



## Ćwiczenie 22

### A. Wyznaczanie wilgotności względnej powietrza metodą psychrometru Assmanna (lub Augusta)

### B. Wyznaczanie wilgotności bezwzględnej i względnej powietrza metodą punktu rosy (higrometru Alluarda)

Krzysztof Rębilas

#### PAROWANIE. PARA NASYCONA

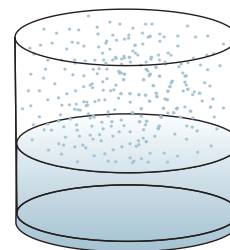
Przemiana fazowa zwana **parowaniem** to przemiana cieczy w gaz. Parowanie polega na odrywaniu się od powierzchni cieczy cząsteczek o największych energiach kinetycznych na tyle dużych, aby pokonać siły przyciągania międzycząsteczkowego (siły van der Waalsa) panujące w cieczy. Ponieważ poprzez parowanie ciecz opuszczają cząsteczki o najwyższych energiach, więc jeśli podczas parowania nie zostanie do cieczy doprowadzone z zewnątrz ciepło, ciecz parująca ochładza się.

Ciecze parują w każdej temperaturze i przy każdym ciśnieniu, ale szybkość parowania wzrasta ze wzrostem temperatury (rośnie bowiem wtedy energia kinetyczna cząsteczek będących w cieczy), a także wzrasta wraz z obniżeniem ciśnienia. Dlatego przepływ powietrza nad powierzchnią parującą zwiększa szybkość parowania - poruszające się powietrze porywa cząsteczki fazy ciekłej i odprowadza je znad powierzchni parującej obniżając nieco ciśnienie nad powierzchnią parującą, poprawiając w ten sposób warunki parowania. Także oczywistym jest, że szybkość parowania jest proporcjonalna do wielkości parującej powierzchni oraz zależy od sił oddziaływania międzycząsteczkowego, czyli od rodzaju cieczy.

Cząsteczki cieczy wyparowane w przestrzeń ponad powierzchnią cieczy ulegają zderzeniom, zmieniają kierunek ruchu i mogą powrócić do cieczy, którą wcześniej opuściły. Z tego względu parowanie może zachodzić w trojaki sposób:

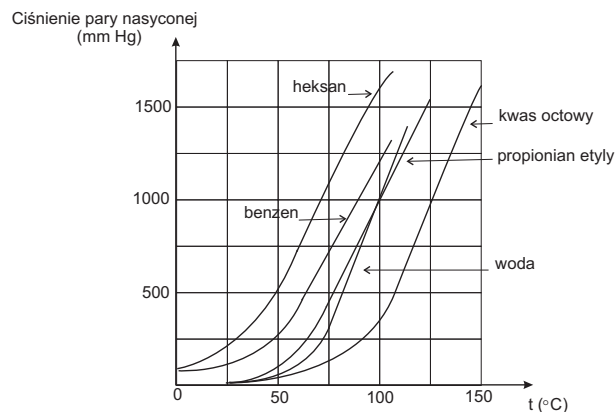
1. **Parowanie** prowadzące do wzrostu ilości pary ponad powierzchnią cieczy - wtedy z cieczy wychodzi więcej cząsteczek niż do niej wraca.
2. **Skraplanie** (kondensacja) - więcej cząsteczek powraca do cieczy niż z niej wyparowuje.
3. **Stan równowagi fazowej** (stan nasycenia) - ilość wyparowujących cząsteczek jest taka sama jak ilość powracających do cieczy.

Jeżeli parowanie cieczy odbywa się w przestrzeni zamkniętej, wypełnionej częściowo cieczą parującą, to zostaje wkrótce osiągnięty stan równowagi fazowej. Znaj-



Rysunek 1. Nad powierzchnią cieczy w zamkniętym pojemniku powstaje para nasycona.

dująca się wtedy w naczyniu para jest w równowadze fazowej ze swoją cieczą i nazywana jest **parą nasyconą**. W danej temperaturze para nasycona jest parą o *maksymalnym możliwym ciśnieniu*. To znaczy, ciśnienie pary nienasyconej (czyli nie będącej w równowadze ze swą cieczą) jest w danej temperaturze zawsze niższe niż ciśnienie pary nasyconej. Obecność gazów obojętnych względem cieczy nad powierzchnią cieczy nie wpływa na ciśnienie pary tej cieczy. Przestrzeń zamknięta nad cieczą zostaje w każdym przypadku nasycona parą tak jakby była całkiem pusta, co jest słuszne gdy prężność gazów jest względnie mała.



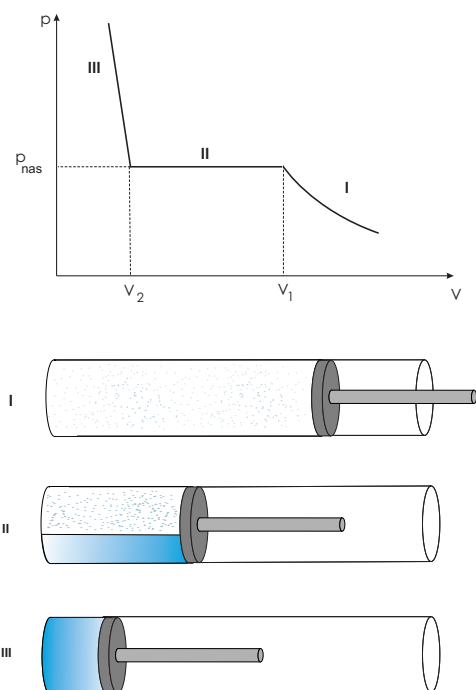
Rysunek 2. Ciśnienie pary nasyconej kilku cieczy w funkcji temperatury.

Zależność ciśnienia (prężności) pary nasyconej od temperatury jest dla wszystkich cieczy podobna. Najmniejsza prężność pary nasyconej występuje w temperaturze krzepnięcia. W miarę podwyższania temperatury prężność pary nasyconej rośnie wykładniczo (Rys. 2) i osiąga wartość maksymalną w temperaturze krytycznej (por. rozdział następny).

### PRZEMIANY PARY NIENASYCONEJ I NASYCONEJ

Parę nasyconą można otrzymać nie tylko poprzez proces parowania cieczy w zamkniętym naczyniu. Mając do dyspozycji jedynie parę nienasyconą można uzyskać parę nasyconą w trojaki sposób.

1. *Izotermiczne sprężanie* czyli zmniejszanie objętości pary nienasyconej w stałej temperaturze. Początkowo (faza I na Rys. 3) podczas zmniejszania objętości ciśnienie pa-



Rysunek 3. Zależność ciśnienia od objętości przy izotermicznym sprężaniu: (I) pary nienasyconej, (II) pary nasyconej, (III) cieczy.

ry nienasyconej *rośnie* i dla stosunkowo niedużych ciśnień przemiana zachodzi zgodnie z równaniem Clapeyrona:

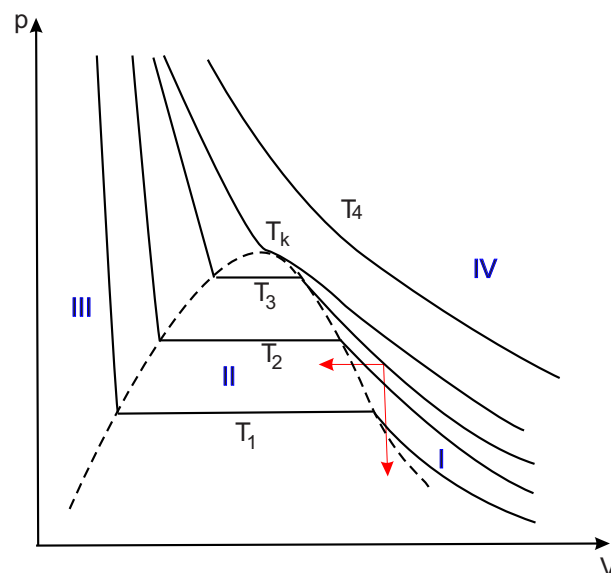
$$pV = \frac{m}{\mu}RT, \quad (1)$$

gdzie:  $p$  - ciśnienie (prężność) pary,  $V$  - objętość,  $m$  masa pary zawartej w objętości  $V$ ,  $\mu$  - masa molowa pary (dla wody  $\mu = 18$  g/mol),  $R$  - stała gazowa,  $T$  - temperatura wyrażona w skali Kelvina. Wzrost ciśnienia pary nienasyconej kończy się w momencie, gdy uzyskane ciśnienie jest

równe ciśnieniu pary nasyconej w danej temperaturze. Para nienasycona staje się więc parą nasyconą. Dalsze zmniejszanie objętości (wciąż w stałej temperaturze) nie prowadzi do wzrostu ciśnienia pary (faza II na Rys. 3), bowiem mamy już do czynienia z parą nasyconą, czyli parą o maksymalnym możliwym ciśnieniu w danej temperaturze. Zmniejszanie objętości pary nasyconej skutkuje tym, że część masy pary zostaje skroplona na ściankach naczynia. Dzieje się tak aż do momentu całkowitego skroplenia pary. Gdy w zbiorniku zostanie jedynie ciecz, dalsze zmniejszanie objętości polega już na sprężaniu cieczy, co wiąże się z gwałtownym wzrostem ciśnienia (faza III na Rys. 3).

Gdybyśmy podczas fazy II odwrócili proces i zaczęli zwiększać objętość pary nasyconej, wówczas spowoduje to wyparowanie pewnej masy cieczy bez obniżenia ciśnienia pary nasyconej.

Przedstawiona na Rys. 3 zależność  $p(V)$  sporządzona dla  $T = \text{const}$  nosi nazwę **izotermy pary**. Na Rys. 4 pokazano izotermy pary obrazujące opisany powyżej proces izotermicznego sprężania przeprowadzony w coraz wyższych temperaturach ( $T_3 > T_2 > T_1$ ). Im wyższa jest



Rysunek 4. Izotermy pary dla różnych temperatur.

temperatura tym wyżej położona jest izoterma. Ciśnienie pary nasyconej wzrasta, a długość odcinka poziomego maleje - maleje więc objętość pary nasyconej (rośnie objętość cieczy powstałej ze skroplenia pary nasyconej).

W pewnej temperaturze objętość i gęstość pary nasyconej staje się równa objętości i gęstości cieczy. Odcinek poziomy izotermy redukuje się do punktu. Temperatura w której to zachodzi jest to **temperatura krytyczna**  $T_k$ . Jest to górna granica zakresu temperatur, w których substancja może występować w stanie ciekłym. Ciśnienie pary nasyconej w tej temperaturze nazywamy **ciśnieniem krytycznym**. Izoterma przechodząca przez punkt

krytyczny nazywa się izotermą krytyczną. W temperaturach wyższych od krytycznej prężność fazy gazowej może być dowolnie duża (np. izoterma dla temperatury  $T_4$  na Rys. 4).

Jeżeli połączymy krzywą przerywaną końce odcinków poziomych poszczególnych izoterm płaszczyzna wykresu zostanie podzielona na cztery obszary:

I - obszar istnienia pary nienasyconej (ograniczony od góry izotermą krytyczną),

II - obszar współistnienia pary nasyconej i cieczy,

III - obszar istnienia cieczy,

IV - obszar fazy lotnej (od izoterm krytycznej w górę).

W temperaturach niższych od temperatury krytycznej energia wewnętrzna cieczy powstającej ze skroplenia pary jest niższa od energii wewnętrznej pary. Podczas skraplania układ ciecz-para nasycona musi kontaktować się termicznie z otoczeniem, któremu nadmiar energii przekazuje. Ilość ciepła oddanego przy skraplaniu jednostki masy pary nasyconej jest to **ciepło skraplania**.

Ciepło skraplania (a również ciepło parowania) jest tym mniejsze im temperatura w której zachodzi jest bliższa temperaturze krytycznej. W temperaturze krytycznej  $T_k$  i pod ciśnieniem krytycznym ciepło skraplania pary nasyconej i ciepło parowania cieczy są równe zeru (energje wewnętrzne jednostki masy cieczy i pary są sobie równe).

2. Kolejnym sposobem uzyskania pary nasyconej z nienasyconej jest *izochoryczne ochładzanie*, czyli zmniejszanie temperatury pary nienasyconej w stałej objętości. Proces ten reprezentuje strzałka pionowa na Rys. 4, która prowadzi od obszaru I pary nienasyconej do obszaru II (poniżej linii przerywanej), gdzie para jest w stanie nasycenia.

3. Trzecim sposobem jest *izobaryczne ochładzanie*, czyli zmniejszanie temperatury pary nienasyconej w stałym ciśnieniu. Na Rys. 4 proces ten zobrazowano strzałką poziomą, która pokazuje przejście od obszaru I pary nienasyconej do obszaru II pary nasyconej.

Temperaturę, w której ochładzana para staje się parą nasyconą nazywamy **temperaturą punktu rosy**. Na Rys. 4 jest to temperatura odpowiadająca punktowi przecięcia strzałek z linią przerywaną zamykającą obszar II pary nasyconej. Jeśli będziemy dalej izobarycznie zmniejszać temperaturę powstałej pary nasyconej, zmniejszać się będzie jej objętość, a część pary zacznie się skraplać na ściankach naczynia. Podobnie dla ochładzania izochorycznego, zmniejszanie temperatury pary nasyconej prowadzi do zmniejszenia jej ciśnienia, któremu towarzyszy skraplanie pary.

## WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA I WZGLĘDNA POWIETRZA

Wśród par różnych cieczy szczególną rolę odgrywa para wodna w atmosferze ziemskiej. Nie trudno wyjaśnić skąd się ona bierze - parują wszelkie naturalne zbiorniki wodne, rzeki, jeziora, oceany, sztuczne akweny. W przyrodzie zauważamy naturalny obieg wody, który także dostarcza lokalnie wilgoci w postaci szronu, rosy, deszczu, gradu, śniegu. Ze względu na zdolność pochłaniania promieniowania cieplnego emitowanego z Ziemi zapobiega ona zbytniemu oziębianiu się Ziemi w okresach nocnych.

Zawartość pary wodnej w powietrzu określa się za pomocą pojęcia wilgotności.

**Wilgotność bezwzględna** to gęstość  $\rho$  pary wodnej w powietrzu, czyli masa pary zawarta w jednostce objętości powietrza:

$$W_b \equiv \rho = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

gdzie  $m$  oznacza masę pary znajdującej się w objętości  $V$ . Wilgotność bezwzględną wyrażamy najczęściej w  $\text{g/m}^3$ .

Wykorzystując równanie Clapeyrona (1) możemy obliczyć gęstość pary wodnej zakładając, że znamy jej ciśnienie  $p$  (ciśnienie pary wodnej zawartej w powietrzu jest jedynie pewnym ułamkiem całkowitego ciśnienia atmosferycznego; pomiar  $p$  omówiony jest niżej). Dla pary wodnej masa molowa wynosi  $\mu = 18 \text{ g/mol}$ . Temperaturę  $T$  w skali Kelvina stojącą w równaniu Clapeyrona wyrazimy poprzez temperaturę  $t$  w stopniach Celsjusza:  $T = 273 + t$ . Stała gazowa  $R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ . Po przekształceniu równania Clapeyrona (1) otrzymujemy następujące wyrażenie na gęstość pary:

$$\rho = \frac{\mu}{R} \frac{p}{273 + t}, \quad (3)$$

co po podstawieniu wartości liczbowych daje:

$$\rho = 2165 \frac{p}{273 + t} \left[ \text{g/m}^3 \right]. \quad (4)$$

W powyższym wzorze ciśnienie pary  $p$  należy podstawić w kilopaskalach [kPa].

**Wilgotność względna** określana jest jako stosunek ciśnienia  $p$  pary wodnej zawartej w powietrzu do ciśnienia pary nasyconej  $p_{\text{nas}}$  mającej tę samą temperaturę, jaka panuje w powietrzu. Najczęściej podawana jest w procentach:

$$W = \frac{p}{p_{\text{nas}}} \quad \text{lub} \quad W = \frac{p}{p_{\text{nas}}} 100\%. \quad (5)$$

Para wodna znajdująca się w powietrzu ma stosunkowo nieduże ciśnienie, dlatego można do niej stosować z dobrym przybliżeniem równanie Clapeyrona (1). Na jego podstawie widzimy, że ciśnienie jest proporcjonalne do

gęstości ( $p = \rho RT/\mu$ ), więc wilgotność względną można wyrazić również poprzez stosunek gęstości pary  $\rho$  znajdującej się w powietrzu do gęstości pary nasyconej  $\rho_{\text{nas}}$  mającej temperaturę powietrza:  $W = \rho/\rho_{\text{nas}}$ .

W praktyce najczęściej posługujemy się pojęciem wilgotności *względnej*, bowiem informuje nas ona o tym, na ile para wodna znajdująca się aktualnie w powietrzu różni się od pary, która nasycałaby powietrze w tej samej temperaturze. Ma to znaczenie o tyle, że wskazuje jaka jest szybkość parowania wody w danych warunkach. Im większa jest różnica między ciśnieniem (gęstością) pary będącej w powietrzu a ciśnieniem (gęstością) pary nasyconej w tej samej temperaturze, tym większa jest szybkość parowania. W zimie, kiedy temperatura powietrza jest niska, już niewielka ilość pary wodnej nasyca powietrze (jest wtedy zatem zwykle duża wilgotność względna) i mokre ciała schną bardzo powoli. W lecie, w gorącym powietrzu, może znajdować się znacznie większa ilość pary, która jednak w tych warunkach nie nasyca powietrza (mała wilgotność względna) i wobec tego ciała mokre schną szybko. W szczególności parowanie z powierzchni skóry czy też powierzchni liści roślin zależy od wilgotności względnej. Za najkorzystniejszą dla człowieka wilgotność organizmu uznaje się wilgotność względną około 60 %, a dopuszczalną dla prawidłowego funkcjonowania organizmu wilgotność względną w zakresie 40-70 %. Powietrze suche wywołuje zbyt szybkie parowanie skóry i przez to gwałtowne uczucie pragnienia. Ponieważ podczas parowania pochłaniane jest z otoczenia ciepło, parowanie pozwala na ochłodzenie organizmu. W powietrzu bardzo wilgotnym parowanie odbywa się zbyt wolno i odczuwa się duszące uczucie upału. Dlatego w warunkach tropikalnych, gdzie wilgotność względna sięga 100 %, upały są szczególnie dokuczliwe.

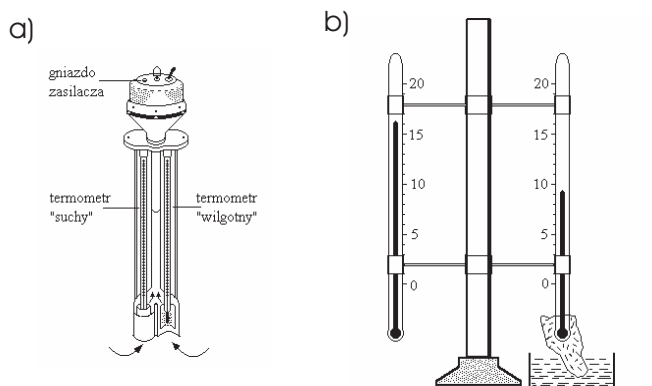
Zbytne zawilgocenie pomieszczeń może być przyczyną chorób gośćcowych (lub przeziębieniowych), które prowadzą do niebezpiecznych stanów przewlekłych w układzie stawowo- ruchowym i oddechowym (nieżyty). Wilgotność powietrza ma istotny wpływ na przebieg wielu reakcji chemicznych i procesów życiowych. Na wielu produktach żywnościowych, wielu lekarstwach znajdujemy napisy "przechowywać w suchym i chłodnym miejscu" bowiem duża zawartość pary wodnej w powietrzu sprzyja rozwojowi bakterii, pleśni, przyspiesza reakcje utleniania, korozję metali.

#### A. WYZNACZANIE WILGOTNOŚCI WZGLĘDNEJ POWIETRZA METODĄ PSYCHROMETRU ASSMANNA (LUB AUGUSTA)

##### Zasada pomiaru

W celu wyznaczenia prężności pary wodnej nienasyconej zawartej w powietrzu wykorzystuje się psychrometr

Assmanna (bardziej pierwotny to psychrometr Augusta) - Rys. 5. Psychrometr jest układem dwóch identycznych



Rysunek 5. a) Psychrometr Assmanna. b) Psychrometr Augusta.

termometrów rtęciowych, z których jeden, oznaczony kolorem niebieskim, posiada zbiornik z rtęcią owinięty tkaniną nasyconą wodą destylowaną. Drugi termometr jest suchy. Uruchamiając wentylator (w pokrywie psychrometru Assmanna) zwiększa się szybkość parowania wody z tkaniny termometru "wilgotnego". Parowanie wody odbywa się przy pobieraniu ciepła z najbliższego otoczenia, a więc temperatura tkaniny z parującą wodą oraz owiniętego nią termometru obniża się. Wskazania termometrów po pewnym czasie ustalają się i wówczas można odczytać temperaturę każdego z nich: suchego  $t_s$  i wilgotnego  $t_w$ . Zwykle  $t_s > t_w$ . Pytanie: w jakiej sytuacji temperatura termometru wilgotnego będzie taka sama jak suchego?

Na drodze półempirycznej znaleziono wzór dający możliwość obliczenia ciśnienia  $p$  pary zawartej w powietrzu na podstawie znajomości temperatur wskazywanych przez termometry suchy ( $t_s$ ) i wilgotny ( $t_w$ ):

$$p = p_w - kp_a(t_s - t_w), \quad (6)$$

gdzie:  $p_w$  to ciśnienie pary nasyconej w temperaturze  $t_w$  wskazywanej przez termometr wilgotny,  $p_a$  - ciśnienie atmosferyczne, które należy odczytać z barometru,  $k$  - to stała zależna od typu psychrometru.

Mając wyznaczone doświadczalnie  $t_s$  i  $t_w$  oraz ciśnienie atmosferyczne  $p_a$  wyrażone w kilopaskalach (kPa) można wyliczyć z podanego wzoru (6) szukane ciśnienie pary nienasyconej  $p$  zawartej w powietrzu, a następnie obliczyć wilgotność względną według wzoru (5). Wartość prężności pary wodnej nasyconej  $p_w$  w temperaturze  $t_w$  oraz ciśnienie pary wodnej nasyconej  $p_{\text{nas}}$  w temperaturze otoczenia  $t_s$  można odczytać z Tabeli 1.

**Tabela 1:**  
Zależność ciśnienia pary wodnej nasyconej  $p_{\text{nas}}$  od temperatury  $t$ .

t(°C)	$p_{\text{nas}}$ (kPa)	t(°C)	$p_{\text{nas}}$ (kPa)	t(°C)	$p_{\text{nas}}$ (kPa)
1	0,66	11	1,31	21	2,49
2	0,71	12	1,40	22	2,69
3	0,76	13	1,50	23	2,81
4	0,81	14	1,60	24	2,98
5	0,87	15	1,71	25	3,17
6	0,93	16	1,82	26	3,36
7	1,00	17	1,94	27	3,57
8	1,07	18	2,06	28	3,75
9	1,15	19	2,20	29	4,01
10	1,23	20	2,34	30	4,24

Inną możliwością znalezienia  $p_w$  i  $p_{\text{nas}}$  jest zastosowanie wielomianu określającego zależność ciśnienia pary nasyconej od temperatury  $t$  w zakresie 0 - 30 °C:

$$p_{\text{nas}}(t) = at^3 + bt^2 + ct + d, \quad (7)$$

gdzie współczynniki występujące w wielomianie mają wartość:

$$a = 0,0000508 \text{ kPa/deg}^3,$$

$$b = 0,000904 \text{ kPa/deg}^2,$$

$$c = 0,0483 \text{ kPa/deg},$$

$$d = 0,604 \text{ kPa}.$$

### Wykonanie ćwiczenia

1. Wyjąć psychrometr Assmanna z pudła, ujmując go tylko za rączkę i zawiesić na statywie. Probówkę z polietylenu znajdującą się w pudle napełnić wodą destylowaną i założyć na zbiorniczek termometru oznaczonego kolorem niebieskim. Odczekać kilkanaście sekund. Zbiorniczek z rżniętą tego termometru (zwanego tu wilgotnym) jest owinięty tkaniną, która nasyci się wodą.

2. Zdjąć probówkę z wodą z termometru, podłączyć zasilacz wiatraczka psychrometru do sieci prądu elektrycznego (zasilacz jest w pudle psychrometru). Uruchomić wiatraczek włącznikiem znajdującym się na pokrywie psychrometru.

3. Przez kilka minut obserwować termometr wilgotny (oznaczony na niebiesko) i odczytać najniższą wskazaną temperaturę. Jest to temperatura  $t_w$ , którą należy zapisać. Zanotować niepewność maksymalną pomiaru  $\Delta_d t_w$  - najmniejsza działka termometru.

4. Odczytać i zapisać temperaturę wskazywaną przez termometr suchy  $t_s$ . Zanotować niepewność maksymalną pomiaru  $\Delta_d t_s$  - najmniejsza działka termometru.

5. Odczytać z barometru ciśnienie atmosferyczne  $p_a$  (zgodnie z instrukcją załączoną do barometru). Zapisać wynik, podając go w [kPa].

### Opracowanie wyników pomiarowych

1. Korzystając z wielomianu (7), obliczyć wartości prężności pary wodnej nasyconej w temperaturze  $t_s$  i  $t_w$ , tj. odpowiednio  $p_{\text{nas}}$  i  $p_w$ . Wyniki porównać z danymi z Tabeli 1 (powinny być zbliżone).

2. Obliczyć  $p$  według wzoru (6). Stała  $k = 0,00066 \text{ 1/deg}$ .

3. Obliczyć wilgotność względną i procentową według wzoru (5).

4. Obliczyć wilgotność bezwzględną według wzoru (4), wstawiając znalezione wartości temperatury powietrza  $t_s$  (°C) i ciśnienia pary  $p$  (wyrażone w kPa).

5. Obliczyć niepewność standardową  $u(W)$  wyznaczenia wilgotności względnej  $W$ . W tym celu:

a) Oblicz niepewności standardowe pomiaru temperatur  $t_s$  i  $t_w$ :

$$u(t_s) = \frac{\Delta_d t_s}{\sqrt{3}}, \quad u(t_w) = \frac{\Delta_d t_w}{\sqrt{3}}. \quad (8)$$

b) Wzór (5) na wilgotność przedstaw w postaci:

$$W = \frac{at_w^3 + bt_w^2 + ct_w + d - kp_a(t_s - t_w)}{at_s^3 + bt_s^2 + ct_s + d}, \quad (9)$$

gdzie uwzględniono wzór (6) oraz zastosowano przedstawienie ciśnienia  $p_w$  oraz  $p_{\text{nas}}$  w formie wielomianowej (7).

c) Dla obliczenia niepewności  $u(W)$  zastosuj do powyższego wyrażenia na  $W$  wzór (9) z materiałów [13], czyli

$$u(W) = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial t_w}\right)^2 u^2(t_w) + \left(\frac{\partial W}{\partial t_s}\right)^2 u^2(t_s)}, \quad (10)$$

gdzie zaniedbano niepewność pomiaru  $p_a$ .

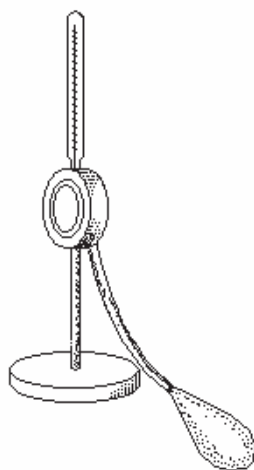
### B. WYZNACZANIE WILGOTNOŚCI BEZWZGLĘDNEJ I WZGLĘDNEJ POWIETRZA METODĄ PUNKTU ROSY (ZMODYFIKOWANEGO HIGROMETRU ALLUARDA)

#### Zasada pomiaru

Pomiar wilgotności powietrza tą metodą sprowadza się do wyznaczenia **temperatury punktu rosy**, czyli temperatury, w której para wodna znajdująca się w otaczającym powietrzu staje się parą nasyconą. Para zawarta w powietrzu (zwykle) nie jest parą nasyconą. Wiemy jednak, że izobaryczne oziębienie pary nienasyconej sprawia,

że staje się ona parą nasyconą, a dalsze ochładzanie powstaje parę nasyconej prowadzi do jej częściowego skroplenia.

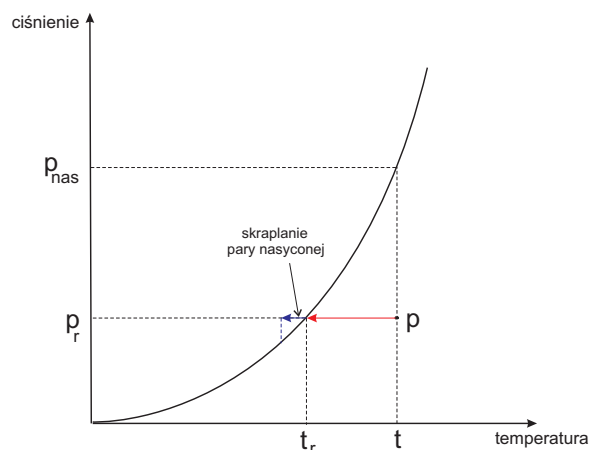
Higrometr Alluarda (Rys. 6) to małe płaskie naczynie



Rysunek 6. Higrometr Alluarda.

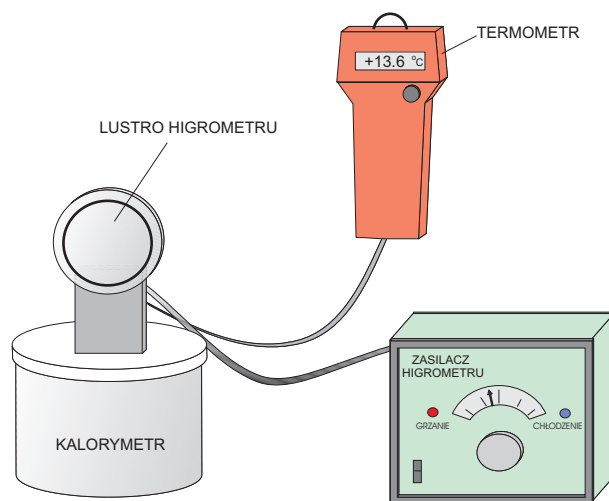
metalowe w kształcie walca wykonane z wypolerowanej blachy z bardzo błyszczącą powierzchnią czołową, tworzącą rodzaj lustro metalowego. W naczyniu umieszczony jest termometr pokazujący temperaturę lustra. Lustro jest ochładzane (w higrometrze Alluarda poprzez przepompowywanie przez naczynie zimnej wody) i obserwowane uważnie przez szklę umieszczoną przed higrometrem. W bezpośrednim otoczeniu lustra powietrze i znajdująca się w powietrzu para wodna o nieznanym ciśnieniu  $p$  zostaje w sposób *izobaryczny* ochłodzona - Rys. 7. Przy pewnej temperaturze (temperaturze punktu rosy  $t_r$ ) schłodzona para wodna będąca w pobliżu lustra staje się parą nasyconą. Dalsze obniżenie temperatury pary nasyconej powoduje jej skroplenie na powierzchni lustra, co przejawia się zmatowieniem jego powierzchni przez osadzające się na nim bardzo drobne kropelki wody ("rosę"). Należy zaobserwować temperaturę, w której lustro *zaczyna* pokrywać się mgiełką - jest to temperatura punktu rosy  $t_r$ . Znając temperaturę punktu rosy  $t_r$  i korzystając z Tabeli 1 lub z wielomianu (7), możemy wyznaczyć ciśnienie pary nasyconej  $p_r$  w temperaturze punktu rosy. Ponieważ ochładzanie pary odbywało się w sposób izobaryczny, zatem znaleziona prężność pary nasyconej  $p_r$  jest równa szukanemu ciśnieniu pary nienasyconej znajdującej się w pomieszczeniu w temperaturze pokojowej ( $p_r \equiv p$ ). Odczytując z Tabeli 1 lub obliczając z wielomianu (7) ciśnienie pary nasyconej  $p_{nas}$  w temperaturze pokojowej  $t$ , wcześniej odczytanej z termometru, z wzoru (5) wyznaczamy wilgotność względną  $W$ .

Uwaga: W zmodyfikowanym higrometrze Alluarda ochładzanie lustro higrometru dokonujemy dzięki ogniwo



Rysunek 7. Wykres przedstawia zależność ciśnienia pary nasyconej od temperatury. Para nienasycona w temperaturze pokojowej  $t$ , mająca ciśnienie  $p$ , po izobarycznym schłodzeniu staje się w temperaturze punktu rosy  $t_r$  parą nasyconą. Dalsze ochładzanie pary (nasyconej) prowadzi do jej skroplenia. Dzieje się tak, bowiem poniżej temperatury  $t_r$  maksymalne możliwe ciśnienie pary jest mniejsze niż  $p$ , w związku z czym ciśnienie pary musi się zmniejszyć i część fazy gazowej zmienia się w ciecz ("rosę").

Peltiera przymocowanemu z tyłu lustro. Pokrętle przy



Rysunek 8. Zmodyfikowany higrometr Alluarda.

zasilaczu higrometru regulujemy przepływ prądu przez ogniwo Peltiera, co pozwala na ochładzanie lub ogrzewanie lustro higrometru.

### Wykonanie ćwiczenia

#### Uwagi:

- Nie dotykać wypolerowanej powierzchni czołowej higrometru.

- W trakcie pomiarów higrometr obserwować przez szybkę ustawioną przed higrometrem - usuwa się w ten sposób częściowo wpływ pary wodnej wydychanej przez obserwatora.

1. Wrzucić do kalorymetru kilka dużych kawałków lodu i zalać je wodą destylowaną. Umocować higrometr w kalorymetrze.

2. Włączyć termometr elektroniczny.

3. Włączyć zasilacz higrometru i posługując się pokrętkiem przy zasilaczu ustawić tryb pracy "CHŁODZENIE". Powoli ochładzać higrometr posługując się pokrętkiem przy zasilaczu ogniwa Peltiera. Uważnie obserwować lustro higrometru oraz termometr i zanotować temperaturę  $t_{r1}$  w momencie pojawiania się zmatowienia ("rosy") na powierzchni lustra. Przerwać chłodzenie.

4. Używając pokrętki, przełączyć zasilacz na tryb "GRZANIE", ogrzać higrometr o około 2 - 3 stopnie powyżej punktu rosy i ponownie, po zniknięciu rosy, wolno ochładzać higrometr, ustawiając zasilacz w trybie "CHŁODZENIE". W momencie pojawienia się rosy odczytać i zapisać temperaturę  $t_{r2}$ .

5. Powtórzyć czynności z punktu 4 celem pomiaru temperatury punktu rosy  $t_{r3}$ .

6. Odczytać temperaturę otoczenia z termometru znajdującego się w najbliższym sąsiedztwie higrometru  $t$  (°C) - zapisać ją. (Jako temperaturę  $t$  można wykorzystać temperaturę  $t_s$  znalezionej w części A doświadczenia). Wyłączyć termometr i zasilacz. Zanotować niepewność maksymalną wskazań termometru  $\Delta_d t$ .

### Opracowanie wyników pomiarowych

1. Obliczyć średnią wartość temperatury punktu rosy  $t_r$  jako średnią arytmetyczną pomiarów  $t_{r1}$ ,  $t_{r2}$ ,  $t_{r3}$ .

2. Obliczyć niepewność maksymalną  $\Delta_d t_r$  jako maksymalne odchylenie od wartości średniej  $t_r$ , wyniku najbardziej różniącego się od tej średniej.

4. Obliczyć według wzoru (7) prężność  $p_r$  pary wodnej nasyconej w temperaturze punktu rosy  $t_r$ . Wynik porównać z Tabelą 1.

5. Znając temperaturę otoczenia  $t$  (°C), obliczyć z wielomianu (7) prężność pary wodnej nasyconej  $p_{nas}$  w tej temperaturze. Wynik skontrolować z Tabelą 1.

6. Wiedząc, że ciśnienie pary wodnej w powietrzu  $p$  jest równe  $p_r$ , obliczyć wilgotność względną oraz wilgotność procentową z wzoru (5).

7. Obliczyć niepewność standardową  $u(W)$  wyznaczenia wilgotności względnej  $W$ , czyli:

a) Oblicz niepewności standardowe:

$$u(t_r) = \frac{\Delta_d t_r}{\sqrt{3}}, \quad u(t) = \frac{\Delta_d t}{\sqrt{3}}. \quad (11)$$

b) Oblicz niepewności:

$$u(p_r) = \left| \frac{dp_r}{dt_r} \right| u(t_r), \quad (12)$$

$$u(p_{nas}) = \left| \frac{dp_{nas}}{dt} \right| u(t). \quad (13)$$

Wzory powyższe to uproszczona forma wyrażenia (9) podanego w materiałach [13].

c) Oblicz niepewność  $u(W)$ , stosując wyrażenie (12) z materiałów [13] do wzoru (5) przedstawionego w formie  $W = p^1 p_{nas}^{-1}$ .

- 
- [1] Adamczewski I., Ćwiczenia laboratoryjne z biofizyki i fizyki medycznej, PZWL, Warszawa, 1968.  
 [2] Blinowski J., Trylski J., Fizyka, PWN, Warszawa, 1981.  
 [3] Buchowski H., Ufnalski W., Podstawy termodynamiki, WNT, Warszawa, 1994.  
 [4] Buchowski H., Ufnalski W., Gazy, ciecze, płyny, WNT, Warszawa, 1994.  
 [5] Buchowski H., Ufnalski W., Roztwory, WNT, Warszawa, 1995.  
 [6] Brdika R., Podstawy chemii fizycznej, PWN, Warszawa, 1970.  
 [7] Danek A., Chemia fizyczna cz. II., PWN, Warszawa, 1986.  
 [8] Elwell D., Pointon A.J., Termodynamika klasyczna, WNT, Warszawa, 1976.  
 [9] Erndt A., Podstawy chemii ogólnej i nieorganicznej, Wyd. AR, Kraków, 1993, wyd. trzecie.  
 [10] Pigoń K., Ruziewicz Z., Chemia fizyczna cz.I, PWN, Warszawa, 1986.  
 [11] Szczeniowski Sz., Fizyka doświadczalna, cz.II., PWN, Warszawa, 1982.  
 [12] Wanik B., Wykłady z Fizyki, t. 1, Wyd. AR Kraków, 1998.  
 [13] K. Rębilas, Wprowadzenie do metod opracowania wyników pomiarowych.