

ĆWICZENIE NR 1  
**POMIARY LEPKOŚCI PŁYNÓW REOLOGICZNYCH**

**Cel ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest pomiar lepkości cieczy oraz wyznaczenie lepkości przy użyciu lepkościomierzy Englera i Höpplera.

**Zakres wymaganych wiadomości**

1. Definicja lepkości. Zależność lepkości od temperatury.
2. Metody pomiaru lepkości płynów reologicznych.
  - 2.1. Lepkościomierze kapilarne.
  - 2.2. Lepkościomierze kulkowe.
3. Metody ważenia hydrostatycznego (waga Westphala-Mohra).
4. Przebieg ćwiczenia.
5. Opracowanie wyników.

**1. Definicja lepkości.**

Zagadnienia pomiarów lepkości i parametrów reologicznych płynów należą do najtrudniejszych zagadnień metrologicznych. Trudności te są związane z własnościami samego przedmiotu badań. Większość badań dotyczy własności reologicznych (właściwości określających zdolność płynu do „płynięcia” w określonych warunkach hydromechanicznych). Badania te mają na celu określenie zdolności diagnostycznej parametrów reologicznych.

Lepkość jest właściwością materii we wszystkich stanach skupienia, związaną z oddziaływaniami międzycząsteczkowymi. Lepkością albo tarcie wewnętrzne nazywa się opór, jaki występuje podczas ruchu jednych części (warstw) ośrodka względem innych. W przypadku laminarnego przepływu cieczy w rurce o promieniu  $R$  wszystkie jej warstwy poruszają się w kierunkach równoległych, przy czym każda warstwa oddalona o  $r$  od osi rurki ma inną prędkość  $u(r)$ . Największą prędkość ma warstwa cieczy poruszająca się wzdłuż osi rurki ( $r=0$ ), a w miarę zbliżania się do ścian rurki prędkość ruchu warstw cieczy maleje, aby na jej brzegu osiągnąć wartość  $u(r=R) = 0$ .

Istnieją dwie miary lepkości:

- a) **Lepkość dynamiczna** wyrażająca stosunek naprężeń ścinających do szybkości ścinania:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma}$$

Jednostką lepkości dynamicznej w układzie SI jest  $\left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$ .

- b) **Lepkość kinematyczna** wyrażająca stosunek lepkości dynamicznej do gęstości płynu:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Jednostką lepkości kinematycznej w układzie SI jest  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$ .

Zjawisko lepkości wykazują wszystkie ciecze i gazy. Jedynym szczególnym wyjątkiem jest ciekły hel, który w temperaturach bliskich zera bezwzględnie wykazuje zjawisko nadciekłości, czyli zupełne zniknięcie lepkości.

**1.1. Przepływ laminarny.**

**Przepływ laminarny** jest to przepływ uwarstwiony (cieczy lub gazu), w którym kolejne warstwy płynu nie ulegają mieszanii (w odróżnieniu od przepływu turbulentnego, burzliwego). W ruchu laminarnym elementy płynu poruszają się po torach prostych lub łagodnie zakrzywionych, w zależności od kształtu ścian sztywnych, co sprawia wrażenie, jakby płyn poruszał się warstwami, między którymi nie odbywa się wymiana płynu.

Podczas przepływu laminarnego, charakteryzującego się przewagą sił lepkości nad siłami bezwładności, wszelkie powstające przypadkowo zaburzenia są tłumione, zatem przepływ ten jest stabilny.

Jednym z najprostszych przypadków ruchu laminarnego płynu lepkiego nieściśliwego jest ustalony ruch w rurze o stałym przekroju, podczas którego linie prądu są prostymi równoległymi do osi rury. Ruch taki może zachodzić, jeśli tylko liczba Reynoldsa nie przekracza krytycznej wartości:

$$\text{Re}_{kr} = \frac{V \cdot d_z}{\nu} \leq 2300$$

gdzie:

$V$  - średnia prędkość płynu w przewodzie [m/s],

$d_z$  - średnica lub średnica zastępcza [m], obliczana z zależności:

$$d_z = 4 \cdot \frac{A}{U}$$

$A$  - przekrój przepływowy [m<sup>2</sup>],

$U$  - obwód zwilżony przez ciecz [m],

$\nu$  - kinematyczny współczynnik lepkości [m<sup>2</sup>/s].

## 1.2. Zależność lepkości od temperatury.

Pomiar lepkości cieczy ma sens tylko wtedy, gdy bardzo dokładnie jest stabilizowana temperatura płynu w kapilarze pomiarowej. Dlatego zależności lepkości od temperatury przedstawiają się następująco:

**a) ciecze** – siły oddziaływań międzycząsteczkowych wraz ze wzrostem temperatury maleją, czyli wzrost temperatury powoduje obniżenie lepkości cieczy,

**b) gazy** – wykazują wzrost lepkości w miarę przyrostu temperatury. W stanie gazowym siły międzycząsteczkowe są bardzo słabe i ich wpływ na tarcie wewnętrzne jest mały. Wzrost temperatury zwiększa średnią prędkość cząsteczek gazu, a to z kolei zmniejsza średnią drogę swobodną i zwiększa częstotliwość zderzeń cząsteczek, co prowadzi do wzrostu lepkości.

## 2. Metody pomiaru lepkości płynów reologicznych.

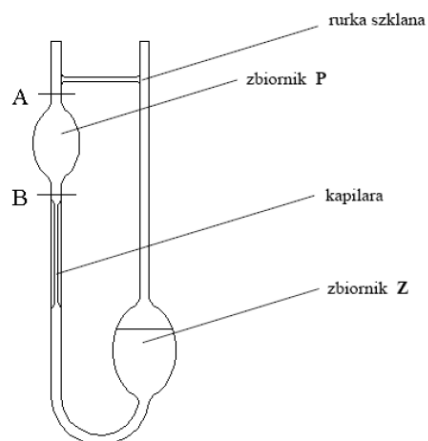
Znane są liczne metody wyznaczania lepkości cieczy. Do najczęściej stosowanych należą metody oparte na pomiarze szybkości przepływu cieczy przez rurkę kapilarną (lepkościomierze kapilarne) oraz metody oparte na pomiarze szybkości opadania kulki w badanej cieczy (lepkościomierze kulkowe).

### 2.1. Lepkościomierze kapilarne.

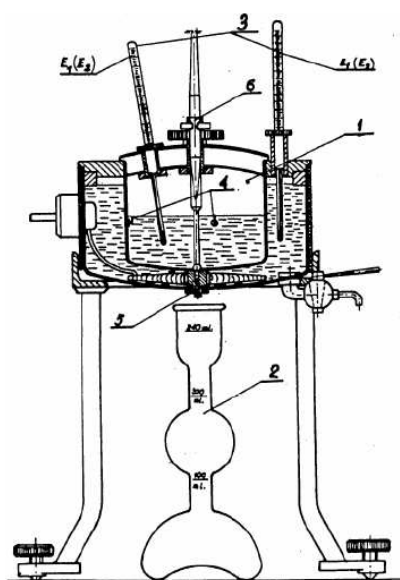
Działanie lepkościomierzy kapilarnych opiera się na równaniu Poiseuille'a, zgodnie z którym objętość cieczy  $V$  przepływająca w czasie  $t$  przez kapilarę o promieniu  $R$  i długości  $l$  pod wpływem różnicy ciśnień  $\Delta p$  wynosi:

$$V = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p \cdot t}{8 \cdot \eta \cdot l}$$

Przykładowymi lepkościomierzami kapilarnymi są lepkościomierz Ostwalda (Rys.1) oraz lepkościomierz Englera (Rys.2).



**Rys.1. Lepkościomierz Ostwalda**



**Rys.2. Lepkościomierz Englera**

**Lepkościomierz Englera:** 1 - właściwe naczynie pomiarowe, 2 – zlewka miernicza, 3 – termometr do pomiaru temperatury badanej cieczy, 4 – badana ciecz, 5 – kapilara pomiarowa, 6 – zawór kulkowy (zatyczka).

## 2.2. Lepkościomierze kulkowe.

Działanie lepkościomierzy kulkowych opiera się na prawie Stokesa, zgodnie z którym miarą lepkości jest czas opadania kulki o określonej średnicy w rurce wypełnionej badaną cieczą. Zgodnie z prawem Stokesa prędkość opadania ciała stałego w płynie reologicznym zależy od jego lepkości i określona jest wzorem:

$$\eta = k \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \tau \quad (2)$$

gdzie:

$\eta$  - dynamiczny współczynnik lepkości [ $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = \text{Pa}\cdot\text{s}$ ],

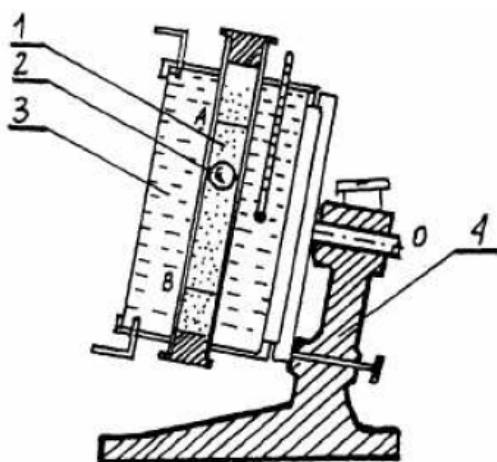
$k$  - stała kulki, której wartość zależy od jej średnicy [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ; Tab. 1],

$\tau$  - czas opadania kulki [s],

$\rho_1$  - gęstość materiału kulki [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

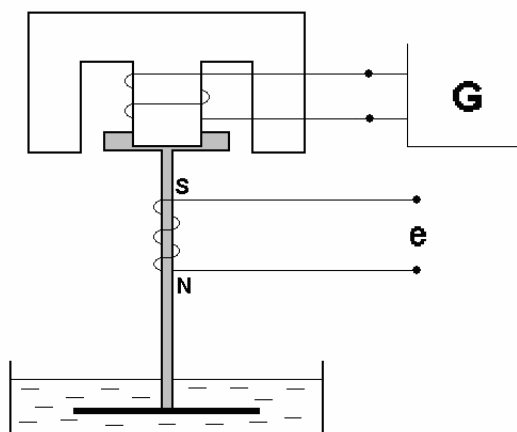
$\rho_2$  - gęstość badanej cieczy [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Przykładowymi lepkościerzami kulkowymi są lepkościerz Höpplera (Rys.3) oraz lepkościerz rotacyjny (Rys.4).



*Rys.3. Lepkościerz Höpplera*

**Lepkościerz Höpplera:** 1 – rurka szklana, 2 – kulka, 3 – płaszcz grzejny wodny, 4 – podstawa.



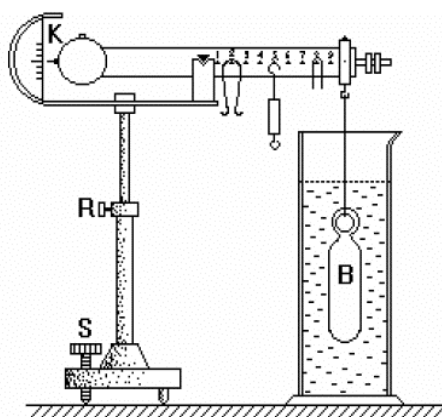
*Rys.4. Lepkościerz rotacyjny*

Zasada działania lepkościerz rotacyjnych polega na pomiarze wartości wydrukowanego napięcia ( $e$ ) w cewce pomiarowej, którego amplituda zależy od amplitudy i częstotliwości sygnału z generatora oraz od lepkości badanej cieczy, która stanowi opór dla ruchomego rdzenia.

### 3. Metoda ważenia hydrostatycznego.

Podstawą hydrostatycznych metod pomiaru gęstości jest pomiar siły wyporu działającej na pływak o stałej objętości całkowicie zanurzony w badanym płynie reologicznym.

Waga Mohra (Rys.5) to rodzaj wagi belkowej pozwalającej na pomiar gęstości cieczy. Szklany pływak o objętości  $10 \text{ cm}^3$  zawieszony jest na cienkim druciku na jednym końcu dźwigni dwuramiennej podpartej na łożysku. Ramię to podzielone jest na 10 równych działek. Na drugim końcu dźwigni umieszczony jest stały obciążnik. W skład wagi wchodzi komplet odważników konikowatych. Masa największego odważnika jest tak dobrana, aby umieszczona w prawym skrajnym położeniu równoważyła siłę wyporu, której doznaje pływak. Masy pozostałych odważników są w stosunku: 1:1:0,1:0,01:0,001.



**Rys.5. Waga Westphala-Mohra**

Przed rozpoczęciem pomiarów wagę należy zmontować w następującej kolejności:

1. Włożyć pręt regulacyjny dźwigni do otworu w kolumnie podstawy, zachowując równoległe ustawienie ramiączka pręta regulacyjnego do podstawy. Następnie unieruchomić pręt regulacyjny za pomocą śruby dociskowej.
2. Nałożyć belkę wagi, wkładając nóż oporowy do główki i zawiesić na haczyku strzemiączka wypornik.
3. Wypoziomować belkę wagi, pokręcając śrubę poziomującą tak, aby wskazówka umieszczona na końcu belki pokryła się z kreską środkową skali.
4. Wlać ciecz wzorcową do zlewki i zanurzyć pływak w całości w cieczy i zrównoważyć wagę z zanurzonym nurkiem za pomocą koników.
5. Zapisać położenie koników uwzględniając ich masy, następnie wyjąć pływak z cieczy i osuszyć go.

#### 4. Przebieg ćwiczenia.

- A. W lepkościomierzu Höpplera miarą lepkości jest prędkość opadania kulki (o znanych wymiarach i gęstości) w badanym ośrodku pod wpływem stałej siły zewnętrznej (zwykle siły ciężkości). W celu wykonania pomiarów należy:
  1. Zmierzyć średnice trzech dowolnie wybranych kulek za pomocą mikrometru.
  2. Do rurki szklanej, odchylonej od pionu o 15°, umieszczonej w łaźni, należy nalać płynu reologicznego (nr 1), następnie łaźnię napełnić wodą podgrzaną do temperatury 20°C.
  3. Zmierzyć czas opadania każdej z wybranych kulek, pomiary powtórzyć 5 razy. Wyniki zanotować.
  4. Analogicznie pomiary należy przeprowadzić dla płynu reologicznego nr 2.
- B. W lepkościomierzu Englera lepkość wyznacza się na podstawie czasu przepływu 200 cm<sup>3</sup> badanej cieczy przez odpowiednio skalibrowane rurki kapilarne pod działaniem znanej różnicy ciśnień. Lepkość względną w stopniach Englera wyraża wzór:

$$^{\circ} E = \frac{\tau}{k_E} \quad (3)$$

gdzie:

$k_E$  - stała przyrządu [s],

$\tau$  - czas wypływu badanej cieczy [s].

Stałą przyrządu  $k_E$  stanowi czas przepływu wody destylowanej o temperaturze 20°C.

W celu wykonania pomiarów należy:

1. Wyznaczyć wartość stałej  $k_E$  (przeprowadzić minimum 3 pomiary).
2. Po osuszeniu zbiornika należy napełnić go ponownie, tym razem badanym płynem reologicznym (nr 1).
3. Napełnić łaźnię wodą podgrzaną do temperatury 30°C.
4. Rozpocząć pomiar czasu przepływu płynu reologicznego z chwilą wyrównania się temperatur wody i badanej cieczy. Pomiar powtórzyć 3 razy.
5. Analogicznie pomiary przeprowadzić dla płynu reologicznego nr 2.
6. Dokonać pomiarów czasu przepływu płynów reologicznych nr 1 i 2 w temperaturze 40°C.

## 5. Opracowanie wyników

- Ze wzoru (2) wyznaczyć współczynnik lepkości dla każdej z kulek dla płynów nr 1 i 2 i dokonać porównania.
- Ze wzoru (3) wyznaczyć lepkość względną dla płynów nr 1 i 2 i dokonać porównania.
- Dokonać hydrostatycznego pomiaru gęstości pozornej i rzeczywistej płynów nr 1 i 2 przy pomocy wagi Westphala-Mohra. W tym celu należy kolejno napisać równania równowagi dźwigni dla pływaka w powietrzu, a następnie zanurzonego w wodzie oraz w badanych płynach.

Równania mają postać:

1. Dla pływaka w powietrzu:  $G = m \cdot g - V \cdot \rho_p \cdot g$
2. Dla pływaka zanurzonego w wodzie:  $G = m \cdot g + V \cdot \rho_{w20} + k \cdot g$
3. Dla pływaka zanurzonego w badanej cieczy:  $G = m \cdot g - V \cdot \rho_c \cdot g + n + k \cdot g$

W wyniku rozwiązania układu otrzymujemy:  $\rho_c = (\rho_{w20} - \rho_p) \cdot n + \rho_p$

gdzie:

$G$  - ciężar obciążnika,  $m$  - masa pływaka,  $\rho_p$  - gęstość powietrza,  $V$  - objętość pływaka,  
 $g$  - przyspieszenie siły ciężkości,  $k$  - masa konika,  $\rho_{w20}$  - gęstość wody w temperaturze 20°C,  
 $n$  - obliczona gęstość pozorna.

## Literatura

1. Zięba A., *Pracownia Fizyczna Wydziału Fizyki Techniki Jądrowej*, AGH, Kraków 2002.
2. Szydłowski H., *Pracownia fizyczna*, PWN, Warszawa 1999.
3. Danek A., *Chemia fizyczna*, PZWL, Warszawa 1982.
4. Respondowski R., *Laboratorium z fizyki*, Polit. Śląska, Gliwice 1994.
5. Karniewicz J., Sokołowski T., *Podstawy fizyki laboratoryjnej*, Polit. Łódzka, Łódź 1996.
6. Barrow G. M., *Chemia fizyczna*, PWN, Warszawa 1978.
7. Pigon K., Ruziewicz Z., *Chemia fizyczna*, PWN, Warszawa 1993.

Tabela 1. Właściwości kulek

L.p.	Średnica [mm] w 20°C	Waga [g]	Ciężar właściwy w 20°C	Stała kulki $k$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
1	15,804	4,9664	2,403	0,009382
2	15,632	4,7999	2,400	0,07475
3	15,575	16,11101	8,15	0,01118
4	15,000	14,3269	8,11	1,209
5	13,540	9,9926	7,68	11,1
6	10,000	4,1486	7,92	40,5