,3456	997,3210
24	997,2964	997,2717	997,2469	997,2220	997,1970	997,1719	997,1467	997,1214	997,0960	997,0706
25	997,0450	997,0193	996,9935	996,9677	996,9417	996,9157	996,8895	996,8633	996,8369	996,8105
26	996,7840	996,7574	996,7307	996,7039	996,6770	996,6500	996,6229	996,5957	996,5685	996,5411
27	996,5137	996,4861	996,4585	996,4308	996,4029	996,3750	996,3470	996,3190	996,2908	996,2625
28	996,2341	996,2057	996,1771	996,1485	996,1198	996,0910	996,0621	996,0331	996,0040	995,9748
29	995,9456	995,9162	995,8868	995,8573	995,8277	995,7980	995,7682	995,7383	995,7083	995,6783
30	995,6482									

Tabela 4.2. Napięcie powierzchniowe wody przy zetknięciu z powietrzem.

Temperatura [°C]	Napięcie powierzchniowe $\sigma_w$ [Nm]
0	$75,60 \cdot 10^{-3}$
5	$74,90 \cdot 10^{-3}$
10	$74,22 \cdot 10^{-3}$
15	$73,49 \cdot 10^{-3}$
18	$73,05 \cdot 10^{-3}$
20	$72,75 \cdot 10^{-3}$
25	$71,97 \cdot 10^{-3}$
30	$71,18 \cdot 10^{-3}$
40	$69,56 \cdot 10^{-3}$
50	$67,91 \cdot 10^{-3}$

### 4.3. Opracowanie wyników i szacowanie błędu pomiaru

Napięcie powierzchniowe badanej cieczy oznacza się z przekształconego wzoru (4.6)

$$\sigma_x = \sigma_w \frac{n_w \rho_x}{n_x \rho_w}, \quad (4.7)$$

gdzie:  $n_w, n_x$  - liczba kropli odpowiednio cieczy wzorcowej i badanej, [-],

$\rho_w, \rho_x$  - gęstość odpowiednio cieczy wzorcowej i badanej, [kg/m<sup>3</sup>].

Gęstość badanej cieczy oblicza się ze wzoru:

$$\rho_x = \frac{\Delta m_x}{V}, \quad (4.8)$$

gdzie:  $\Delta m_x$  - masa badanej cieczy zawartej pomiędzy kreskami pomiarowymi stalagmometru, [kg],

$V$  - objętość zawarta pomiędzy kreskami pomiarowymi stalagmometru, [m<sup>3</sup>].

Natomiast błąd pomiaru można określić z zależności

$$\delta \sigma_x = \sigma_w \left( \frac{\rho_x}{n_x \rho_w} \delta n_w + \frac{n_w \rho_x}{n_x^2 \rho_w} \delta n_x + \frac{n_w}{n_x \rho_w} \delta \rho_x + \frac{n_w \rho_x}{n_x \rho_w^2} \delta \rho_w \right), \quad (4.9)$$

gdzie:  $\delta n_w, \delta n_x$  - błąd przy określaniu liczby kropli cieczy wzorcowej i badanej, [-],

$\delta \rho_w, \delta \rho_x$  - błąd przy oznaczaniu gęstości cieczy wzorcowej i badanej, [kg/m<sup>3</sup>].

Błąd przy oznaczaniu gęstości cieczy określa się ze wzoru

$$\delta \rho = \frac{1}{V} \delta \Delta m + \frac{\Delta m}{V^2} \delta V, \quad \Delta m = m_2 - m_1, \quad (4.10)$$

gdzie:  $m_1, m_2$  - masa naczynka bez cieczy i z cieczą, [kg],

$\delta \Delta m$  - błąd przy określaniu przyrostu masy równy podwojonej dokładności wagi, [kg],

$V$  - błąd przy określaniu objętości cieczy, [m<sup>3</sup>].

### 4.4. Zakres opracowania

Opracowanie powinno zawierać:

- opis eksperymentu wraz z podaniem warunków pomiaru (temperatury i wilgotności powietrza otoczenia) oraz rodzaju badanej cieczy i cieczy wzorcowej oraz ich temperatur,
- omówienie wzoru opisującego współczynnik napięcia powierzchniowego  $\sigma$ ,
- wyniki pomiarów napięcia powierzchniowego przy wykorzystaniu stalagmometru ( $n_x, n_w$ ),
- wyniki pomiarów gęstości cieczy badanej i wzorcowej za pomocą wagi laboratoryjnej ( $m_{1x}, m_{2x}, m_{1w}, m_{2w}$ ) i obliczenia tychże gęstości,
- obliczenia współczynnika napięcia powierzchniowego  $\sigma$  i oszacowanie błędu pomiaru.