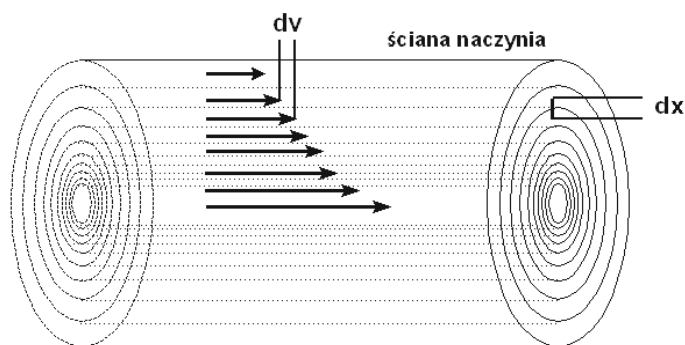


Ćwiczenie 15. **Lepkość cieczy**

Jedną z charakterystycznych cech cieczy jest ich lepkość. **Lepkość cieczy** jest wynikiem sił tarcia wewnętrznego pomiędzy cząsteczkami cieczy. Siły takie powstają przy ruchu jednej warstwy cieczy wzdłuż drugiej (przy założeniu, że ciecz złożona jest z wielu warstw o bardzo małej grubości). Jest to wynikiem jakby zazębienia za pomocą cząsteczek, które przechodzą z jednej warstwy do drugiej.

Wskutek tarcia występującego między cząsteczkami cieczy, poruszająca się cząsteczka pociąga za sobą sąsiadujące cząsteczki tym silniej, im większa jest lepkość. Te cząsteczki pociągają następne itd. Każda następna warstwa porusza się jednak nieco wolniej. Prędkość spada do zera dla cząstek przy ściankach, które są jakby "przyklejone", a więc nieruchome. Tak więc maksymalną prędkość mają cząsteczki w środku naczynia, jak pokazuje to rysunek 1:



$$\text{Shear rate} = dv/dx (\text{s}^{-1})$$

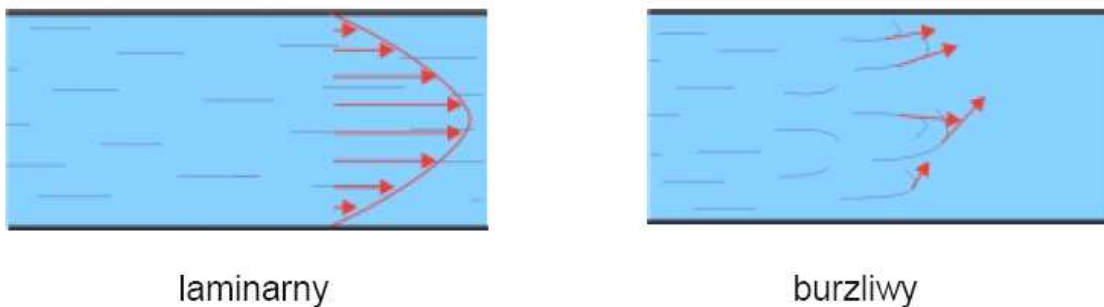
$$\text{Shear stress} = \text{shear rate} \times \text{lepkość} (\text{N/m}^2)$$

dv - różnica prędkości

dx - różnica wielkości promieni

Taka sytuacja ma miejsce przy małych prędkościach cieczy. Mówimy, że przepływ jest *laminarny*, czyli warstwowy. Kolejne warstwy cieczy płyną nie zakłócając się wzajemnie. Różnice w prędkościach warstw są charakteryzowane w modelu laminarnym przez **szybkość ścinania** (*shear rate*, $S = dv/dx$), która określa z jaką szybkością porusza się jedna warstwa cieczy względem drugiej. Matematycznie wyznaczamy ją dzieląc różnicę prędkości dwóch warstw przez odległość tych warstw. Musimy jednak pamiętać, że im większa będzie różnica w prędkości przemieszczania się jednej warstwy cieczy względem drugiej, tym większe będą pojawiały się siły oporu. Siła na jednostkę powierzchni potrzebna do wprowadzenia w ruch jednej warstwy cieczy względem drugiej określana jest mianem **naprężenia ścinającego** (*shear stress*, F). Zatem "naprężenie ścinające" możemy opisać jako siłę działającą stycznie do granicy dwóch warstw, przypadającą na jednostkę powierzchni tych warstw. Wspomniane warstwy są pojęciem hipotetycznym, w rzeczywistości zmiana prędkości zachodzi w sposób ciągły, a naprężenia można określić w każdym punkcie płynu.

Przy dużych prędkościach w cieczy pojawiają się zawirowania i ruch z laminarnego zmienia się w *turbulentny* (rozkład prędkości jest wtedy inny; rys. 2). Tworzące się wiry powodują mieszanie się poszczególnych warstw płynu. W przepływie turbulentnym energia i prędkości cząsteczek płynu są tak duże, że wewnętrzne tarcie (czyli lepkość) nie są w stanie wyłumić powstających wirów i zaburzeń przepływów. Charakter przepływu jest określany przez bezwymiarową liczbę Reynoldsa. Dla każdego rodzaju przepływu istnieje krytyczna liczba Reynoldsa (Re_{cr}), poniżej której przepływ turbulentny nie jest obserwowany. Należy zaznaczyć, że nie istnieje uniwersalna wartość krytycznej liczby Reynoldsa i jest ona odmienna w zależności od rodzaju realizowanego przepływu. Musi być zatem wyznaczana na drodze eksperymentalnej. Przykładowo, z pomiarów eksperymentalnych dla rur okrągłych wynika, że dla wartości poniżej $Re < 2100$ obserwuje się na przepływ laminarny. Przy zachowaniu specjalnych warunków przepływu, dla płynu o wysokiej lepkości udaje się zachować ruch laminarny nawet przy wartości 50000, podczas gdy dla wody przy $Re > 3000$ obserwuje się przepływ turbulentny.



Rys.2. Laminarny (przepływ warstwowy) i turbulentny (przepływ burzliwy) ruch cząsteczek płynu

Dla uproszczenia w opisie lepkości płynów rzeczywistych będziemy rozpatrywać laminarny (warstwowy) ruch płynów. Jeżeli jedną warstwę cieczy o powierzchni S chcemy przesunąć względem drugiej z szybkością względną równą dv , a odległość między nimi wynosi dx , to siła (F) potrzebna do tego będzie wynosić:

$$F = \eta S (dv/dx) \quad (1)$$

gdzie η jest współczynnikiem lepkości dynamicznej (lepkość dynamiczna).

Równanie (1) nazywane jest *równaniem Newtona* - opisuje zachowanie się większości gazów i cieczy (w których rozproszenie energii następuje w wyniku zderzeń stosunkowo małych cząstek). Takie ciecze nazywane są idealnie lepкими lub *niutonowskimi*. Lepkość ich jest stała w danej temperaturze i przy danym ciśnieniu. Krzywa płynięcia (graficzna zależność naprężenia ścinającego od prędkości ścinania) płynu niutonowskiego jest linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Nachylenie tej linii, czyli tangens kąta jaki tworzy ona z osią odciętych, równe jest współczynnikowi lepkości dynamicznej płynu.

Istnieją jednak ciecze (roztwory polimerów, białek, układy koloidalne, maści itp.), które nie spełniają równania Newtona i nie zachowują liniowej zależności w przypadku krzywej płynięcia. Z tego powodu nazwano je cieczami *nieniuetonowskimi*. Ich lepkość zależy nie tylko od temperatury i ciśnienia, ale także od występujących w nich naprężeń lub gradientów prędkości przepływów. W tym przypadku wartość η występująca w równaniu (1) nie jest stała – zależy od naprężenia ścinającego. W przypadku kiedy naprężenie styczne wzrasta mniej niż proporcjonalnie do wzrostu szybkości ścinania, jest to płyn nienewtonowski rozrzedzany ścinaniem (przykład: keczup, który staje się bardziej płynny po wstrząśnięciu). Natomiast kiedy naprężenie styczne wzrasta bardziej niż proporcjonalnie do wzrostu szybkości ścinania, jest to płyn nienewtonowski zagęszczany ścinaniem (przykład: mieszanina wody i mąki ziemniaczanej, która na skutek nagłego uderzenia staje się twarda niczym ciało stałe, podczas gdy wolno wprowadzany przedmiot bez trudu się zanurza – wykazuje właściwości płynne).

Dyscyplina zajmująca się badaniem zależności lepkości od naprężenia ścinającego nazywana jest *reologią*, a krzywe płynięcia nazywane są potocznie reogramami. Wyniki i metody badań reologicznych mają duże zastosowanie w naukach inżynierskich i biomedycznych (np.: w technologii postaci leku, farmakokinetyce, zjawiskach przepływu krwi – hemoreologia), gdzie wiele polimerów, maści, kremów czy asfaltów wykazuje złożone właściwości, a ich lepkość i lepkosprężystość może zależeć od zadanych warunków takich jak naprężenie, skala czasowa czy temperatura.

Istnieją dwie miary lepkości:

- a) *lepkość dynamiczna* wyrażająca stosunek naprężeń ścinających (F) do szybkości ścinania (S):

$$\eta = F/S \quad (2)$$

Jednostką lepkości dynamicznej w układzie SI jest: kilogram $\cdot$ metr⁻¹ $\cdot$ sekunda⁻¹ ($\text{kg} \times \text{m}^{-1} \times \text{s}^{-1}$) lub paskalosekunda ($\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$). Tradycyjną jednostką w układzie CGS (centymetr-gram sekunda) jest puaz (P): $1\text{P} = 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}$

W praktyce wartości lepkości, przeważnie wyrażane są w centypuazach ($\text{cP} = 0,01 \text{P}$).

- a) *lepkość kinematyczna* (nazywana też kinetyczną) jest stosunkiem lepkości dynamicznej (η) do gęstości płynu (d):

$$\nu = \eta/d \quad (3)$$

Jednostką lepkości kinematycznej (nazywanej czasami *lepkością właściwą*) w układzie SI jest metr² $\cdot$ sekunda⁻¹, a w układzie CGS: stokes (lub centystokes (cSt)):

$$1 \text{ St} = \text{m}^2/\text{s}$$

Lepkość cieczy zależy od rodzaju cieczy i temperatury. Wzrost temperatury powoduje wzrost energii kinetycznej cząsteczki, a cząsteczki o zwiększonej energii łatwiej pokonują siły przyciągania cząsteczek sąsiednich, stąd też ze wzrostem temperatury, lepkość cieczy maleje (w przypadku gazów - wartość η wzrasta).

Lepkość maleje wykładniczo wraz z temperaturą, co opisuje równanie Arrheniusa-Guzmana:

$$\eta = Ae^{\frac{\Delta E}{RT}} \quad (4)$$

gdzie: ΔE - energia aktywacji przepływu lepkiego (bariera energetyczna, którą musi pokonać cząsteczka podczas ruchu pomiędzy cząsteczkami sąsiednimi),

R - stała gazowa,

T - temperatura (wyrażana w °K)

A - stała charakterystyczną dla danej cieczy (zależna od masy i objętości molowej).

Do pomiaru lepkości cieczy służą lepkościomierze (wiskozymetry). Do najpopularniejszych należą wiskozymetry Ostwalda i Englera, gdzie oblicza się lepkość kinematyczną przez pomiar czasu przepływu badanej cieczy przez rurkę kapilarną, lub wiskozymetr Höpplera, w którym mierzy się czas opadania standaryzowanej kulki w przezroczystej rurce napełnionej badaną cieczą. W przypadku maści i gęstych zawiesin stosuje się różnego rodzaju wiskozymetry rotacyjne, które mierzą moment siły oporu ruchu obrotowego powodowany lepkością cieczy i służą do wyznaczania współczynnika lepkości dynamicznej.

Metoda pomiaru w *wiskozymetrze Ostwalda* (i innych o podobnej konstrukcji) oparta jest na prawie Poiseuille'a, zgodnie z którym objętość cieczy (V) przepływająca w czasie (t) przez kapilarę o promieniu (R) i długości (l) pod wpływem różnicy ciśnień (Δp) wynosi:

$$V = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8 \eta l} \quad (5)$$

Zakłada się przy tym, że:

- badana ciecz jest nieściśliwa,
- przepływ jest laminarny,
- warstwa poruszająca się w osi kapilary ma prędkość największą, prędkość pozostałych warstw kapilary zmienia się malejąco do zera (dla warstwy przylegającej bezpośrednio do ścianki),
- poszczególne warstwy poruszają się ruchem jednostajnym,
- przepływ cieczy następuje na skutek istnienia różnicy ciśnień na obu końcach kapilary.

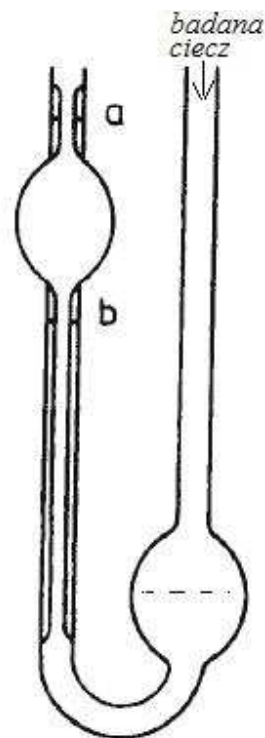
W wiskozymetrze Ostwalda (rys. 3) ciecz przepływa przez kapilarę pod wpływem różnicy ciśnień hydrostatycznych w obu ramionach U-rurki, czyli:

$$\Delta p = (h_1 - h_2) \cdot d \cdot g \quad (6)$$

gdzie: $(h_1 - h_2)$ - różnica poziomów cieczy w obu ramionach,

d - gęstość cieczy,

g - przyspieszenie ziemskie.



Rys. 3

W praktyce dla wyznaczenia lepkości mierzy się czas przepływu przez kapilarę objętości cieczy zawartej pomiędzy poziomami a i b (rys. obok). Jeżeli czas ten wynosi dla cieczy wzorcowej o znanej lepkości t_0 , a dla cieczy badanej t_x to:

$$\eta_x = \eta_0 \frac{d_x t_x}{d_0 t_0} \quad (7)$$

Aby różnica poziomów ($h_1 - h_2$) była w obu przypadkach taka sama, wiskozymetr Ostwalda powinno się zawsze napełniać taką samą objętością cieczy.

Metoda pomiaru szybkości opadania kulki w cieczy została opracowana teoretycznie przez Stokesa, który wyprowadził wzór na siłę, z jaką lepki ośrodek o gęstości d_c przeciwdziała ruchowi kulki o promieniu r , gęstości d_k i prędkości V . Siła ta wynosi:

$$F = 6 \pi \eta r V \quad (8)$$

Na kulkę spadającą w środowisku lepkim działają trzy siły: wymieniona wyżej siła oporu (tarcia), skierowana ku dołowi siła ciężkości (Q) i działająca ku górze siła wyporu (P). Jednostajny ruch kulki wynika z następującego działania sił: $Q = F + P$, gdzie:

$$Q = \frac{4}{3} \pi r^3 d_k g \quad (9)$$

$$P = \frac{4}{3} \pi r^3 d_c g \quad (10)$$

r - promień kulki

d_k – gęstość materiału, z którego wykonana jest kulka

d_c - gęstość cieczy

g - przyspieszenie ziemskie

Po podstawieniu wszystkich wartości uzyskujemy:

$$6 \pi \eta r V = \frac{4}{3} \pi r^3 (d_k - d_c) g \quad (11)$$

Jeśli prędkość kulki wyrazimy jako stosunek drogi (s) do czasu (t), to wyrażenie na lepkość przyjmie postać:

$$\eta = \frac{2r^2 g}{9s} (d_k - d_c) t \quad (12)$$

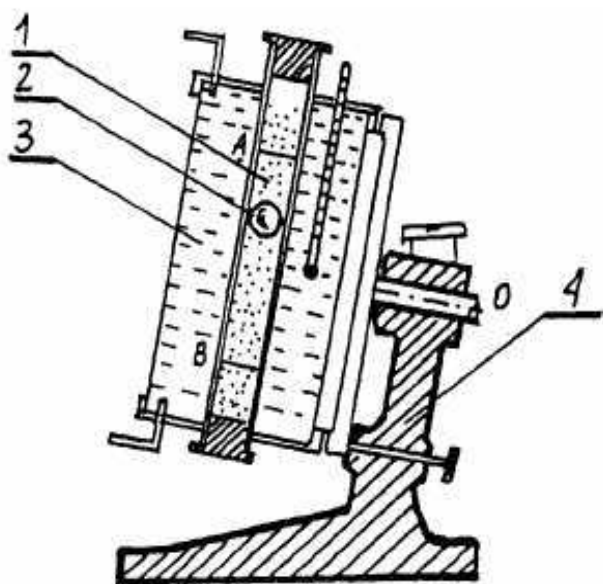
Wzór ten stosuje się wówczas, gdy kulka opada w cieczy znajdującej się w naczyniu o tak dużych wymiarach, że można pominąć wpływ ścian na ruch kulki. W wiskozymetrze Höpplera kulka opada w rurce szklanej o dość małym promieniu wewnętrznym r . Poza tym, rurka wiskozymetru Höpplera posiada niewielkie odchylenie od pionu, skutkiem czego kulka uzyskuje odpowiednie prowadzenie i nie odbija się od ścianek. Stąd w wyrażeniu stosowanym praktycznie do obliczania lepkości:

$$\eta = K (d_k - d_c) t \quad (13)$$

Stała K tzw. stała kulki różni się znacznie od wartości $\frac{2r^2 g}{9s}$ wynikającej ze wzoru (12).

Wartość stałej dla danej kulki jest wyznaczana doświadczalnie i podawana w instrukcji wiskozymetru. Wiskozymetr Höpplera umożliwia pomiar lepkości cieczy niutonowskich

w granicach $10^{-5} - 10^3 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$. Rurka, w której opada kulka jest termostatowana płaszczem wodnym. Końce jej są zaopatrzone w nakrętki, które zdejmuje się przy wprowadzaniu lub usuwaniu cieczy i kulki. Wzdłuż rurki zaznaczony jest stały odcinek drogi (100 mm) i połowa tego dystansu. Rurka wraz z płaszczem wodnym jest umocowana w statywie, który umożliwia obrót jej w pionie o 180° . Przez odpowiedni obrót rurki kulkę wprowadza się do góry i mierzy czas jej opadania na wyznaczonej drodze z dokładnością do 0,1 s.



Rys. 4. Wiskozymetr Höpplera:

1–rurka szklana, 2–kulka, 3–płaszcz grzeiny wodny, 4–podstawa

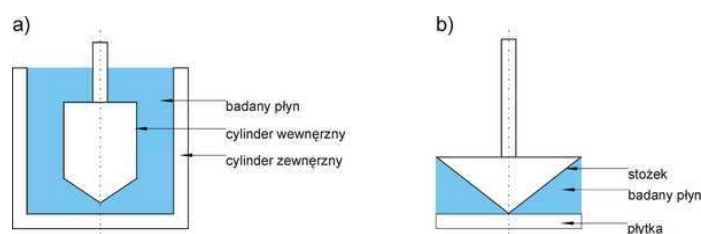
W wiskozymetrze Höpplera miarą lepkości jest prędkość opadania kulki (o znanych wymiarach i gęstości) w badanym ośrodku pod wpływem stałej siły zewnętrznej (zwykle siły ciężkości). Wiskozymetr Höpplera służy do dokładnych pomiarów lepkości gazów i cieczy przezroczystych o charakterze newtonowskim. Przy zachowaniu poprawnej temperatury próbki,

lepkościomierz z opadającą kulką jest jednym z najdokładniejszych wiskozymetrów.

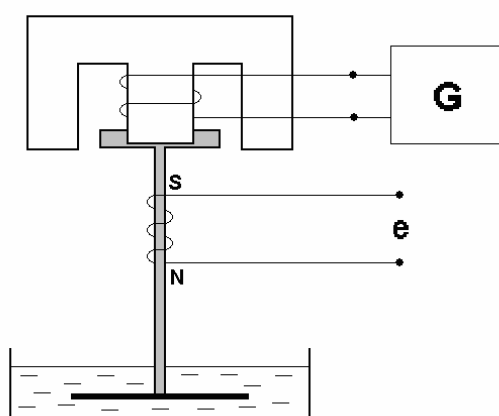
W procesach przemysłowych (przemysł kosmetyczny i farmaceutyczny, petrochemia, mleczarstwo, piwowarstwo, produkcja: lakierów, żywic, słodczy, tłuszczu) powszechnie stosuje się też wiskozymetry rotacyjne, które mierzą opór lepkościowy na kręcącym się dysku lub cylindrze. W tym przypadku następuje ścinanie badanej próbki o określonej objętości na skutek obrotów elementu pomiarowego. Ze względu na zasadę działania wiskozymetry rotacyjne można podzielić na aparaty o nastawianej prędkości ścinania lub nastawianym momencie ścinającym. Zasadniczymi elementami wiskozymetru pierwszego typu są cylindryczny zbiornik i znajdujący się w nim walec (dysk). Pomiędzy walec a cylindrem wprowadza się badany płyn o określonej objętości. Cylinder wypełniony cieczą obraca się, podczas gdy zanurzony w niej walec utrzymywany jest nieruchomo. Obrót cylindra powoduje ścinanie badanej próbki cieczy. Miarą naprężenia ścinającego w warstwie cieczy jest moment siły potrzebny do zrównoważenia momentu skręcającego wywieranego przez warstwę płynu na walec. Moment siły określa naprężenia ścinające, natomiast szybkość ścinania jest określana przez prędkość obrotową, tak więc pomiar polega na równoczesnym określeniu prędkości kątowej wirującego cylindra oraz związanego z nim momentu siły działającego na walec. W przypadku wiskozymetru

z ustalonym momentem ścinającym jest odwrotnie: cylinder pozostaje nieruchomy, a w ruch wprowadzany jest element zanurzony w cieczy. Miarą lepkości cieczy jest prędkość obrotowa, jaka ustali się po przyłożeniu zadanego momentu obrotowego. Na podstawie stałych geometrycznych wyznacza się krzywe płynięcia. System obracającego się walca, który przedstawiony na rys. 5a, nazywany jest Couette i jest używany do pomiaru płynów o małej lepkości. Płyny bardzo lepkie mierzy się w systemie stożka na płytce (*cone-on-plate system*), który przedstawiono na rys. 5b.

Stosunek pomiędzy momentem obrotowym, a prędkością jest interpretowany jako lepkość (oznaczana jako: $\text{mPa}\cdot\text{s}$ lub cP). Zaletą wiskozymetrów rotacyjnych jest duża dokładność (ich błąd względny wynosi od 1% do 3%) oraz możliwość badania płynów o zróżnicowanej gęstości (płyny, maści, asfalt itp.). Do wad zalicza się skomplikowaną obsługę, konieczność rekaliibracji oraz dużą objętość próbki niezbędną do pomiaru



Rys. 5. Główne systemy pomiarowe w wiskozymetrach rotacyjnych: a) system Couette, b) system stożka na płytce. Mierząc wartość siły oporu cieczy znajdującej się w szczelinie między cylindrami albo stożkiem i płaszczyzną, określa się wartość współczynnika lepkości. Urządzenie składa się z cylindra, którego prędkość obrotową można zadać, oraz nieruchomego walca umieszczonego wewnątrz cylindra. Czujnik siły na cylindrze pozwala mierzyć moment skręcający wywierany przez płyn - próbkę. Moment skręcający określa naprężenie ścinające, natomiast prędkość obrotowa cylindra - prędkość ścinania.



Rys. 6.

Stosuje się 2 warianty położenia płytki drgającej: *płytką drgającą pionowo* (brak siły oporu; duże napięcie wydrukowane dla każdej lepkości) i *płytką drgającą poziomo*. Działają one w oparciu o pomiar tłumienia drgań mechanicznych w cieczy, które jest tym większe, im większa jest jej lepkość. W jednych przyrządach mierzony jest czas tłumienia,

Z pośród innych wiskozymetrów wykorzystywanych w przemyśle warto wymienić wiskozymetry tłokowe czy wibracyjne (ultradźwiękowe), którego schemat działania przedstawiono na rys. 6. Ich zasada działania polega na pomiarze wartości wydrukowanego napięcia (e) w cewce pomiarowej, którego amplituda zależy od amplitudy i częstotliwości sygnału z generatora oraz od lepkości cieczy, która stanowi opór dla ruchomego rdzenia/płytki.

w innych moc potrzebna do utrzymania amplitudy drgań rezonatora na określonym poziomie, w jeszcze innych mierzona jest częstotliwość drgań jako funkcja różnicy faz pomiędzy wzbudzeniem i echem (im większa lepkość tym częstotliwość niższa). Urządzenia tego typu są szczególnie przydatne w badaniach cieczy o bardzo dużej lepkości, natomiast są mało dokładne w przypadku pomiarów cieczy o niskiej lepkości.

Część praktyczna:

Wyznaczenie punktu izoelektrycznego żelatyny. Badanie wpływu temperatury na lepkość dynamiczną i właściwą roztworów.

I. Wyznaczanie punktu izoelektrycznego żelatyny.

Zadanie praktyczne polega na pomiarze lepkości roztworów żelatyny o różnej wartości pH i znalezieniu takiej wartości pH roztworu, przy której lepkość żelatyny jest najmniejsza. Jest to pośredni sposób określenia tzw. punktu izoelektrycznego żelatyny, tj. znalezienie takiego pH przy którym żelatyna nie wędruje w polu elektrycznym. Dla przykładu w punkcie izoelektrycznym aminokwas jest w jednakowy sposób zdysocjowany jako kwas i jako zasada. W roztworze o pH większym od punktu izoelektrycznego cząsteczka staje się anionem, a poniżej punktu izoelektrycznego – kationem.

Wprowadzenie. Żelatyna jest białkiem otrzymywanym z chrząstek kości i innych tkanek zwierzęcych. Zawiera głównie kolagen, a w niewielkich ilościach także inne białka (kreatyny i albuminy), kwasy nukleinowe, węglowodany i soli mineralne. Rozpuszcza się w wodzie tworząc układ koloidalny - zol żelatyny, który łatwo przechodzi w żel, o ile temperatura otoczenia nie jest zbyt wysoka.

Białka zbudowane są z aminokwasów, zawierających równocześnie grupy aminowe i karboksylowe. W zależności od pH środowiska może uzyskiwać wypadkowy ładunek dodatni lub ujemny. Ładunek dodatni powstaje w wyniku protonowania grupy aminowej w środowisku kwasowym. W miarę podwyższania pH grupy karboksylowe ulegają dysocjacji tworząc aniony karboksylanowe niosące ładunek ujemny. Wartość pH środowiska, przy którym wypadkowy ładunek elektryczny jest równy zeru nazwany jest punktem izoelektrycznym.

Ładunek wywiera istotny wpływ na szereg właściwości fizykochemicznych żelatyny, takich jak: lepkość, napięcie powierzchniowe, ciśnienie osmotyczne, trwałość układu itp. Śledząc lepkość wodnego roztworu żelatyny w miarę zmiany pH tego roztworu można zaobserwować, że jej najniższa w punkcie izoelektrycznym. Spowodowane jest to faktem, że w przypadku braku ładunku nie występuje oddziaływanie elektrostatyczne cząsteczek białka na siebie i lepkość jest stosunkowo niewielka. W miarę wzrostu ładunku elektrycznego zachodzi coraz wyraźniejsze oddziaływanie cząsteczek na siebie i wzrasta lepkość roztworu.

Żelatyna w zależności od zastosowanego surowca i sposobu produkcji może posiadać punkt izoelektryczny zawarty w granicach od 4,0 do 9,0 i stąd biorą się różne właściwości fizykochemiczne i jej różne zastosowanie. W przemyśle spożywczym spełnia rolę zagęszczacza, środka wiążącego, emulgującego i jest wykorzystywana do produkcji deserów, galaretek, żelków, przy produkcji jogurtów i lodów. W przemyśle farmaceutycznym żelatyna znalazła zastosowanie w produkcji kapsułek leków, jak również przy powlekaniu tabletek otoczkami. Ponadto stosowana jest do wyrobu kosmetyków (różnego rodzaju kremów, szminek itp.), przy klarowaniu win i soków owocowych, do otrzymywania materiałów fotograficznych, a także jako składnik do produkcji kulek z farbą używanych w paintballu.

Wykonanie ćwiczenia:

1. Przygotować w kolbach stożkowych 6 roztworów buforowych o składzie podanym w tabeli 1 (po dodaniu wymieszać):

Roztwór	1	2	3	4	5	6
Kwas octowy (1 mol/dm^3) [cm^3]	30	30	30	30	30	30
NaOH (1 mol/dm^3) [cm^3]	0.2	1.5	10	20	25	28

2. Do 6 zlewek wlać po 20 cm^3 uprzednio przygotowanych roztworów buforu octanowego (uzyskanych wg. punktu 1, należy pamiętać aby zawartość kolbek wymieszać przed pobraniem). Następnie do każdej zlewki dodać po 20 cm^3 roztworu żelatyny. Roztwory starannie wymieszać.
3. Do wiskozymetru Ostwalda (do ramienia z większym zbiornikiem, rys. 3) wlać 20 cm^3 wody (zbiorniczek jest wyskalowany i jeśli poziom cieczy jest identyczny w obu ramionach wiskozymetru – poziom cieczy powinien pokrywać się z znacznikiem). Nałożyć zaciągarkę/strzykawkę do pipet, na drugie ramie i powoli zasysając napełnić mniejszy zbiorniczek. Poziom menisku cieczy powinien być powyżej górnej kreski nacechowanej na kapilarze wiskozymetru („a” na rys. 3). Następnie zmierzyć czas przepływu wody przez kapilarę (od kreski „a” do kreski „b” – rys. 3). Przeprowadzić pomiary co najmniej dwukrotnie. Jeżeli wyniki dwóch pomiarów różnią się więcej niż o 2 s, to należy wykonać dodatkowy pomiar – wyliczyć średnią.
4. Podobnie jak dla wody wyznaczyć czas przepływu przez kapilarę wiskozymetru kolejnych roztworów żelatyny zmieszanych z buforem o różnej wartości pH. Zwrócić uwagę, aby podczas podnoszenia poziomu żelatyny w wiskozymetrze, roztworu tego nie spienić oraz każdorazowo przy zmianie roztworu uprzednio przepłukać przyrząd niewielką objętością badanego roztworu.
5. Po pomiarze czasu przepływu badanego roztworu przez wiskozymetr zmierzyć wartość pH tej cieczy. Przed pomiarami pH uprzednio wykalibrować miernik, używając do tego wzorcowych roztworów buforowych.

6. Obliczyć wartości lepkości kolejnych roztworów żelatyny. W tym celu podzielić średnią wartość czasu przepływu roztworu (t_1 , t_2 itd.) przez średni czas przepływu wody (t_0), np.: $\eta_1 = t_1/t_0$; Jednostką czasu w układzie SI jest sekunda (s).
7. Sporządzić wykres zależności lepkości od pH roztworu: $\eta = f(\text{pH})$.
Narysować 2 proste (styczne) przebiegające wzdłuż narysowanych linii (wznoszącej i opadającej) i odczytać wartość pH, przy której te styczne przecinają się.
8. Metodą najmniejszych kwadratów obliczyć współczynniki a i b równań prostych ($y = a \cdot x + b$) opisujących zależność lepkości względnej od pH w zakresie niższych (równanie prostej 1) i wyższych (równanie prostej 2) wartości pH.

Alternatywnie można wyznaczyć równania kierunkowe prostych w oparciu o programy komputerowe do wizualizacji danych (np.: MS Excel – wykonać wykresy zależności lepkości od pH dla mniejszych wartości pH (wykres 1) i większych wartości (wykres 2). Wyznaczyć linię trendu i równanie kierunkowe proste, gdzie parametr przy x wyznacza wartość a , wartość b wyznacza wolny człon równania.

Do obliczenia współczynników kierunkowych prostych (a , b) można posłużyć się następującymi wzorami:

$$a = \frac{\sum_i x_i \sum_i y_i - n \sum_i x_i y_i}{(\sum_i x_i)^2 - n \sum_i x_i^2} \quad (13)$$

$$b = \frac{1}{n} \left(\sum_i y_i - a \sum_i x_i \right) \quad (14) \text{ gdzie } n = \text{liczba pomiarów (w tym przypadku } n=3\text{)}.$$

Dla ułatwienia obliczeń można posłużyć się tabelami pomocniczymi:

Tabela pomocnicza dla mniejszych wartości pH (roztwory 1-3)

n	x (pH)	y (η)	x^2	$x \cdot y$
	2,96			
	3,36			
	4,13			
Σ (suma)				

Tabela pomocnicza dla większych wartości pH (roztwory 4-6)

n	x (pH)	y (η)	x^2	$x \cdot y$
	4,68			
	5,00			
	5,21			
Σ (suma)				

9. Podać równania prostych osobno dla każdej części (wznoszącej i opadającej) krzywych: $\eta = f(\text{pH})$.

$$y_1 = a_1 x + b_1 \quad \text{ i } \quad y_2 = a_2 x + b_2$$

10. Znaleźć punkt przecięcia tych prostych. Odpowiada on pH w punkcie izoelektrycznym żelatyny. Można go wyliczyć podstawiając wartości współczynników kierunkowych prostych y_1 i y_2 :

$$pH = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (15)$$

gdzie: a_1 i a_2 oznaczają współczynniki kierunkowe
 b_1 i b_2 – wartości przesunięcia prostej 1 i 2.

Ćwiczenie 15b. Wpływ temperatury na lepkość. Wiskozymetr rotacyjny

Obecnie w laboratoryjnych do pomiaru lepkości najczęściej wykorzystywane są wiskozymetry rotacyjne, zwane również wiskozymetrami Brookfielda. Nazwa pochodzi od nazwiska Dona Brookfielda, który w 1932 roku opracował, a następnie w 1934 roku zaczął produkować pierwsze lepkościomierze rotacyjne. Zaletą wiskozymetrów rotacyjnych są bardzo szybkie i powtarzalne pomiary. Pomiary będą wykonywane na wiskozymetrze Brookfield DV-II+ w obecności osoby prowadzącej ćwiczenia. Kalibracja wiskozymetru wymaga staranności i dokładności, a jej nieprawidłowe wykonanie może przyczynić się nawet do uszkodzenia elementów mechanicznych wiskozymetru.

Wykonanie ćwiczenia/instrukcja obsługi wiskozymetru rotacyjnego

1. Do zlewki wlać ok. 450 ml badanej cieczy (np. glicerolu) i umieścić ją w łaźni. Przy pomocy termometru elektronicznego zmierzyć temperaturę płynu w zlewce.
2. Wykalibrować wiskozymetr rotacyjny. W tym celu należy wypoziomować aparat przez regulację wysokości nóżek statywu i upewnić się, że wrzeciono pomiarowe **nie jest** przymocowane do osi (sprężyny) układu pomiarowego.
3. Uruchomić aparat włącznikiem znajdującym się na tylnej ścianie urządzenia. Na ekranie wyświetlacza pojawi się nazwa aparatu:

BROOKFIELD DVII+
 VISCOMETER

4. Po kilku sekundach pojawi się napis przypominający o konieczności usunięcia wrzeciona pomiarowego:

1. REMOVE SPINDLE
 2. PRESS ANY KEY

(tłum. *usuń wrzeciono, wciśnij dowolny przycisk*).

Jeśli wrzeciono jest przymocowane należy je bezwzględnie usunąć, aby nie doprowadzić do uszkodzenia elementów pomiarowych aparatu.

5. Po naciśnięciu dowolnego przycisku następuje autokalibracja urządzenia, o czym świadczy komunikat na ekranie wiskozymetru:

AUTOZEROING
 VISCOMETER

6. Procedura autozerowania trwa około 15 sek., po tym czasie na ekranie pojawia się napis informujący o konieczności założenia wrzeciona pomiarowego:

REPLACE SPINDLE PRESS ANY KEY

(tłum. załóż wrzeciono, wciśnij dowolny przycisk po założeniu wrzeciona).

7. Procedura zakładania wrzeciona:

- Upewnić się, że obie części złącza są dokładnie czyste, aby nie uszkodzić gwintu.
 - Przyłożyć wrzeciono do gwintowego uchwyty końcówki osi głównej i przykręcamy je obracając w lewo, przytrzymując jednocześnie drugą ręką końcówkę osi lepkościomierza (osoba prowadząca ćwiczenia powinna zademonstrować procedurę mocowania wrzeciona).
 - Do przykręcania i odkręcania wrzeciona nie jest konieczne użycie żadnych narzędzi (kluczy). Dokręcenie ręką w zupełności wystarczy.
 - Po przykręceniu wrzeciona, umieszczamy je w zlewce z badanym płynem. Aby uniknąć tworzenia się pęcherzyków w badanej cieczy należy wkładać je do zlewki pod lekkim kątem (dotyczy to zwłaszcza cieczy lepkich). Podczas umieszczania naczynia pod osią aparat powinien być podniesiony na tyle, aby umożliwić przykręcenie wrzeciona przy jednoczesnym stałym zanurzeniu wrzeciona w płynie
 - Następnie opuszczamy lepkościomierz (pokrętko po prawej stronie w tylnej części aparatu) tak, aby granica górnej warstwy płynu zrównała się z przewężeniem na osi wrzeciona. Aparat jest gotowy do pomiaru.
8. Po naciśnięciu dowolnego przycisku, na ekranie powinna pojawić się następująca informacja.

cP 0,00	S63
RPM ----	----°C

Jeśli wyświetlana jest inna jednostka niż „cP” wówczas wciskając klawisz SELECT DISPLAY możemy dokonać jej zmiany na właściwą.

- Wciskając przycisk SET SPEED ustawiamy prędkość obrotu osi. Prędkość dobiera prowadzący zajęcia (sugerowana prędkość dla glicerolu 100 RPM).
- Po włączeniu przycisku MOTOR ON/OFF następuje pomiar lepkości. Wynik pomiaru jest widoczny w lewym górnym rogu wyświetlacza. Zanotować wartość lepkości (cP) i temperatury (odczytanej z termometru) w jakiej dokonano pomiaru.
- Włączyć termostat łaźni wodnej i odczekać, aż temperatura badanego płynu wzrośnie o 5°C. Dokonać pomiaru lepkości w temperaturze o 5 i 10 stopni wyższej od temperatury początkowej. Wyniki zestawić w tabeli.

Temperatura badanej substancji (glicerolu) [°C]	Lepkość [cP]

Wyciągnąć wnioski na temat wpływu temperatury na lepkość.