

Ćwiczenie nr 22

**POMIAR WILGOTNOŚCI POWIETRZA  
ATMOSFERYCZNEGO**

**I. WSTĘP**

**1. Woda w atmosferze**

Woda odgrywa decydującą rolę w procesach umożliwiających powstanie i utrzymanie odpowiednich warunków do życia na Ziemi. Łączną masę wody na Ziemi szacuje się na  $1.5 \times 10^{18}$  ton. Występuje ona w trzech stanach skupienia: gazowym (para), ciekłym (woda) i stałym (lód). Woda parując przechodzi do atmosfery i jest przenoszona na znaczne odległości. W ciągu roku  $5 \times 10^{14}$  ton wody przechodzi w stan pary i tyle samo ulega skropleniu lub zestaleniu. W strefie równikowej z każdego metra kwadratowego powierzchni oceanu odparowują w ciągu roku 2 tony wody. W atmosferze ziemskiej zawartość pary wodnej zmienia się w szerokich granicach zależnie od warunków klimatycznych. Na suchej pustyni jest ona bliska zeru, zaś w lasach tropikalnych osiąga ok. 4% masy powietrza. Zmianom stanu skupienia wody, towarzyszy wydzielanie lub pochłanianie dużych ilości energii cieplnej (ciepło parowania równe ciepłu skraplania pod normalnym ciśnieniem atmosferycznym wynosi ok.  $2.2 \times 10^6$  J/kg, a ciepło topnienia równe ciepłu krzepnięcia  $3.2 \times 10^5$  J/kg). Jeśli te wartości przemnożymy przez podane wyżej masy wody przechodzące w ciągu roku w stan pary, to otrzymujemy wartość ok.  $1.1 \times 10^{21}$  J/rok, czyli więcej, niż wynosi roczna produkcja energii na świecie. Te przemiany energetyczne są głównym czynnikiem odpowiedzialnym za zjawiska klimatyczne na Ziemi. Zawartość pary wodnej w powietrzu jest istotna dla samopoczucia człowieka. Na coraz większą skalę wprowadza się urządzenia klimatyzacyjne w pomieszczeniach, w których przebywają ludzie, lub składa się np. komputery albo produkty spożywcze. Dlatego warto poznać metody pomiaru zawartości pary wodnej w powietrzu atmosferycznym.

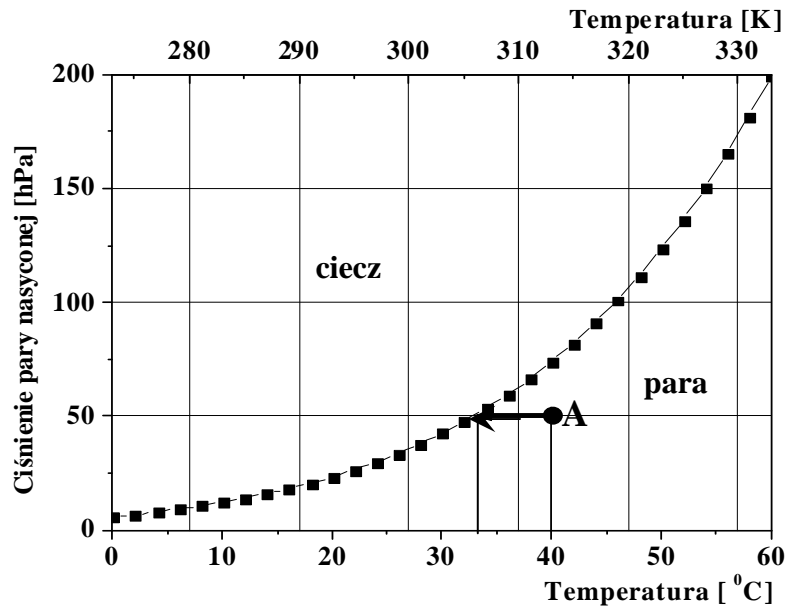
W tym wstępie spośród przemian fazowych wody omówimy krótko jedynie proces parowania wody. Jak wiadomo, cząsteczki cieczy znajdują się w ciągłym, bezładnym ruchu. Średnia energia kinetyczna cząsteczek rośnie ze wzrostem temperatury, natomiast energie kinetyczne poszczególnych cząsteczek są zróżnicowane. Pomiędzy cząsteczkami cieczy występują siły wzajemnego przyciągania. Najszybsze spośród tych, które poruszają się w kierunku powierzchni cieczy, dzięki posiadanej energii, mogą pokonać siły przyciągania międzycząsteczkowego i wydostać się do przestrzeni ponad cieczą. Stają się one cząsteczkami pary. Liczba takich cząsteczek przechodzących w jednostce czasu w stan pary, czyli do fazy gazowej, zależy od temperatury. Jeżeli ciecz i para znajdują się w zamkniętym naczyniu to w wyniku zderzeń pomiędzy cząsteczkami pary a powierzchnią cieczy, część z nich powraca do cieczy. Po pewnym czasie ustala się stan równowagi dynamicznej, polegający na tym, że liczba cząsteczek odparowujących jest równa liczbie powracających do cieczy (kondensujących). Parę będącą w równowadze dynamicznej ze swoją cieczą nazywamy **parą nasyconą**. Ciśnienie pary nad cieczą zależy od liczby cząsteczek pary znajdujących się w jednostce objętości i od ich średniej energii kinetycznej. Ponieważ w przypadku pary nasyconej obie te wielkości zależą tylko od temperatury, to i ciśnienie pary nasyconej zależy wyłącznie od temperatury. Nie zależy ono ani od objętości zajmowanej przez parę, ani od obecności innych gazów i ich ciśnienia. Zmniejszenie objętości zamkniętego naczynia z wodą (przy stałej temperaturze) spowoduje skroplenie takiej ilości pary, aby ciśnienie nie uległo zmianie. Przy zwiększeniu objętości, ciśnienie pary nasyconej pozostaje bez zmiany, dzięki przejściu odpowiedniej ilości cieczy w stan pary. Gdy para jest nasycona, jej ciśnienie osiąga maksymalną wartość odpowiadającą danej temperaturze. To, że ciśnienie pary nasyconej zależy wyłącznie od temperatury i nie zależy od obecności innych gazów ma istotne znaczenie dla roli wody w atmosferze Ziemi.

Zależność ciśnienia pary nasyconej  $p_{nas}$  od temperatury opisuje prawo Clausiusa – Clapeyrona,

które ma postać:

$$\frac{dp_{nas}}{dT} = \frac{Q_p}{T(v_p - v_c)}$$

gdzie  $p_{\text{nas}}$  jest ciśnieniem pary nasyconej,  $T$  temperaturą,  $Q_p$  jest ciepłem parowania, zaś  $V_p$  i  $V_c$  są odpowiednio objętościami zajmowanymi przez jednostkę masy wody w fazie pary i w fazie ciekłej. Wykres zależności ciśnienia pary nasyconej wody od temperatury pokazano na Rys. 1. Dane te w postaci



**Rys. 1. Zależność ciśnienia pary nasyconej wody od temperatury**

stabelaryzowanej zawarte są także w Dodatku 1 zamieszczonym na końcu tej instrukcji. Poniżej krzywej zależności ciśnienia pary nasyconej od temperatury, ciśnienie pary w określonej temperaturze jest mniejsze od ciśnienia pary nasyconej. Oznacza to, że w danej objętości znajduje się mniej cząsteczek pary niż mogłoby się zmieścić. Taką parę nazywamy **parą nienasyconą**. Jej ciśnienie zależy od temperatury i objętości zajmowanej przez parę w sposób podobny (w przybliżeniu) jak ciśnienie gazu doskonałego. Parę nienasyconą można izobarycznie (bez zmiany ciśnienia) przeprowadzić w stan pary nasyconej obniżając temperaturę. Ilustruje to strzałka pokazana na Rys. 1, prowadząca od punktu **A** ( $p = 50$  hPa,  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) do krzywej równowagi ( $p = 50$  hPa,  $T = 33.5^{\circ}\text{C}$ ). W momencie osiągnięcia stanu pary nasyconej rozpoczyna się kondensacja (skraplanie) nadmiaru pary, co przejawia się w postaci mgiełki (rosy) na powierzchni naczynia, którego temperaturę obniżamy. Dlatego temperaturę, przy której para wodna znajdująca się w powietrzu atmosferycznym, staje się parą nasyconą nazywa się **punktem rosy**  $T_r$ .

Zawartość pary wodnej w powietrzu atmosferycznym charakteryzują przede wszystkim dwie wielkości: **wilgotność bezwzględna**  $W_b$  i **wilgotność względna**  $W_w$ . Wilgotność bezwzględna jest równa masie wody zawartej w jednostce objętości powietrza  $W_b = \frac{m}{V}$ . Jednostką wilgotności bezwzględnej jest  $[\text{g}/\text{m}^3]$ .

W danej temperaturze,  $W_b$  osiąga maksymalną wartość, gdy para wodna jest w stanie nasycenia. Para wodna w atmosferze bardzo rzadko osiąga taki stan, ze względu na to, że nad zbiornikiem cieczy znajduje się otwarta przestrzeń. Wiele zjawisk, np. szybkość parowania, a także samopoczucie człowieka zależy od tego, czy para wodna znajdująca się w atmosferze jest blisko, czy daleko od stanu nasycenia. Ten stopień nasycenia charakteryzuje wilgotność względna  $W_w$ , czyli wyrażony w procentach stosunek masy  $M$  pary wodnej zawartej w  $1 \text{ m}^3$  danej atmosfery, do masy  $M_{\text{nas}}$ , którą można by nasycić taką objętość ( $1 \text{ m}^3$ ).

$$W_w = \frac{M}{M_{\text{nas}}} \cdot 100 = \frac{W_b}{W_{b \text{ nas}}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Bezpośredni pomiar masy pary wodnej zawartej w określonej objętości powietrza atmosferycznego jest skomplikowany. Traktując w przybliżeniu parę wodną zawartą w powietrzu atmosferycznym jako gaz doskonały, możemy skorzystać z podstawowego prawa gazu doskonałego, zwanego prawem Clapeyrona:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad \text{czyli} \quad \frac{m}{V} = \frac{\mu p}{RT} \quad (3)$$

gdzie  $V$  jest objętością pary,  $m$  jej masą,  $\mu$  masą molową wody,  $R$  stałą gazową. Ponieważ masa pary  $M$ , zawarta w jednostce objętości jest liczbowo równa jej gęstości  $\rho = \frac{m}{V} = W_b$ , to wzór (2) można

przekształcić do postaci:

$$W_w = \frac{p(T)}{p_{\text{nas}}(T)} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

Wilgotność względna jest więc równa stosunkowi ciśnienia parcjalnego<sup>1</sup> pary wodnej  $p(T)$  w danej temperaturze, do ciśnienia  $p_{\text{nas}}(T)$  jakie miała by nasycona para wodna w tej samej temperaturze. To drugie ciśnienie możemy odczytać z tablic. Aby wyznaczyć wartość  $p(T)$  należy izobarycznie obniżyć temperaturę powietrza do wartości odpowiadającej punktowi rosy  $T_r$  (podobnie jak to pokazuje strzałka do punktu A na Rys. 1) i z tablic odczytać ciśnienie pary nasyconej przy tej temperaturze ( $p(T) = p_{\text{nas}}(T_r)$ ).

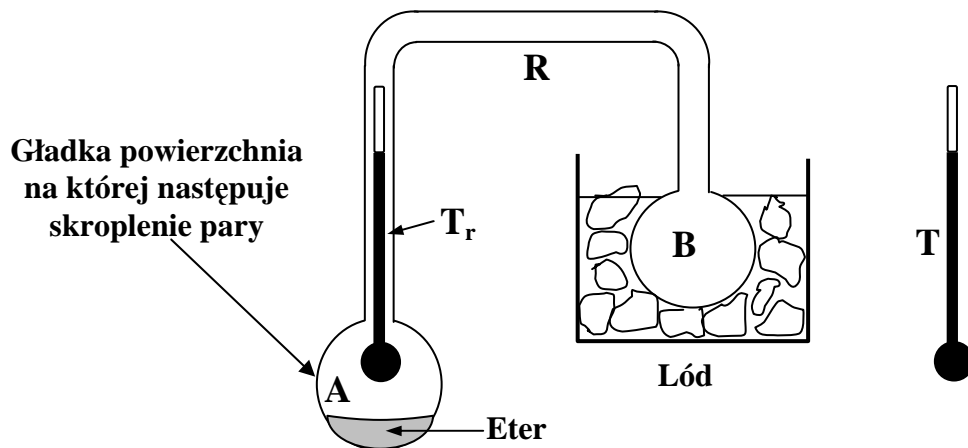
Pomiar wilgotności względnej powietrza atmosferycznego polega na obniżeniu temperatury dowolnego naczynia posiadającego błyszczącą powierzchnię i odczytaniu dwu wartości temperatury: temperatury powietrza  $T$ , oraz temperatury  $T_r$ , przy której pojawia się, lub znika rosenie. Następnie należy skorzystać dołączonych do instrukcji tablic zależności  $p_{\text{nas}}(T)$  i odpowiednie wartości podstawić do wzoru (4).

## II. OPIS EKSPERYMENTU

### Metody pomiaru wilgotności względnej powietrza atmosferycznego

#### II a. Higrometr Daniella

Podstawową metodą pomiaru wilgotności powietrza jest pomiar temperatury punktu rosy. Do tego celu wykorzystuje się tzw. higrometr Daniella, w którym temperaturę powierzchni szkła, na której ma nastąpić kondensacja pary wodnej, obniża się przez odparowanie eteru. Przykład takiego przyrządu pokazano na Rys. 2. Dwa kuliste zbiorniki szklane **A** i **B** połączone są rurką szklaną **R**.



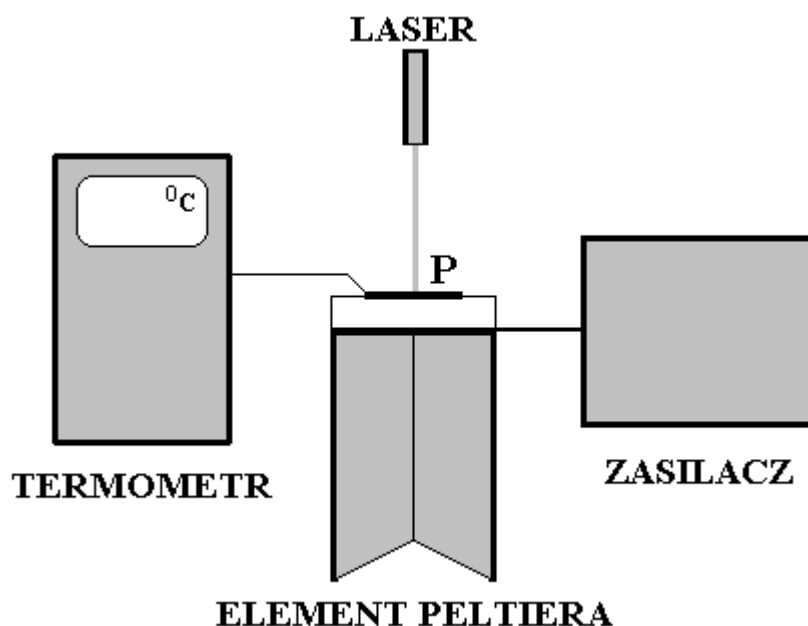
Rys. 2. Schemat higrometru Daniella

Z całego naczynia usunięto powietrze. W zbiorniczku **A** znajduje się ciekły eter. Dodatkowo umieszczono w nim termometr  $T_r$ , który mierzy temperaturę par eteru i ścianek zbiorniczka **A**, będących w kontakcie z parą. Zbiorniczek **B** zanurzamy w mieszaninie wody z lodem i solą ( $T \leq 0^{\circ}\text{C}$ ), wskutek czego w tym zbiorniczku skraplają się pary eteru. Wywołuje to szybkie parowanie eteru ze zbiorniczka **A** i obniżanie jego temperatury. Gdy temperatura zbiorniczka **A** osiągnie punkt rosy dla pary wodnej zawartej w powietrzu atmosferycznym, na zewnętrznych ściankach naczynia pojawia się mgiełka. Termometr  $T_r$  wskazuje wtedy punkt rosy.

<sup>1</sup> Ciśnieniem parcjalnem danego gazu w mieszaninie gazów (np. w powietrzu atmosferycznym) nazywa się ciśnienie, jakie ten gaz wywierał by, gdyby sam wypełniał całą objętość zajmowaną przez mieszaninę gazów.

## II b. Metoda punktu rosy z wykorzystaniem efektu Peltiera

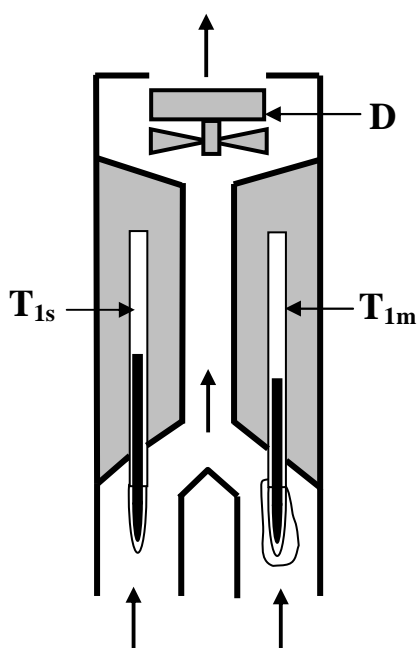
Metoda ta jest odmianą opisanego powyżej sposobu wyznaczania wilgotności względnej powietrza przy użyciu higrometru Daniella. Do obniżania temperatury błyszczącej powierzchni, w celu osiągnięcia punktu rosy, wykorzystuje się tutaj zjawisko Peltiera. Schemat układu pomiarowego przedstawia Rys.3.



Rys.3. Schemat układu do wyznaczania wilgotności metodą II b.

Cienka płytka krzemowa **P**, o dobrze wypolerowanej górnej powierzchni, pozostaje w kontakcie cieplnym z chłodzonym stolikiem elementu Peltiera. Temperaturę powierzchni płytki można obniżać, regulując natężenie prądu zasilającego element Peltiera, a jej wartość mierzyć za pomocą termometru cyfrowego z dokładnością 0,1 °C. Jeśli powierzchnia płytki jest bardzo czysta, promień laserowy, padając na nią prostopadłe, pozostaje niewidoczny przy obserwacji z boku. Pojawienie się mgiełki na powierzchni płytki powoduje rozproszenie światła laserowego i ułatwia znalezienie temperatury punktu rosy – zaczyna być widoczna czerwona plamka na powierzchni płytki.

## II c. Psychrometr Assmanna



Rys. 3. Schemat psychrometru Assmanna

Uproszczony schemat psychrometru Assmanna pokazano na Rys. 3. Wykorzystuje on fakt, że przy parowaniu wody pobierane jest ciepło parowania. Przyrząd składa się z dwu identycznych i dokładnych ( $\pm 0,1$  °C) termometrów  $T_{1m}$  i  $T_{1s}$ . Zbiorniczek ręci pierwszego z nich owinięty jest tkaniną (tzw. koszulką), zwilżaną wodą destylowaną a zbiorniczek drugiego, pozostaje suchy. Woda parując z koszulki na termometrze  $T_{1m}$ , pobiera od niego ciepło parowania i dlatego termometr „mokry” wskazuje temperaturę  $T_m$ , niższą od  $T_s$ . Szybkość parowania wody z powierzchni tkaniny zależy od wilgotności względnej powietrza atmosferycznego  $W_w$ . Im jest ona mniejsza, tym szybciej woda paruje i tym niższa jest temperatura  $T_m$ . Szybkość parowania wody zależy także od innych czynników, takich jak ciśnienie atmosferyczne, wielkość powierzchni, z której woda odparowuje, a także od ruchów powietrza w otoczeniu termometru. Dla przyspieszenia parowania i zmniejszenia wpływu niekontrolowanych ruchów powietrza stosuje się wymuszony obieg powietrza, wykorzystując dmuchawę **D** napędzaną mechanizmem sprężynowym. Kierunek opływania termometrów przez powietrze pokazują strzałki.

Pomiar wykonany psychrometrem Assmanna jest pomiarem względnym, zawierającym stałe empiryczne. Aby móc korzystać z tej metody opracowano tzw. tablice psychrometryczne, które podają wartość wilgotności względnej powietrza przy zmierzonej w danych warunkach różnicy wskazań obu termometrów  $T_m$  i  $T_s$  dla określonej i ustalonej prędkości powietrza owiewającego tkaninę. Tablice takie dołączone są do instrukcji w Dodatku 2..

#### **II d. Higrometr włosowy**

Higrometry włosowe są najbardziej popularne, ze względu na stosunkowo niską cenę. Działają one na zasadzie zjawiska zmiany długości odtłuszczonego włosa ludzkiego, lub zwierzęcego. Jeden koniec włosa jest zamocowany na stałe, a drugi nawinięty na bloczek, połączony ze wskazówką, która obraca się, gdy długość włosa ulega zmianie. Wskazania przyrządu nie są zbyt dokładne, gdyż włos reaguje nie tylko na zmiany wilgotności  $W_w$ , ale także temperatury. Stwierdzono, że przy takiej samej wilgotności względnej, wydłużenie włosa stanowi w przybliżeniu zawsze ten sam procent wydłużenia maksymalnego, osiąganego przy wilgotności względnej równej 100 %, ale ulega powolnym zmianom. Dlatego dla kontroli wskazań higrometru włosowego, należy co najmniej raz w roku owinać przyrząd wilgotną tkaniną by uzyskać wilgotność 100% i ewentualnie skorygować jego wskazania do takiej właśnie wartości.

#### **II e. Higrometry elektryczne**

Higrometry elektryczne wykorzystują elektroniczne czujniki wilgotności. Najczęściej wykorzystuje się czujniki pojemnościowe lub oporowe. Do ich skalowania wykorzystuje się higrometry typu Daniella.

Czujnik pojemnościowy jest kondensatorem, w którym pomiędzy okładkami umieszczono porowatą piankę z polimeru. Jeśli para wodna dostanie się do porów, pojemność elektryczna  $C$  kondensatora zwiększa się, dzięki dużej wartości przenikalności elektrycznej wody ( $\epsilon = 81$ ). Im większa wilgotność powietrza, tym większe jest  $C$ . Ponieważ polimer nie wchłania wody na stałe, przy małej wilgotności powietrza woda wyparowuje z pianki. Zmiany pojemności rejestruje elektroniczny miernik, wykorzystujący prądy wysokiej częstotliwości.

Czujniki oporowe (rezystancyjne) wykonywane są na bazie warstw półprzewodnikowych (np. warstw  $\text{SnO}_2$ ), których opór elektryczny zmienia się pod wpływem pary wodnej. Wiadomo także, że opór elektryczny powierzchni zwykłego szkła zmienia się o ok. 6 rzędów (np od  $10^5$  do  $10^{11} \Omega$ ), przy zmianie wilgotności otoczenia od 0% do blisko 100%. Wadą czujników rezystancyjnych jest możliwość elektrolizy na elektrodach i ich korozja, powodująca niestabilność wskazań przy długotrwałej eksploatacji.

### **III. POMIARY**

#### **III a. Metoda punktu rosy z wykorzystaniem efektu Peltiera**

1. Odczytać temperaturę powietrza wskazywaną przez termometr cyfrowy przy **wyłączonym** zasilaniu elementu Peltiera (gdy jest on w równowadze cieplnej z otoczeniem).
2. Włączyć laser oświetlający część powierzchni płytki.
3. Włączyć zasilacz elementu Peltiera.
4. Zwiększać powoli natężenie prądu tak, aby temperatura obniżała się z szybkością kilku stopni na minutę, obserwując równocześnie powierzchnię płytki krzemowej. Zanotować wartość temperatury, przy której na powierzchni płytki pojawi się mgiełka (zaczyna być widoczna czerwona plamka wskutek rozproszenia światła wiązki laserowej) i zaraz podnieść temperaturę, zmniejszając nieco natężenie prądu, aby na płytce nie powstały zbyt duże kropelki wody, które trudniej odparować. Zanotować temperaturę, przy której plamka znika z powierzchni płytki.
5. Pomiary powtórzyć kilkanaście razy zmieniając natężenie prądu w taki sposób, aby zmiany temperatury odbywały się w pobliżu punktu rosy, notując za każdym razem temperaturę pojawiania się i znikania mgiełki.

**III b. Psychrometr Assmanna**

1. Wyjąć próbkę do zwilżania koszulki termometru i napełnić ją po górną kreskę wodą destylowaną (najlepiej o temperaturze pokojowej).
2. Wsunąć od dołu, do dolnej części osłony termometru oznaczonej kolorem niebieskim (po prawej stronie), próbkę z wodą.
3. Po kilkunastu sekundach zdjąć próbkę i odczekać ok. 10 minut, tak, aby ustaliła się równowaga cieplna.
4. Nakręcić mechanizm sprężynowy dmuchawy, obracając w prawo (zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara) wieczkiem osłony mechanizmu. Nakręcanie należy przeprowadzać ostrożnie, do momentu, gdy dalsze nakręcanie spowoduje przyspieszenie obrotów wentylatora.
5. Po upływie ok. 4 minut pracy wentylatora, tj. po ustaleniu się temperatur, odczytać wskazania obu termometrów.
6. Wyniki zanotować i na podstawie tablic psychrometrycznych wyznaczyć wartość wilgotności względnej.

**III c. Higrometr włosowy.**

Odczytać wskazania przyrządu

**IV. OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW****IV a. Metoda punktu rosy z wykorzystaniem efektu Peltiera**

1. Dla każdego pomiaru obliczyć temperaturę punktu rosy jako średnią temperatur pojawiania się i znikania mgiełki.
2. Odczytać z tablic wartość ciśnienia pary nasyconej, odpowiadającą temperaturze otoczenia  $p_o$  i temperaturze punktu rosy  $p_t$ . Obliczyć wilgotność względną  $S = (p_t/p_o)100\%$  dla każdego pomiaru.
3. Ponieważ wszystkie pomiary temperatury punktu rosy wykonywane są za pomocą tego samego miernika należy uznać je za skorelowane. Obliczyć średnią wartość wyznaczonej wilgotności (patrz: Instrukcja, wzór nr 16) i jej złożoną niepewność standardową  $u_c(S)$  (patrz: Instrukcja ONP, wzór nr 17).

**IV b. Psychrometr Assmanna**

1. Wyznaczyć wartość wilgotności względnej  $W_w$ .
2. Porównać otrzymaną wartość z wartością wyznaczoną metodą punktu rosy i podać możliwe powody różnicy otrzymanych wyników.

**IV c. Higrometr włosowy**

Porównać odczytane wartości wilgotności względnej  $W_w$  z wartością wyznaczoną za pomocą higrometru Assmanna i podać możliwe powody różnic.

Ze względu na zmieniający się w trakcie ćwiczeń skład powietrza, a zwłaszcza zawartości pary wodnej, wyniki pomiarów mogą być obarczone sporym błędem. Zastanów się, który z przyrządów jest najbardziej wiarygodny, i w jakich warunkach inne przyrządy dałyby „lepsze” wyniki.

**V. LITERATURA**

1. I. W. Sawieliew, Kurs Fizyki, tom 1, PWN Warszawa 1989
2. Sz. Szczeniowski, Fizyka Doświadczalna, tom II, PWN Warszawa 1976
3. H. Szydłowski, Pracownia fizyczna, PWN Warszawa 1999, ćwic. 24,3

**VI. ZAGADNIENIA DO KOŁOKWIUM**

Prawo gazu doskonałego – równanie Clapeyrona.

Para nasycona wody – własności; zależność ciśnienia od temperatury – prawo Clausiusa – Clapeyrona.

Para nienasycona – przejście do stanu nasycenia.

Wilgotność bezwzględna i względna – definicje; wzajemna zależność.

Metody pomiaru wilgotności względnej powietrza atmosferycznego.

**DODATEK 1**  
**Zależność ciśnienia pary wodnej nasyconej od temperatury**

t [°C]	p [hPa]	t [°C]	p [hPa]
0	6,08	16	18,14
1	6,57	17	19,42
2	7,06	18	20,59
3	7,55	19	21,97
4	8,14	20	23,34
5	8,72	21	24,91
6	9,35	22	26,48
7	10	23	28,05
8	10,69	24	29,81
9	11,47	25	31,67
10	12,26	26	33,64
11	13,14	27	35,6
12	14,02	28	37,75
13	15,02	29	40,01
14	15,98	30	42,46
15	17,05	31	45,01

