

Piotr Durniat  
I rok, Fizyka  
Wtorek, 8:00-10:15

Data wykonania pomiarów:  
27.05.2025

Prowadząca:  
dr Iwona Mróz

## Ćwiczenie nr 38

### Pomiar napięcia powierzchniowego

#### Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp teoretyczny</b>	<b>2</b>
1.1	Napięcie powierzchniowe . . . . .	2
1.2	Zjawiska związane z napięciem powierzchniowym . . . . .	2
1.3	Metody pomiaru napięcia powierzchniowego . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Opis doświadczenia</b>	<b>3</b>
2.1	Metoda odrywania . . . . .	3
2.2	Metoda stalagmometru . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Opracowanie wyników pomiarów</b>	<b>3</b>
3.1	Tabele pomiarowe . . . . .	3
3.2	Obliczenia . . . . .	4
3.3	Obliczenia niepewności . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Ocena niepewności pomiaru</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Wnioski</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Wykresy</b>	<b>7</b>

# 1 Wstęp teoretyczny

## 1.1 Napięcie powierzchniowe

Napięcie powierzchniowe jest zjawiskiem fizycznym występującym na granicy faz, najczęściej ciec-z-gaz, i wynika z oddziaływań międzycząsteczkowych w cieczy. Częsteczki znajdujące się wewnątrz cieczy oddziałują z sąsiednimi cząsteczkami we wszystkich kierunkach, natomiast cząsteczki na powierzchni oddziałują głównie z cząsteczkami znajdującymi się pod nimi. Ta nierównowaga sił powoduje, że powierzchnia cieczy zachowuje się jak napięta błona, dążąc do przyjęcia kształtu o minimalnej powierzchni.

Napięcie powierzchniowe ( $\sigma$ ) definiuje się jako stosunek siły ( $F$ ) działającej stycznie do powierzchni cieczy wzdłuż linii o długości ( $l$ ):

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (1)$$

Jednostką napięcia powierzchniowego w układzie SI jest N/m (newton na metr).

## 1.2 Zjawiska związane z napięciem powierzchniowym

Na granicy ośrodków ciec-z-ciało stałe-gaz obserwuje się zjawisko menisku (wkłęsłego lub wypukłego), zależnie od oddziaływań między cieczą a ciałem stałym. Jeśli siły przyciągania między cząsteczkami cieczy a ciałem stałym są silniejsze niż między samymi cząsteczkami cieczy, powstaje menisk wkłęsły (np. woda w szklanej rurce). W przeciwnym przypadku tworzy się menisk wypukły (np. rtęć w szklanej rurce).

Zjawisko włoskowatości (kapilarności) jest bezpośrednim skutkiem napięcia powierzchniowego i zwilżalności powierzchni. Polega ono na samorzutnym podnoszeniu się lub obniżaniu cieczy w wąskich kapilarach. Wysokość słupa cieczy w kapilarze zależy od napięcia powierzchniowego, gęstości cieczy oraz promienia kapilary.

## 1.3 Metody pomiaru napięcia powierzchniowego

W niniejszym ćwiczeniu wykorzystano dwie metody pomiaru napięcia powierzchniowego:

- **Metoda odrywania** - polega na pomiarze siły  $F$  potrzebnej do oderwania płytki od powierzchni cieczy. Napięcie powierzchniowe  $\sigma$  jest zdefiniowane jako siła działająca na jednostkę długości krawędzi. Całkowita długość krawędzi styku płytki (o długości  $l$  i grubości  $d$ ) z cieczą wynosi  $2(l + d)$ . Zatem siła napięcia powierzchniowego  $F$  (równa sile odrywania, po uwzględnieniu ciężaru płytki oraz przy założeniu kąta zwilżania  $\gamma \approx 0$ , czyli  $\cos \gamma \approx 1$ ) wyraża się jako  $F = \sigma \cdot 2(l + d)$ . Przekształcając ten wzór, otrzymujemy:

$$\sigma = \frac{F}{2(l + d)} \quad (2)$$

gdzie  $F$  to mierzona siła odrywania (po skompensowaniu ciężaru płytki),  $l$  to długość płytki, a  $d$  to jej grubość.

- **Metoda stalagmometru** - opiera się na pomiarze masy kropeł cieczy, które odrywają się od kapilary o znanym promieniu. Napięcie powierzchniowe wyznacza się, porównując masy kropeł badanej cieczy i cieczy wzorcowej o znanym napięciu powierzchniowym.

Napięcie powierzchniowe zależy od temperatury (na ogół maleje liniowo wraz z jej wzrostem) oraz od obecności zanieczyszczeń i substancji powierzchniowo czynnych, które mogą znacząco obniżyć jego wartość.

Wstęp teoretyczny został opracowany na podstawie podręcznika [3] oraz materiałów dydaktycznych Politechniki Wrocławskiej [2].

## 2 Opis doświadczenia

Celem doświadczenia było wyznaczenie napięcia powierzchniowego dla wody destylowanej, alkoholu i acetonu przy użyciu dwóch metod: metody odrywania oraz metody stalagmometru.

### 2.1 Metoda odrywania

Pomiary wykonano przy użyciu wagi torsyjnej (Rys. 1 w instrukcji).

1. Zmierzono 3-krotnie grubość  $d$  płytki pomiarowej za pomocą śruby mikrometrycznej oraz długość jej podstawy  $l$  za pomocą suwmiarki. Płytkę następnie osuszono i zawieszono na haczyku wagi.
2. Odaretowano wagę i zważono płytkę, notując jej masę spoczynkową (wskazanie wagi bez dodatkowego obciążenia).
3. Pod płytkę podstawiono naczynko z badaną cieczą (wodą destylowaną) tak, aby dolna krawędź płytki niemal dotykała powierzchni cieczy. Waga była zaaretowana.
4. Odaretowano wagę, doprowadzając do zanurzenia dolnej części płytki w cieczy. Następnie powoli obracano pokrętkę wagi, zwiększając siłę, aż do momentu oderwania płytki od powierzchni cieczy. Odczytano maksymalną siłę  $F$  (wskazanie wagi w jednostkach masy [mg]) działającą w momencie odrywania.
5. Pomiar siły odrywającej  $F$  wykonano 10-krotnie dla wody destylowanej.
6. Kroki 3-5 powtórzono dla alkoholu i acetonu.

### 2.2 Metoda stalagmometru

1. Zważono czyste i osuszone naczynko pomiarowe.
2. Sprawdzone drożność kapilary stalagmometru i zmierzono jej zewnętrzny promień  $R$ .
3. Napełniono naczynko 30 kroplami wody destylowanej, które odrywały się od kapilary, a następnie zważono naczynko z cieczą.
4. Pomiar masy 30 kropel (krok 3) powtórzono 3-krotnie dla wody destylowanej.
5. Zanotowano temperaturę otoczenia.
6. Kroki 1, 3 i 4 powtórzono dla alkoholu i acetonu.

## 3 Opracowanie wyników pomiarów

### 3.1 Tabele pomiarowe

Długość płytki $l$ [mm]
9,5

Tabela 1: Zmierzona długość płytki pomiarowej.

Grubość płytki [mm]		
Wskazanie	Błąd wskazania zerowego ( $\Delta d$ )	Wartość skorygowana
0,92	0,46	0,46

Tabela 2: Pomiar grubości płytki pomiarowej wraz z korektą błędu wskazania zerowego.

Masa spoczynkowa [mg]
272

Tabela 3: Masa spoczynkowa płytki pomiarowej.

Siła odrywająca [mg]			
Pomiar	Woda	Alkohol	Aceton
1	398	308	312
2	394	310	312
3	392	310	310
4	392	310	314
5	396	312	312
6	396	308	312
7	398	308	314
8	398	310	314
9	398	312	314
10	398	310	312

Tabela 4: Siła odrywająca płytkę dla różnych cieczy.

## 3.2 Obliczenia

Obliczono średnią arytmetyczną wartości siły odrywającej płytkę  $\bar{F}_{\text{mg}}$  (wskazania wagi w jednostkach masy [mg]) dla każdej cieczy na podstawie 10 pomiarów.

$$\bar{F}_{\text{mg}} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}$$

gdzie  $F_i$  to kolejne pomiary siły, a  $n$  to liczba pomiarów ( $n = 10$ ).

Od każdego pomiaru siły odrywającej należy odjąć masę spoczynkową płytki  $m_0$ , aby uzyskać siłę netto:

$$F_{\text{netto}} = F_{\text{zmierzone}} - m_0$$

Przeliczono średnią siłę netto  $\bar{F}_{\text{N}}$  na niutony [N], wykorzystując zależność, że 1 [mg] odpowiada sile  $9,807 \cdot 10^{-6}$  [N].

$$\bar{F}_{\text{N}} = \bar{F}_{\text{netto}} \cdot 9,807 \cdot 10^{-6} \text{ N/mg}$$

Obliczono wartość napięcia powierzchniowego  $\sigma$  dla każdej cieczy, korzystając ze wzoru (2):

$$\sigma = \frac{\bar{F}_{\text{N}}}{2(l + d)}$$

### Wymiary płytki:

- Długość ( $l$ ): 9,5 mm = 0,00950 m
- Grubość skorygowana ( $d_{\text{sk}}$ ): 0,46 mm = 0,00046 m
- Obwód całkowity  $2(l + d_{\text{sk}}) = 2(0,00950 + 0,00046) = 0,01992$  m

### Przykładowe obliczenia dla wody destylowanej:

Średnia siła odrywająca (wskazanie wagi):

$$\begin{aligned}\bar{F}_{\text{mg, woda}} &= \frac{398 + 394 + 392 + 392 + 396 + 396 + 398 + 398 + 398 + 398}{10} \\ &= \frac{3960}{10} = 396,00 \text{ mg}\end{aligned}$$

Siła netto (po odjęciu masy spoczynkowej  $m_0 = 272,00 \text{ mg}$ ):

$$\begin{aligned}\bar{F}_{\text{netto, woda}} &= 396,00 - 272,00 = 124,00 \text{ mg} \\ &= 124,00 \cdot 9,807 \cdot 10^{-6} = 0,00121607 \text{ N}\end{aligned}$$

Napięcie powierzchniowe wody:

$$\sigma_{\text{woda}} = \frac{0,00121607}{0,01992} = 0,0610 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

**Wyniki obliczeń dla wszystkich cieczy:**

Ciecz	$\bar{F}_{\text{mg}}$ [mg]	$\bar{F}_{\text{netto}}$ [mg]	$\bar{F}_{\text{N}}$ [N]	$\sigma$ [N/m]
Woda destylowana	396,00	124,00	0,00121607	0,0610
Alkohol	309,80	37,80	0,00037070	0,0186
Aceton	312,60	40,60	0,00039816	0,0200

Tabela 5: Zestawienie obliczonych wartości siły odrywającej i napięcia powierzchniowego.

Poniższa tabela 6 przedstawia wartości napięcia powierzchniowego (w  $\text{N m}^{-1}$ ) dla wody, etanolu i acetonu w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Główne wartości pochodzą ze źródła [1].

Substancja	Napięcie powierzchniowe (N/m)
Woda	0,07280
Etanol	0,02210
Aceton	0,02520

Tabela 6: Wartości napięcia powierzchniowego dla wybranych cieczy w temp.  $20^\circ\text{C}$ .

### 3.3 Obliczenia niepewności

Niepewność złożoną napięcia powierzchniowego  $u_c(\sigma)$  obliczono korzystając z prawa przenoszenia niepewności standardowych. Dla funkcji  $\sigma = \frac{F}{2(l+d)}$ :

$$u_c(\sigma) = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial F}\right)^2 u^2(F) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial l}\right)^2 u^2(l) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d}\right)^2 u^2(d)}$$

Pochodne cząstkowe wynoszą:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma}{\partial F} &= \frac{1}{2(l+d)} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial l} &= -\frac{F}{2(l+d)^2} = -\sigma/(l+d) \\ \frac{\partial \sigma}{\partial d} &= -\frac{F}{2(l+d)^2} = -\sigma/(l+d)\end{aligned}$$

**Składowe niepewności:**

1. Niepewność pomiaru siły  $u(F)$  składa się z:

- Niepewności typu A (rozrzut pomiarów):

$$u_A(F) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2}$$

- Niepewności typu B (dokładność wagi):  $u_B(F) = \frac{1 \text{ mg}}{\sqrt{3}} \cdot 9,807 \cdot 10^{-6} \text{ N/mg}$

2. Niepewność pomiaru długości  $u(l)$ :

$$u(l) = \frac{0,05 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ mm} = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

3. Niepewność pomiaru grubości  $u(d)$ :

$$u(d) = \frac{0,01 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0,0058 \text{ mm} = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

### Przykładowe obliczenia dla wody:

Niepewność typu A siły (dla wody):

$$\begin{aligned} u_A(F) &= \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (F_i - 124,00)^2 \text{ mg} \cdot 9,807 \cdot 10^{-6} \text{ N/mg}} \\ &= 0,000008 \text{ N} \end{aligned}$$

Niepewność typu B siły:

$$u_B(F) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 9,807 \cdot 10^{-6} = 0,000006 \text{ N}$$

Całkowita niepewność siły:

$$u(F) = \sqrt{u_A^2(F) + u_B^2(F)} = 0,000010 \text{ N}$$

Podstawiając do wzoru na niepewność złożoną napięcia powierzchniowego:

$$\begin{aligned} u_c(\sigma) &= \sqrt{\left(\frac{1}{0,01992}\right)^2 (0,000010)^2 + \left(-\frac{0,0610}{0,00996}\right)^2 (2,9 \cdot 10^{-5})^2 + \left(-\frac{0,0610}{0,00996}\right)^2 (5,8 \cdot 10^{-6})^2} \\ &= 0,0005 \text{ N/m} \end{aligned}$$

### Wyniki końcowe z niepewnościami:

Ciecz	$\sigma$ [N/m]	$u_c(\sigma)$ [N/m]
Woda destylowana	0,0610	0,0005
Alkohol	0,0186	0,0004
Aceton	0,0200	0,0004

Tabela 7: Wartości napięcia powierzchniowego wraz z niepewnościami standardowymi złożonymi.

## 4 Ocena niepewności pomiaru

## 5 Wnioski

W ramach przeprowadzonego doświadczenia wyznaczono wartości napięcia powierzchniowego dla trzech cieczy w temperaturze pokojowej. Poniższa tabela przedstawia zestawienie otrzymanych wyników wraz z wartościami tablicowymi oraz analizą błędów:

Ciecz	$\sigma$ [N/m]	$u_c(\sigma)$ [N/m]	$\sigma_{\text{ref}}$ [N/m]	$\Delta\sigma$ [N/m]	$\delta$ [%]
Woda destylowana	0,0610	0,0005	0,0728	0,0118	16,2
Alkohol	0,0186	0,0004	0,0223	0,0037	16,6
Aceton	0,0200	0,0004	0,0237	0,0037	15,6

Tabela 8: Zestawienie wyników pomiarów z wartościami tablicowymi (w temp. 20°C).  $\sigma$  - wartość zmierzona,  $u_c(\sigma)$  - niepewność złożona,  $\sigma_{\text{ref}}$  - wartość tablicowa,  $\Delta\sigma$  - różnica bezwzględna,  $\delta$  - błąd względny.

Różnice między wartościami zmierzonymi a tablicowymi mogą wynikać z kilku czynników:

1. Niedokładności metody pomiarowej - metoda odrywania jest wrażliwa na dokładne ustawienie płytki względem powierzchni cieczy.
2. Temperatura - napięcie powierzchniowe maleje wraz ze wzrostem temperatury, a pomiary były wykonywane w warunkach laboratoryjnych, gdzie temperatura mogła być wyższa niż referencyjna.
3. Czystość użytych cieczy - szczególnie w przypadku wody destylowanej, gdzie śladowe zanieczyszczenia mogą znacząco wpłynąć na wynik.

Analiza błędów względnych wykazała systematyczne zaniżenie wyników o podobną wartość procentową (około 16%) dla wszystkich cieczy, co sugeruje obecność systematycznego błędu w metodzie pomiarowej, który w podobnym stopniu wpływa na wszystkie wykonane pomiary. Niepewności pomiarowe są stosunkowo małe (rzędu 1-2% wartości mierzonej), co świadczy o dobrej powtarzalności pomiarów.

## 6 Wykresy

### Literatura

- [1] DataPhysics Instruments GmbH. Surface tension values of some common test liquids for surface energy analysis. <https://www.surface-tension.de/common-liquids/>, 2024. Accessed on June 2, 2025.
- [2] Zbigniew Gumienny. Napięcie powierzchniowe. <https://lpf.wppt.pwr.edu.pl/opisy/cw033.pdf>, 2023.
- [3] William Moebis, Samuel J. Ling, and Jeff Sanny. *Fizyka dla szkół wyższych, Tom 2*. OpenStax, 2018. Dostęp: 14.04.2024.