C4. Wyznaczanie ciepła parowania wody metodą kalorymetryczną

***Celem ćwiczenia** jest poznanie procesów parowania i wrzenia, przemian fazowych, ciepła przemiany, zasady bilansu cieplnego oraz doświadczalne wyznaczenie ciepła parowania wody przy użyciu kalorymetru.*

Parowaniem nazywamy proces powstawania pary na powierzchni swobodnej cieczy. Zachodzi on w każdej temperaturze, a jego intensywność rośnie wraz z jej wzrostem.
Parowanie polega na tym, że – w warstwie powierzchniowej cieczy – istnieją cząsteczki, które, mając dużą energię kinetyczną, opuszczają powierzchnię cieczy, obniżając jej temperaturę. ***Szybkość parowania*** – to ilość cieczy przechodzącej w stan pary w jednostce czasu. Zależy ona od powierzchni swobodnej cieczy, od ciśnienia pary nad tą powierzchnią oraz od ciśnienia atmosferycznego.
Wrzeniem nazywamy intensywne parowanie cieczy, zachodzące, nie tylko na powierzchni, ale w całej objętości cieczy, gdzie odbywa się ono do wnętrza pęcherzyków pary. Para ta, będąc w równowadze termodynamicznej z cieczą**, jest parą nasyconą**, a ciśnienie jej zależy wyłącznie od **temperatury.** Wrzenie cieczy odbywa się w takiej temperaturze, przy której ciśnienie ***pary nasyconej* wewnątrz pęcherzyków** jest w przybliżeniu równe **zewnętrznemu ciśnieniu atmosferycznemu.** Zwiększają one wtedy swoją objętość i wypływają na powierzchnię, gdzie pękają, a zawarta w nich para wydobywa się nad powierzchnię cieczy*.

Temperaturę tę nazywamy ***temperaturą wrzenia*** (lub punktem wrzenia).

*Stąd wynika *zależność temperatury wrzenia cieczy od ciśnienia atmosferycznego*: im niższe ciśnienie, tym niższa jest temperatura wrzenia.

Podczas wrzenia – mimo dostarczania ciepła – temperatura cieczy jest stała, przy stałym ciśnieniu. Dostarczane ciepło jest zużywane na ***zmianę stanu skupienia ciała***, na przejście ze stanu ciekłego w gazowy lub inaczej, z fazy ciekłej do gazowej. Jest to tzw. ***przemiana fazowa I rodzaju.*** Aby mogła ona zajść, konieczne jest doprowadzenie do układu (w przypadku wrzenia) lub odprowadzenie z tego układu (w przypadku skraplania się pary) ***ciepła przemiany fazowej*** $\boldsymbol{r_Q}$, zwanego ***ciepłem parowania*** (lub *skraplania*).

Ciepło parowania $\boldsymbol{r_Q}$ to ilość c*iepła potrzebna do wyparowania 1 kg cieczy w temperaturze wrzenia***:* $r_Q = \frac{Q}{m} \quad \left[\frac{J}{kg}\right]$. Analogiczna wielkość odniesiona do 1 mola nazywa się ***molowym ciepłem parowania*** $\boldsymbol{r_\mu}$ $\left[\frac{J}{mol}\right]$.

***Ciepło parowania, które - inaczej sformułowane - oznacza ilość ciepła potrzebną do zamiany 1 kg cieczy w parę o tej samej temperaturze, zużywane jest w każdej temperaturze, gdyż parowanie, czyli zmiana stanu skupienia, zachodzi na powierzchni cieczy w każdej temperaturze. Jednak pomiar ciepła parowania* r_Q *w dowolnej temperaturze jest bardzo skomplikowany ze względu na to, że w strumieniu ciepła przeznaczonym na ogrzewanie cieczy trudno jest wydzielić część ciepła zużywaną tylko na podwyższenie temperatury od tej części, która jest potrzebna na zmianę stanu skupienia. Z tego względu pomiar ciepła parowania przeprowadza się w stałej temperaturze wrzenia, w której – ciepło doprowadzone do cieczy – zużywane jest tylko na zamianę cieczy w parę.*

W niniejszym ćwiczeniu wyznaczamy ciepło parowania wody ***metodą kalorymetryczną***, czyli przy użyciu ***kalorymetru.*** Korzystamy z ***zasady bilansu cieplnego,*** która mówi, że:

w układzie izolowanym ciała o wyższej temperaturze tracą taką ilość ciepła, jaką zyskują ciała o niższej temperaturze.

Do kalorymetru o masie m_k i ***cieple właściwym*** c_k, zawierającego m_w wody o cieple właściwym c_w i temperaturze pokojowej t_p, wprowadzamy parę wodną o masie m_p i temperaturze wrzenia t_w. Po wymianie ciepła ustala się temperatura końcowa t_k układu, odpowiadająca stanowi równowagi termodynamicznej. Zgodnie z zasadą bilansu cieplnego:

ciepło oddane przez parę w procesie skraplania: $Q_1 = m_p \cdot r_Q$ i przez wodę powstałą z pary, podczas jej ochładzania do temperatury końcowej: $Q_2 = m_p \cdot c_w (t_w - t_k)$ ***jest równe ciepłu pobranemu*** przez kalorymetr : $Q_3 = m_k c_k (t_k - t_p)$ i wodę o masie m_w: $Q_4 = m_w c_w (t_k - t_p)$.

Czyli: $Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$, a więc: $m_p \cdot r_Q + m_p \cdot c_w (t_w - t_k) = m_k c_k (t_k - t_p) + m_w c_w (t_k - t_p)$.

Stąd otrzymujemy wyrażenie na ciepło parowania wody:

$$r_Q = \frac{(m_k c_k + m_w c_w)(t_k - t_p)}{m_p} - c_w (t_w - t_k)$$

Literatura uzupełniająca:

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker - Podstawy fizyki – T.2 rozdz.19
2. P.G. Hewitt – Fizyka wokół nas – rozdz. 16

Zobacz też:

symulacje komputerowe na stronie internetowej *Katedry Fizyki i Biofizyki* (**https://sparrow.up.poznan.pl/kfb/**) (zakładka: *Symulacje zjawisk fizycznych*).

C4. Protokół pomiarów i obliczeń

Nr pary	Imię i nazwisko studenta	Wydział grupa
data	Imię i nazwisko prowadzącego	Zaliczenie

Wykonanie ćwiczenia

Przyrządy: kalorymetr z wężownicą, kolba z przewodem doprowadzającym parę wodną, waga laboratoryjna, termometr, elektryczny płaszcz grzejny

1. Ważymy wewnętrzne naczynie kalorymetru wraz z wężownicą i mieszadełkiem (m_k).
2. Do wewnętrznego naczynia kalorymetrycznego wlewamy wodę destylowaną w takiej ilości, aby wężownica była całkowicie zakryta i ponownie wyznaczamy masę tego układu (m_{kw}). Z różnicy mas $(m_{kw} - m_k)$ obliczamy masę (m_w) wody w kalorymetrze.
3. Zamknięte naczynie kalorymetryczne umieszczamy w obudowie kalorymetru. Całość nakrywamy osłonami izolacyjnymi i ustawiamy na podwyższeniu, które umożliwia w dalszej części ćwiczenia, podłączenie przewodu doprowadzającego parę wodną do wlotu wężownicy. Kalorymetr odsuwamy od piecyka elektrycznego.
4. Do wnętrza naczynia kalorymetrycznego z wodą, przez otwór w przykrywce, wprowadzamy termometr, który pozostaje tam przez cały czas trwania eksperymentu.
5. Mierzymy temperaturę początkową (t_p) wody w kalorymetrze.
6. Szklaną kolbę, znajdującą się w płaszczu grzejnym piecyka elektrycznego, wypełniamy do połowy wodą i zamykamy korkiem zaopatrzonym w przewód wyprowadzający z kolby parę wodną. Pod wylot przewodu podsuwamy naczynie na kapiącą wodę. Włączamy piecyk do sieci i podgrzewamy wodę, doprowadzając ją do wrzenia.
7. Przewód z parą wodną podłączamy do wężownicy kalorymetru dopiero wtedy, gdy zostanie on ogrzany do temperatury wrzenia wody, tzn. wówczas, gdy na jego końcu przestają pojawiać się krople wody. W tym celu kalorymetr, chwilowo odsunięty od piecyka, przesuwamy w miejsce umożliwiające podłączenie przewodu.
8. Mieszając wodę w kalorymetrze za pomocą mieszadełka, obserwujemy wzrost temperatury panującej wewnątrz układu. Gdy temperatura wzrośnie o około 5°C przerywamy dopływ pary wodnej przez odłączenie przewodu doprowadzającego ją do wężownicy kalorymetru.
9. Mieszamy dalej wodę w kalorymetrze, aż do momentu, gdy temperatura układu zacznie opadać. Najwyższą zaobserwowaną temperaturę przyjmujemy jako temperaturę końcową układu (t_k).
10. Wyjmujemy termometr z kalorymetru i wyznaczamy masę (m_{kwp}) wewnętrznego naczynia kalorymetrycznego wraz z wężownicą, mieszadłem oraz wodą (pierwotnie przez nas wlaną oraz powstałą ze skroplonej pary). Z różnicy mas $(m_{kwp} - m_{kw})$ obliczamy masę (m_p) skroplonej pary wodnej.
11. Odczytujemy na barometrze wartość ciśnienia atmosferycznego i znajdujemy w tablicach odpowiadającą mu temperaturę wrzenia wody (t_w), przyjmując, że jest to temperatura skraplania oraz temperatura początkowa wody powstałej ze skroplenia pary wodnej.

Tabela

masa kalorymetru m_k [kg]	masa kalorymetru z wodą m_{kw} [kg]	masa wody m_w [kg]	masa kal. z wodą i parą wodną m_{kwp} [kg]	masa pary wodnej m_p [kg]	temperatura		
					początkowa t_p [°C]	wrzenia t_w [°C]	końcowa t_k [°C]

$\Delta m_k = \Delta m_{kw} = \Delta m_{kwp} =$……. [kg] $\Delta t_p = \Delta t_k =$……. [°C]

$\Delta m_w = \Delta m_{kw} + \Delta m_k =$……... [kg] $\Delta m_p = \Delta m_{kwp} + \Delta m_{kw} =$……... [kg]

Ciepło parowania $r_Q \left[\frac{kJ}{kg}\right] =$		Zestawienie $(r_Q \pm \Delta r_Q)\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
Błąd ciepła parowania $\Delta r_Q \left[\frac{kJ}{kg}\right] =$		
Molowe ciepło parowania $r_\mu \left[\frac{kJ}{mol}\right] =$		Zestawienie $(r_\mu \pm \Delta r_\mu)\left[\frac{kJ}{mol}\right]$
Błąd mol. ciepła parowania $\Delta r_\mu \left[\frac{kJ}{mol}\right] =$		

Opracowanie wyników

1. Wyniki pomiarów podstawiamy do wzoru:

$$r_Q = \frac{(m_k c_k + m_w c_w)(t_k - t_p)}{m_p} - c_w (t_w - t_k)$$

i obliczamy ciepło parowania (r_Q) wody. Przyjmujemy: ciepło właściwe kalorymetru (mosiądz) $c_k = 0{,}385 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$ oraz ciepło właściwe wody $c_w = 4{,}19 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$.

2. Mając obliczone ciepło parowania wody r_Q wyznaczamy następnie molowe ciepło parowania wody: $r_\mu = \mu \cdot r_Q$, gdzie masa cząsteczkowa $\mu = 0{,}018$ kg mol^{-1}.

3. Błąd pomiarowy (Δr_Q) dla uzyskanej wartości ciepła parowania wody obliczamy metodą różniczki zupełnej, prowadzącej do zależności:

$$\Delta r_Q = \left|\frac{c_k (t_k - t_p)}{m_p}\right| \Delta m_k + \left|\frac{c_w (t_k - t_p)}{m_p}\right| \Delta m_w +$$

$$+ \left|-\frac{(c_k m_k + c_w m_w)(t_k - t_p)}{m_p^{\,2}}\right| \Delta m_p + \left|-\frac{(c_k m_k + c_w m_w)}{m_p}\right| \Delta t_p +$$

$$+ \left|\frac{(c_k m_k + c_w m_w)}{m_p} + c_w\right| \Delta t_k$$

4. Błąd pomiarowy (Δr_μ) dla uzyskanej wartości molowego ciepła parowania obliczamy metodą różniczki logarytmicznej zgodnie z poniższym wzorem:

$$\frac{\Delta r_\mu}{r_\mu} = \frac{\Delta r_Q}{r_Q} \qquad \text{stąd:} \qquad \Delta r_\mu = r_\mu \frac{\Delta r_Q}{r_Q} \ .$$

5. Otrzymane wyniki zestawiamy w postaci: $(r_Q \pm \Delta r_Q)\,jedn.SI$ oraz $(r_\mu \pm \Delta r_\mu)\,jedn.SI$.