

## WYZNACZANIE CIEPŁA TOPNIENIA LODU. WYZNACZANIE CIEPŁA PAROWANIA WODY W TEMPERATURZE WRZENIA.

- I. Cel ćwiczenia:** zapoznanie z metodą pomiarów kalorymetrycznych oraz dokładnością tych pomiarów.
- II. Przyrządy:** waga laboratoryjna, kalorymetr z mieszadłem, termometr, lód, kolba szklana wraz z rurką łączącą, element grzewczy, stoper.
- III. Literatura:**
- [1] H. Hofmokl, A. Zawadzki –Laboratorium fizyczne,
  - [2] K. Fulińska (praca zbiorowa) – Opisy i instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych z fizyki.
  - [3] T. Rewaja (praca zbiorowa) – Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki na politechnice.
  - [4] Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna część II – Ciepło i fizyka drobinowa.

### IV. Wprowadzenie

Wszystkie ciała mogą występować w trzech różnych stanach skupienia: w fazie stałej, ciekłej i gazowej. Stan skupienia zależy od warunków, w jakich znajduje się dane ciało.

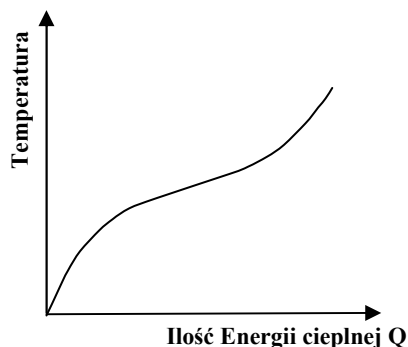
W miarę podnoszenia się temperatury słabną własności charakterystyczne dla ciała stałego, przede wszystkim sprężystość postaci i moduł Younga. Następuje rozluźnienie więzów między cząsteczkami. Przy wzroście temperatury granica sprężystości ciała stałego obniża się i ciało staje się bardziej plastyczne. Ciało takie jak szkło przy wzroście temperatury z twardego i kruche go staje się coraz bardziej plastyczne aż przechodzi w ciecz. Podobnie zachowuje się wosk, smoła, żywica itp. Są to ciała bezpostaciowe, to znaczy nie wykazujące budowy mikrokrystalicznej. Ciała bezpostaciowe nie mają określonej temperatury topnienia. Podobnie nie mają dokładnej temperatury krzepnięcia (rys.1). Natomiast dla ciał krystalicznych, jeżeli będzie dostarczona energia w postaci ciepła, to temperatura jego będzie wzrastała do momentu topnienia (rys.2). Po czym przy dalszym ogrzewaniu temperatura nie ulega zmianie, dopóki całe ciało stałe nie zmieni się w ciecz. Temperaturę tą nazywamy temperaturą topnienia  $T_t$ . W tej samej temperaturze ciecz, która będzie ochładzana będzie krzepnąć. Ciała te niekiedy pod wpływem ogrzewania doznają przemian wewnętrznych, to znaczy ciało występuje w dwu lub więcej postaciach różniących się budową kryształów.

Jeśli ciecz będzie ogrzewana w dalszym ciągu, to temperatura jej będzie wzrastać, a ciecz będzie parować. Parowanie zachodzi w każdej temperaturze. Następuje jednak szybciej ze wzrostem temperatury. W pewnej temperaturze parowanie zachodzi w sposób gwałtowny, powstają wówczas pęcherzyki pary w całej objętości cieczy. Stan ten nazywamy wrzeniem. W czasie wrzenia temperatura również nie zmienia się do czasu zamiany całej cieczy w parę. Temperaturę tę nazywamy temperaturą wrzenia. Zjawisko odwrotne do parowania nazywamy skraplaniem. W temperaturze topnienia są w równowadze ciało stałe i ciecz, a w temperaturze wrzenia ciecz i para (przy stałym ciśnieniu). Aby stopić określoną ilość ciała potrzebna jest określona ilość energii cieplnej zależnej od rodzaju ciała.

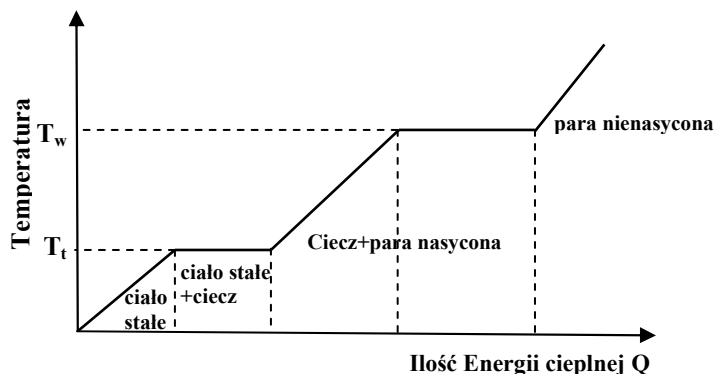
Energia potrzebna do stopienia jednostki masy substancji bez zmiany temperatury nazywa się ciepłem topnienia.

Podobnie też można zdefiniować ciepło parowania:

Energię potrzebną do wyparowania jednostki masy substancji bez zmiany temperatury nazywamy ciepłem parowania.



Rys.1 Krzywa topnienia ciał bezpostaciowych



Rys.2 Krzywa topnienia i parowania ciał krystalicznych

Zależność między temperaturą topnienia  $T$ , ciśnieniem  $p$ , przy którym proces się odbywa i ciepłem topnienia  $L$  wyrażony jest wzorem Clapeyrona – Clausiusa.

$$L = T(V_2 - V_1) \frac{dp}{dT} \quad (1)$$

gdzie  $V_1$  jest objętością właściwą ciała stałego, a  $V_2$  jest objętością właściwą cieczy. Zwykle przy topnieniu następuje wzrost objętości w takim razie  $V_2 - V_1 > 0$  ale  $L > 0$  (zawsze), więc  $\frac{dp}{dT} > 0$ , temperatura topnienia wzrasta z ciśnieniem.

Lód pod ciśnieniem normalnym (ciśnienie normalne  $p = 101325 \text{ N/m}^2$ ) topi się w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ . Temperaturę tę nazywamy temperaturą topnienia lodu w warunkach normalnych.

Ciepłem topnienia lodu nazywamy ilość energii jaką należy dostarczyć, aby 1 kg lodu w temperaturze  $0^\circ\text{C}$  zamienić na wodę o tej samej temperaturze. Wymiarem ciepła topnienia w układzie SI jest J/kg.

Podwyższenie ciśnienia wywieranego na lód obniża jego temperaturę topnienia.

Woda (podobnie bizmut) jest wyjątkiem, ponieważ lód podczas topnienia zmniejsza swą objętość. Woda rozszerza się tak jak inne ciecze, tylko w przedziale temperatur  $+4^\circ\text{C}$  do temperatury wrzenia. W przedziale temperatur  $0^\circ\text{C}$  do  $+4^\circ\text{C}$  woda podczas ogrzewania kurczy się. W temperaturze  $+4^\circ\text{C}$  woda zajmuje najmniejszą objętość, wskutek czego jej gęstość jest największa.

Ciepłem parowania wody nazywamy ilość energii jaką należy dostarczyć, aby 1 kg wody zamienić na parę nasyconą o tej samej temperaturze (w przemianie izotermicznej). Wymiarem ciepła parowania  $R$  w układzie SI jest J/kg.

Ponieważ ciepło parowania w dużym stopniu zależy od temperatury, dlatego też przy wyznaczaniu ciepła parowania należy zawsze podawać temperaturę, w której odbywa się pomiar. Ciepło parowania maleje ze wzrostem temperatury i wynosi zero dla temperatury krytycznej (następuje zanik własności fizycznych fazy stanu pary nasyconej i cieczy). Temperatura krytyczna dla wody wynosi  $374,2^\circ\text{C}$ .

Podobnie jak i przy topnieniu i tu ma zastosowanie wzór Clapeyrona – Clausiusa.

$$R = T(V_2 - V_1) \frac{dp}{dT} \quad (2)$$

gdzie  $V_2$  i  $V_1$  są objętościami właściwymi pary nasyconej i cieczy,  $p$  – ciśnieniem pary nasyconej w temperaturze  $T$ . W temperaturze krytycznej  $V_2 = V_1$ .

## V. Wiadomości z kalorymetrii

Energia cieplna potrzebna do podwyższenia temperatury wody o masie  $m$  od  $T_o$  do temperatury  $T_w$  wynosi

$$Q = c m (T_w - T_o) \quad (3)$$

Stosunek  $Q/(T_w - T_o)$  nazywamy pojemnością cieplną  $k$  ciała. Jest to więc taka ilość energii cieplnej, która potrzebna jest do podwyższenia temperatury ciała o 1K. Stąd ze wzoru (3) wynika relacja

$$k = c m \quad (4)$$

Masę wody, której należy dostarczyć tą samą ilości energii cieplnej co danemu ciału, aby podwyższyć jej temperaturę o 1K nazywamy równoważnikiem wodnym danego ciała .

Równoważnik wodny wyrażony w kilogramach jest liczbowo równy pojemności cieplnej wyrażonej w kcal na 1K.

Ciepło właściwe danego ciała wyrażone wzorem  $\frac{Q}{m(T_w - T_o)}$  jest liczbowo równe pojemności cieplnej jednostki jego masy.

Przy pomiarach kalorymetrycznych w pracowni zakłada się, że w granicach zachodzących zmian temperatur ciepło właściwe wody i ciał badanych jest wielkością stałą, niezależną od temperatury (przy dokładnych pomiarach założenie jest niesłuszne).

Pomiary ilości energii cieplnej oparte są na wyprowadzonej z zasady zachowania energii zasadzie równości wymiany ciepła, którą można opisać następujący sposób:

Energia układu zamkniętego odosobnionego jest wielkością stałą. Jeśli nie ma wymiany energii cieplnej z otoczeniem i nie zachodzą przemiany energii cieplnej na inne rodzaje energii lub innych rodzajów energii na energię cieplną, to ilość energii cieplnej straconej przez ciało (lub ciała) o wyższej temperaturze jest równa ilości energii cieplnej uzyskanej przez ciało (lub ciała) o niższej temperaturze.

Bilans zysków i strat energii cieplnej wynosi

$$Q_o = Q_p \quad (5)$$

$Q_o$  – energia cieplna oddana przez ciało cieplejsze,  $Q_p$  – energia cieplna pobrana przez ciało zimniejsze.

## VI. Zasada pomiaru.

### VI.1 Wyznaczanie ciepła topnienia lodu

Małe kawałki suchego lodu w temperaturze topnienia  $T_t$  ( $0^\circ\text{C}$ ) wrzucone do kalorymetru napełnionego wodą w temperaturze  $T_1$ , topnieją i zamieniają się w wodę o temperaturze  $T_t$ . Woda powstała ze stopionego lodu ogrzewa się do temperatury  $T_2$ . Energia cieplna potrzebna do stopienia lodu i podwyższenia temperatury powstałej wody zostaje pobrana od wody w kalorymetrze co powoduje, że temperatura tej wody  $T_1$  obniża się do  $T_2$ . Po czym ustala się stan równowagi.

- 1) Energia cieplna pobrana przez lód o masie  $m$  podczas topnienia:

$$Q_1 = L m$$

gdzie  $L$  oznacza ciepło topnienia lodu.

- 2) Energia cieplna pobrana przez wodę o masie  $m$  powstałą z lodu na podwyższenie temperatury od  $T_t$  do  $T_2$ :

$$Q_2 = c m (T_2 - T_t)$$

gdzie  $c$  – ciepło właściwe wody

- 3) Energia cieplna oddana przez wodę w kalorymetrze:

$$Q_3 = c m_w (T_1 - T_2)$$

gdzie  $m_w = m_2 - m_1$ ,  $m_1$  – masa kalorymetru z mieszadłem,  $m_2$  – masa kalorymetru z mieszadłem i wodą.

- 4) Energia cieplna oddana przez kalorymetr:

$$Q_4 = c_k m_1 (T_1 - T_2)$$

gdzie  $c_k$  – ciepło właściwe kalorymetru

Ponieważ  $Q_p = Q_o$ , a  $Q_p = Q_1 + Q_2$  oraz  $Q_o = Q_3 + Q_4$  więc bilans energii przedstawia się następująco:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$$

$$L m + c m (T_2 - T_1) = c (m_2 - m_1) (T_1 - T_2) + c_k m_1 (T_1 - T_2)$$

Po wykonaniu przekształceń mamy

$$L = \frac{[c(m_2 - m_1) + c_k m_1](T_1 - T_2) - c m (T_2 - T_1)}{m} \quad (6)$$

## VI.2 Wyznaczanie ciepła parowania wody w temperaturze wrzenia.

Para wrzącej wody pod ciśnieniem atmosferycznym wprowadzona do wody w kalorymetrze o temperaturze  $T_2$  skrapla się i oddaje energię cieplną, po czym oziębia się do temperatury końcowej kalorymetru  $T_3$ , po jej osiągnięciu następuje stan równowagi.

- 1) Energia cieplna pobrana przez wodę w kalorymetrze  $m_w$ :

$$Q_1 = c m_w (T_3 - T_2)$$

gdzie  $m_w = m_2 - m_1$ ,  $m_1$  – masa kalorymetru z mieszadłem,  $m_2$  – masa kalorymetru z mieszadłem i wodą,  $c$  – ciepło właściwe wody

- 2) Energia cieplna pobrana przez kalorymetr:

$$Q_2 = c_k m_1 (T_3 - T_2)$$

$c_k$  – ciepło właściwe kalorymetru

- 3) Energia cieplna oddana przy skraplaniu pary o masie  $m$ ;

$$Q_3 = R m$$

gdzie  $R$  – ciepło parowania (skraplania),  $m$  – masa pary;

- 4) Energia cieplna oddana przez wodę powstałą ze skroplonej pary przy ostygnięciu od temperatury wrzenia  $T_w$  do temperatury końcowej  $T_3$  kalorymetru;

$$Q_4 = c m (T_w - T_3)$$

Ponieważ  $Q_p = Q_o$ , a  $Q_p = Q_1 + Q_2$  oraz  $Q_o = Q_3 + Q_4$  więc bilans energii przedstawia się następująco

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$$

$$c (m_2 - m_1) (T_3 - T_2) + c_k m_1 (T_3 - T_2) = R m + c m (T_w - T_3)$$

Po wykonaniu przekształceń mamy

$$R = \frac{[c(m_2 - m_1) + c_k m_1](T_3 - T_2) - c m (T_w - T_3)}{m} \quad (7)$$

Przy pomiarach ciepła parowania występuje znaczny błąd (40%) jeśli para wprowadzona do wody nie jest sucha. Aby tego uniknąć rurka doprowadzająca parę ze zbiornika powinna być krótka i otoczona izolacją cieplną. Koniec rurki musi być otoczony „płaszczem”, w którym zatrzymują się krople wody.

Drugim źródłem błędów jest strata energii cieplnej kalorymetru przez wymianę energii cieplnej z otoczeniem na skutek tego, że doświadczenie odbywa się w temperaturze wyższej od temperatury otoczenia. Aby zmniejszyć ten błąd, należy szybko doprowadzić parę do wody w kalorymetrze przez szeroką rurkę doprowadzającą.

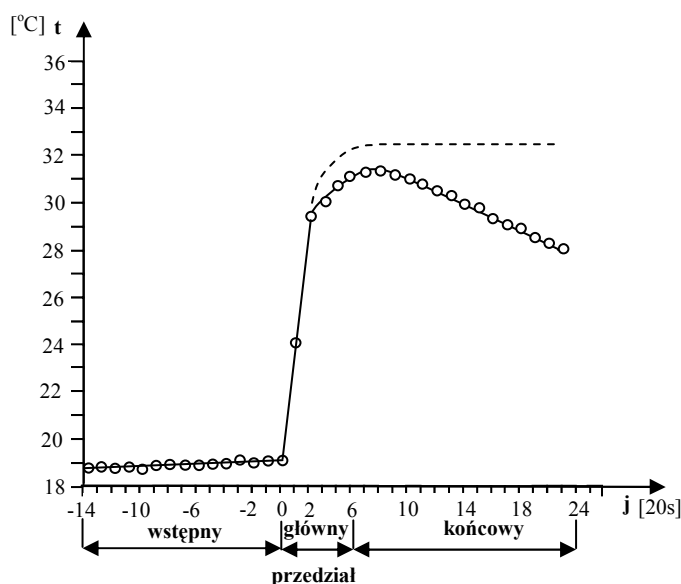
### VI.3 Obliczenie poprawki na wymianę energii cieplnej między kalorymetrem i otoczeniem.

Niżej opisana poprawka omawia przypadek, kiedy do wody jest wrzucone ciało ogrzewające wodę.

Pomiar kalorymetryczny dzielimy na trzy przedziały czasowe:

- pierwszy wstępny – rozpoczyna się obserwacją temperatury wody w kalorymetrze i kończy się w chwili wrzucenia do niej gorącego ciała,
- drugi główny – rozpoczyna się natychmiast po skończeniu pierwszego przedziału i kończy się, gdy temperatura wody osiągnie maksymalną wartość,
- trzeci końcowy – trwa przez cały czas odczytywania temperatury po osiągnięciu przez nią wartości maksymalnej.

Gdyby układ składający się z kalorymetru, wody, mieszadełka i termometru był idealnie izolowany cieplnie od otoczenia, temperatury w przedziale wstępnym i końcowym miałyby wartości stałe. Całkowity wzrost temperatury układu byłby wówczas różnicą tych dwu temperatur i wynosiłby  $t_w - t_0$ . W rzeczywistości temperatura zmienia się nieznacznie w przedziale pierwszym i dużo w przedziale końcowym (rys.3).



Rys.3 Wykres temperatury w funkcji czasu

Temperaturę odczytujemy w jednakowych odstępach czasu, które obieramy jako jednostki umowne czasu (np. 20 s jak na rys.3 lub 30 s). Wzrost temperatury w przedziale wstępnym w pewnym skończonym przedziale można uważać za liniowy. Tak samo można przyjąć w przedziale końcowym.

Wymiana energii cieplnej między kalorymetrem i otoczeniem odbywa się także podczas ogrzewania wody kalorymetru spowodowanego wrzuceniem do niego ciała gorącego (wymiana energii cieplnej w czasie przedziału głównego). To powoduje, że temperatura odczytywana na końcu przedziału głównego jest niższa, niż byłaby w przypadku idealnej izolacji kalorymetru.

Celem naszym będzie obliczenie różnicy między temperaturą, którą kalorymetr mógłby teoretycznie osiągnąć a temperaturą rzeczywistą kalorymetru. Zakłada się, że wymiana energii cieplnej między kalorymetrem i otoczeniem powoduje w jednostce czasu zmianę temperatury kalorymetru proporcjonalną do różnicy temperatur: temperatury średniej kalorymetru w danej jednostce czasu i temperatury otoczenia. Założenie to jest prawdziwe tylko dla małej różnicy temperatur kalorymetru i otoczenia (w doświadczeniu wynosi ona ok. 10°C).

Niech  $\delta t$  będzie zmianą temperatury w jednostce czasu,  $t_{sr}$  – średnia temperatura kalorymetru w danej jednostce czasu,  $\vartheta$  – temperatura otoczenia.

$$\delta t = A(t_{sr} - \vartheta) \quad (8)$$

Aby wyznaczyć A, należy znać  $\delta t$  i  $t_{sr} - \vartheta$ .

1. Wyznaczenie  $\delta t$  i  $t_{sr}$ .

Obieramy prostoliniowy odcinek krzywej (rys.3) w przedziale końcowym (początkowa część krzywej w przedziale końcowym nie jest prostoliniowa), o długości odpowiadającej 10 jednostkom czasu ( np. od  $t_j$  do  $t_{j+10}$ ). Następnie obliczamy wartość średnią  $t_{sr} = \frac{(t_j + t_{j+10})}{2}$  na danym

odcinku. Po czym wyznaczamy średnią wartość  $\delta t$  na tym odcinku  $\bar{\delta t} = \frac{(t_j - t_{j+10})}{10}$ , mamy więc

$$\bar{\delta t} = \frac{(t_j - t_{j+10})}{10} = A \left( \frac{t_j + t_{j+10}}{2} - \vartheta \right) \quad (9)$$

co daje

$$A = \frac{1}{5} \frac{(t_j - t_{j+10})}{(t_j + t_{j+10}) - 2\vartheta} \quad (10)$$

Wartość  $\vartheta$  odczytujemy z termometru przed rozpoczęciem pomiarów kalorymetrycznych.

Mając wartość A obliczamy poprawkę, którą dodaje się do maksymalnej temperatury osiągniętej przez kalorymetr w końcu przedziału głównego.

Jeśli przez 0 oznaczyliśmy początek przedziału głównego, a  $t_0$  odpowiadającą mu temperaturę i po upływie pierwszej jednostki czasu temperatura wody w kalorymetrze będzie miała wartość  $t_1$ , to średnia temperatura  $t_{sr1}$  w pierwszej jednostce czasu równa się  $t_{sr1} = \frac{(t_0 + t_1)}{2}$ . Gdyby

nie było wymiany energii cieplnej z otoczeniem, to dodatkowe podwyższenie temperatury w ciągu tej jednostki czasu wynosiłoby :

$$(\delta t)_1 = A \left( \frac{(t_0 + t_1)}{2} - \vartheta \right),$$

w drugiej jednostce czasu mielibyśmy:  $(\delta t)_2 = A \left( \frac{(t_1 + t_2)}{2} - \vartheta \right)$ .

Analogicznie dodatkowe podwyższenie temperatury w n-tej jednostce czasu (ostatniej w przedziale głównym) wynosiłoby:

$$(\delta t)_n = A \left( \frac{(t_{n-1} + t_n)}{2} - \vartheta \right),$$

W związku z tym całkowity spadek temperatury w przedziale głównym przez wymianę energii cieplnej z otoczeniem wynosi:

$$\begin{aligned} \Sigma(\delta t) &= (\delta t)_1 + (\delta t)_2 + \dots + (\delta t)_n = A \left( \frac{(t_0 + t_1)}{2} + \frac{(t_1 + t_2)}{2} + \dots + \frac{(t_{n-1} + t_n)}{2} - n\vartheta \right) = \\ &= A \cdot \left( \frac{(t_0 + t_n)}{2} + t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1} - n\vartheta \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Jeśli temperatura kalorymetru na końcu przedziału głównego wynosi  $t_w$  to po uwzględnieniu poprawki mamy

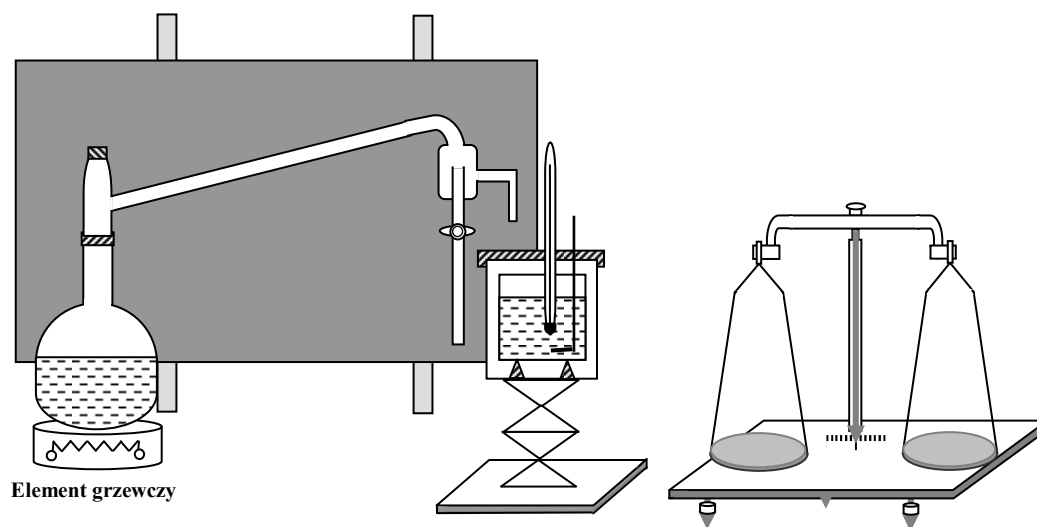
$$(t_w)_{sk} = t_w + A \cdot \left( \frac{(t_0 + t_n)}{2} + t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1} - n\vartheta \right) \quad (12)$$

Ponieważ znana jest temperatura otoczenia  $\vartheta$ , więc nie wykorzystuje się danych z pomiaru wstępnego.

W przypadku, kiedy do wody wrzucane jest ciało zimne prosta w przedziale głównym będzie opadała ponieważ woda w kalorymetrze będzie się oziębiać. W przedziale końcowym natomiast prosta będzie miała tendencje wzrostową. Wówczas wartość poprawki jest ujemna i dodanie jej obniża wartość temperatury największej. Wykres wykonuje się dokładnie na takich samych zasadach jak na rys.3.

Więcej wiadomości na temat poprawki w **Uzupełnienia** punkt 3.

## VII. Aparatura pomiarowa



**Rys.4** Układ do pomiaru ciepła parowania i ciepła topnienia.

## VIII. Pomiary i obliczenia

### VIII.1 Ciepło topnienia lodu

1. Wyznaczyć masę  $m_1$  kalorymetru z mieszadłkiem.
2. Wlać do kalorymetru wodę ( $100 \div 200 \text{ cm}^3$ ) i wyznaczyć masę  $m_2$  kalorymetru z wodą. Obliczyć masę wody  $m_w = m_2 - m_1$ .
3. Zapisywać w tabelce wartości  $j$  i  $t$  tzn. temperaturę wody z dokładnością  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  co 20 sekund przez 5 minut do momentu wrzucenia kostek lodu oraz w przedziale czasu, w którym temperatura osiągnie najniższą wartość  $t_2$ , a następnie od tego momentu jeszcze przez 5 minut (patrz Uzupełnienia punkt 1).
4. Wysuszyć bibułą kawałki lodu i wrzucić do kalorymetru mieszając cały czas wodę. Jednocześnie wykonywać pomiary potrzebne do obliczenia poprawki.
5. Wyznaczyć masę  $m_3$  kalorymetru z wodą i stopionym lodem i obliczyć masę  $m$  wody powstałej z lodu równą  $m = m_3 - m_2$ .
6. Korzystając z tabelki (lub wykresu) odczytać temperaturę początkową  $t_1$  z dokładnością do  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  [ $T_1 = (273 + t_1) \text{ K}$ ].
7. Korzystając z tabelki (lub wykresu) odczytać najniższą temperaturę  $t_2$  wody w kalorymetrze [ $T_2 = (273 + t_2) \text{ K}$ ].
8. Obliczyć poprawkę na wartość temperatury  $t_2$  według wzoru (12) (można obliczyć poprawkę graficznie, patrz Uzupełnienia punkt 2).
9. Obliczyć ciepło topnienia lodu  $L$  według wzoru (6).
10. Obliczyć niepewność  $\Delta L$  wyznaczenia ciepła topnienia lodu  $L$ :  $\Delta t_1 = \Delta t_2$  ( $\Delta T_1 = \Delta T_2$ ) zależą tylko od cechowania termometru, niepewności pomiaru mas  $\Delta m_1 = \Delta m_2 = \Delta m_3$  od dokładności ważenia.

$$\Delta L = \pm \left( \left| \frac{\partial L}{\partial m_1} \Delta m_1 \right| + \left| \frac{\partial L}{\partial m_2} \Delta m_2 \right| + \left| \frac{\partial L}{\partial m_3} \Delta m_3 \right| + \left| \frac{\partial L}{\partial T_1} \Delta T_1 \right| + \left| \frac{\partial L}{\partial T_2} \Delta T_2 \right| \right)$$

$$\frac{\partial L}{\partial m_1} = \frac{(c_k - c)(T_1 - T_2)}{m}, \quad \frac{\partial L}{\partial m_2} = \frac{c(m_3 - m_2)(T_1 - T_2) + [c(m_2 - m_1) + c_k m_k](T_1 - T_2)}{(m_3 - m_2)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial m_3} = -\frac{[c(m_2 - m_1) + c_k m_k](T_1 - T_2)}{(m_3 - m_2)^2}, \quad \frac{\partial L}{\partial T_1} = \frac{c(m_2 - m_1) + c_k m_k}{m}, \quad \frac{\partial L}{\partial T_2} = \frac{c(m_2 - m_1) + c_k m_k}{m} - c.$$

$$c_k = 385 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{dla miedzi}), \quad c = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{dla wody}).$$

### VIII.2 Ciepło parowania wody w temperaturze wrzenia.

1. Włączyć zasilanie płaszcza grzejnego kolby z wodą celem doprowadzenia jej do wrzenia (wytworzenia pary).
2. Wyznaczyć masę  $m_1$  kalorymetru z mieszadłkiem.
3. Do  $2/3$  wysokości kalorymetru nalać wody destylowanej. Wyznaczyć masę  $m_2$  kalorymetru z mieszadłkiem i wodą. Obliczyć  $m_w = m_2 - m_1$ .
4. Zapisywać w tabelce  $j$ ,  $t$  (patrz Uzupełnienia punkt 1) temperaturę wody z dokładnością  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  co 20 sekund przez 5 minut do momentu wpuszczenia pary, potem w przedziale czasu, w którym temperatura osiągnie zakładaną przez nas wartość  $t_2$  (podczas wpuszczania pary), a następnie od tego momentu jeszcze przez 5 minut.



5. Wprowadzić parę wrzącej wody do kalorymetru zanurzając wylot rurki mniej więcej 3 cm poniżej powierzchni wody. Należy mieszać cały czas wodę. Kontynuować przez cały czas pomiary temperatury z punktu 4.
6. Wyznaczyć masę  $m_3$  kalorymetru z mieszadłem, wodą i skroploną parą. Obliczyć  $m = m_3 - m_2$ .
7. Korzystając z tabelki (lub wykresu) odczytać temperaturę początkową  $t_2$  wody z dokładnością do  $0,1^\circ\text{C}$  [ $T_2 = (273 + t_2)$  K].
8. Korzystając z tabelki (lub wykresu) odczytać temperaturę  $t_3$  wody w kalorymetrze po wypuszczeniu pary [ $T_3 = (273 + t_3)$  K].
9. Odczytać z tablic temperaturę  $T_w$  wrzenia wody przy danym ciśnieniu (ciśnienie odczytać na barometrze).
10. Obliczyć poprawkę według wzoru (12) lub graficznie (Uzupełnienia, punkt 2).
11. Obliczyć wartość ciepła parowania  $R$  ze wzoru (7).
12. Obliczyć niepewność  $\Delta R$  wyznaczenia ciepła parowania  $R$ :  $\Delta t_2 = \Delta t_3$  ( $\Delta T_2 = \Delta T_3$ ) zależą tylko od cechowania termometru, niepewności  $\Delta m_1 = \Delta m_2 = \Delta m_3$  od dokładności ważenia.

$$\Delta R = \pm \left( \left| \frac{\partial R}{\partial m_1} \Delta m_1 \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial m_2} \Delta m_2 \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial m_3} \Delta m_3 \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial T_3} \Delta T_3 \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial T_2} \Delta T_2 \right| \right)$$

$$\frac{\partial R}{\partial m_1} = \frac{(c_k - c)(T_3 - T_2)}{m}, \quad \frac{\partial R}{\partial m_2} = \frac{(T_3 - T_2)(cm_3 - cm_1 + c_k m_1)}{(m_3 - m_2)^2}, \quad \frac{\partial R}{\partial T_2} = -\frac{c(m_2 - m_1) + c_k m_1}{m},$$

$$\frac{\partial R}{\partial m_3} = -\frac{[c(m_2 - m_1) + c_k m_1](T_3 - T_2)}{(m_3 - m_2)^2}, \quad \frac{\partial R}{\partial T_3} = \frac{c(m_2 - m_1) + c_k m_1}{m} + c.$$

## IX. Uzupełnienia

### 1. Zasada pomiaru poprawki na wymianę energii cieplnej między kalorymetrem i otoczeniem.

- Notować temperaturę w odstępach co 20 s przez 5 minut – **przedział wstępny**.
- Następnie od chwili wrzucenia lodu do kalorymetru lub od chwili rozpoczęcia wpuszczenia pary wodnej zapisywać temperaturę co 20 s do osiągnięcia ekstremalnej temperatury (mniej więcej przez 2 minuty) – **przedział główny**
- Po osiągnięciu najniższej temperatury (ciepło topnienia lodu) lub najwyższej temperatury (ciepło parowania wody) zapisy prowadzić jeszcze przez 5 minut – **przedział końcowy**.
- Wyniki zapisać w tabelach 1, 2, 3.
- Zanotować temperaturę  $\vartheta$  otoczenia (pomieszczenia).
- Sporządzić na podstawie tab. 1, 2, 3 wykres temperatury w funkcji czasu (rys.3).
- Obliczyć współczynnik A według wzoru (10).
- Obliczyć skorygowaną temperaturę według wzoru (12).

Tabela 1

$\tau$ [min]	0	1	2	3	4	5	Koniec przedziału wstępnego										
j[20s]	-15	-14	-13	-12	-11	-10		-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
t [°C]																	

Tabela 2

$\tau$ [min]	5	6	7	Koniec przedziału głównego				
j[20s]	0	1	2		3	4	5	6
t [°C]								

Tabela 3

$\tau$ [min]	7	8	9	10	11	12	Koniec pomiarów										
j[20s]	6	7	8	9	10	11		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
t [°C]																	

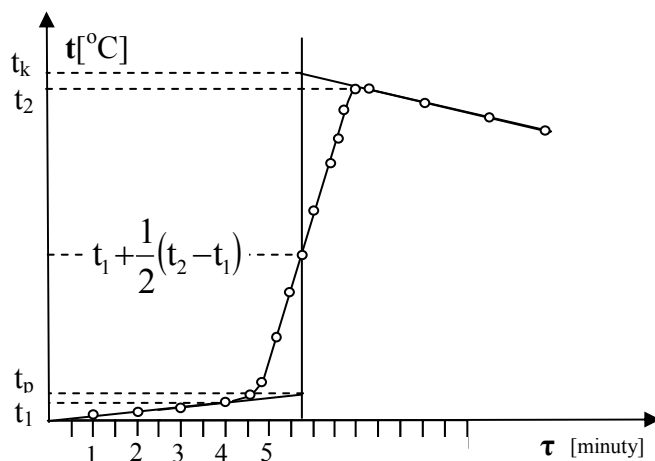
$\tau$  – czas mierzony w minutach

j – liczba 20 -sekundowych (lub 30s) jednostek czasu liczonych od początku przedziału głównego

t – temperatura wody w kalorymetrze.

Poprawka ma wartość dodatnią lub ujemną, ale nie zmieniając jej znaku należy ją dodać do ekstremalnej zanotowanej temperatury (niezależnie czy jest wyższa od  $\vartheta$  czy niższa). Gdy temperatura kalorymetru wzrasta w przedziale głównym (skraplanie pary wodnej) poprawka jest dodatnia. Gdy temperatura kalorymetru opada w przedziale głównym (topnienie lodu) poprawka jest ujemna.

### 2. Graficzna poprawka temperatury początkowej i końcowej



Rys.4 Wykres temperatury w funkcji czasu.

Prawdziwe temperatury: początkowa  $t_p$  i końcowa  $t_k$  wody otrzymuje się znajdując punkty przecięcia stycznych wykreślonych do początkowej i końcowej części wykresu z prostą wykreśloną prostopadle do osi czasu, odpowiadającej chwili  $\tau$ , w której zmiana temperatury osiąga połowę swej maksymalnej wartości w procesie wymiany energii cieplnej:

$$\frac{(t_2 - t_1)}{2} \quad (13)$$

$t_1$  – temperatura odczytana tuż przed wymianą energii cieplnej w kalorymetrze

$t_2$  – temperatura odczytana tuż po wymianie energii cieplnej w kalorymetrze.

### Przeprowadzenie pomiarów

1. Mierzyć temperaturę co 1 minutę przez 5 – 10 minut przed wrzuceniem do naczynia badanego ciała
2. Mierzyć temperaturę co 10 lub 15 s po wrzuceniu ciała (mieszając wodę).
3. Mierzyć temperaturę co 1 minutę przez 5 – 10 minut po osiągnięciu przez wodę temperatury ekstremalnej.
4. Sporządzić wykres temperatury w funkcji czasu, obliczyć wartość (13) i na podstawie wykresu znaleźć  $t_p$  i  $t_k$ .

### 3. Uzupelnienie teorii do poprawki na wymianę energii cieplnej między kalorymetrem i otoczeniem.

Przeprowadzanie pomiarów temperatury w przedziale wstępnym daje możliwość wyeliminowania wartości  $\vartheta$ .

Mając odcinek odpowiadający dziesięciu jednostkom czasu można napisać

$$\frac{(t_{-10} - t_0)}{10} = A \left( \frac{t_{-10} + t_0}{2} - \vartheta \right) \quad (14)$$

Dodając stronami równania (9) i (14) mamy

$$A = \frac{1}{5} \frac{(t_j - t_{j+10}) - (t_{-10} - t_0)}{(t_j + t_{j+10}) - (t_{-10} + t_0)} \quad (15)$$

Z równania (9) i (15) można również obliczyć  $\vartheta$ .