

Ćwiczenie 9

Pomiar wilgotności powietrza



Spis treści

1. Cel ćwiczenia	3
2. Wstęp teoretyczny	3
2.1. Pojęcia podstawowe	3
2.2. Wykres Molliera i-x	4
3. Przyrządy do pomiaru wilgotności powietrza	5
3.1. Higrometry	5
3.1.1. Higrometry absorpcyjne	5
3.1.2. Higrometry kondensacyjne	5
3.1.3. Higrometry oparte na działaniu higroskopowym	6
3.1.3.a. Higrometry włosowe	6
3.1.3.b. Higrometry oparte na zasadzie przewodnictwa cieplnego	6
3.1.4. Higrometry elektryczne	6
3.2. Psychrometry	7
3.2.1. Psychrometr Augusta	9
3.2.2. Psychrometr Assmanna	9
3.3.3. Pomiar wilgotności powietrza w kanale	10
4. Wyznaczanie wilgotności względnej powietrza na podstawie wskazań psychrometrów	10
4.1. Za pomocą wzoru Sprunga	10
4.2. Za pomocą gotowych tablic lub wykresów psychrometrycznych	10
4.3. Za pomocą wykresu Molliera i-x	11
5. Przebieg ćwiczenia i metodyka pomiaru	12

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami i przyrządami służącymi do pomiaru wilgotności powietrza, a także praktyczne przeprowadzenie pomiarów za pomocą dostępnych przyrządów.

2. Wstęp teoretyczny

2.1. Pojęcia podstawowe

Powietrze wilgotne (powietrze atmosferyczne) z termodynamicznego punktu widzenia można traktować jako mieszaninę dwóch składników: powietrza suchego i pary wodnej.

Powietrze nienasycone może jeszcze w danej temperaturze wchłonąć pewną ilość pary wodnej.

Powietrze nasycone zawiera w sobie maksymalną ilość pary wodnej w danej temperaturze.

Ciśnienie powietrza wilgotnego p_b jest sumą ciśnienia powietrza suchego p_1 oraz ciśnienia pary wodnej p_{H_2O} (zgodnie z prawem Daltona)

$$p_b = p_1 + p_{H_2O} \quad (1)$$

Punkt rosy jest to taka temperatura powietrza, dla której ciśnienie cząstkowe pary zawartej w powietrzu jest równe ciśnieniu nasycenia pary (nawet najmniejsze obniżenie temperatury powietrza znajdującego się w tym stanie spowoduje wykroplenie się pewnej ilości pary w postaci mgły lub rosy).

Ciśnienie i temperatura w sposób jednoznaczny określają stan termiczny gazu jednorodnego. W przypadku powietrza wilgotnego to nie wystarczy, ponieważ zawartość pary wodnej w powietrzu jest niezależna od wymienionych parametrów termicznych, dlatego należy podać jedną z następujących wielkości: wilgotność bezwzględną objętościową, wilgotność bezwzględną wagową, wilgotność względną lub stopień nasycenia powietrza. Wielkości te definiowane są następująco:

Wilgotność bezwzględna objętościowa jest to ilość gramów pary wodnej m_p zawartej w 1 m^3 powietrza wilgotnego V :

$$\rho = \frac{m_p}{V} \quad (2)$$

Wilgotność bezwzględna wagowa (zawartość wilgoci) jest to masa pary wodnej m_p przypadająca na jednostkę masy powietrza suchego m_s . Wyrażamy ją w [g/kg] lub [kg/kg] i oznaczamy przez x .

$$x = \frac{m_p}{m_s} \quad (3)$$

Uwzględniając równania stanu dla pary (dla niskich ciśnień pary) i powietrza suchego otrzymamy:

$$x = 0,662 \frac{p_{H_2O}}{p_b - p_{H_2O}} \quad (4)$$

Wilgotność względna jest to stosunek rzeczywistej wilgotności bezwzględnej objętościowej ρ od maksymalnej wilgotności bezwzględnej objętościowej ρ_s mogącej wystąpić w tej samej temperaturze. Wielkość ta jest również definiowana jako stosunek ciśnienia składnikowego pary p_{H_2O} do jej ciśnienia maksymalnego (ciśnienia nasycenia) p_s w tej samej temperaturze

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{p_{H_2O}}{p_s} \quad (5)$$

Stopień nasycenia powietrza jest to stosunek zawartej wilgoci w powietrzu x do zawartości wilgoci w powietrzu nasyconym para w tej samej temperaturze x_s .

$$\psi = \frac{x}{x_s} \quad (6)$$

Entalpia powietrza wilgotnego o zawartości wilgoci x [kg/kg] nazywamy entalpię mieszaniny 1 kg powietrza suchego i x kg pary wodnej. Przyjmując, że dla takiej mieszaniny powietrza suchego oraz całej zawartości wody w postaci cieczy przy 0°C entalpia równa się zeru otrzymamy:

$$i = (c'_p + x c''_p)t + xr \quad (7)$$

2.2. Wykres Molliera i - x

Wentylacja, klimatyzacja i suszarnictwo to dziedziny techniki, w których zachodzi potrzeba obrazowego przedstawiania procesów fizycznych zachodzących w powietrzu wilgotnym. Powszechne zastosowanie znalazły wykresy, obrazujące w sposób graficzny zależności parametrów t , φ , i oraz x przy stałym ciśnieniu $p_b = \text{const}$, np. $p_b = 760$ mmHg. Wykresem tym można się jednak posługiwać przy zmianach ciśnienia do ± 20 mmHg.

Do budowy wykresu i - x , zamieszczonego w załączniku nr 1, zastosowano ukośny układ współrzędnych.

Pozioma oś to skala zawartości wilgoci x [kg/kg] lub [g/kg], więc linie stałej zawartości wilgoci są pionowe. Lewa oś pionowa to skala entalpii i [kJ/kg]. Jednak linie stałej entalpii biegną ukośnie, pod kątem 135° od osi pionowej. Gdyby zastosowano prostokątny układ współrzędnych obszar powietrza nienasyconego wypadłby zbyt wąski.

Linie stałej wilgotności względnej φ stanowią układ krzywych biegnących skośnie od lewego dolnego rogu wykresu ku górze. Krzywa $\varphi = 1$ ($\varphi = 100\%$) rozdziela obszar mgły (poniżej krzywej) od obszaru powietrza nienasyconego (powyżej krzywej). Izotermy $t = \text{const}$ w obszarze powietrza nienasyconego tworzą układ prostych nierównoległych, przy czym izoterma $t = 0^\circ\text{C}$ w tym obszarze jest pozioma. Wszystkie izotermy ulegają załamaniu na linii nasycenia $\varphi = 1$ i w obszarze mgły biegną one prawie równolegle do izentalp. Linia $t = 0^\circ\text{C}$ oraz $i = 0$ kJ/kg przecinają się na lewej osi pionowej.

3. Przyrządy do pomiaru wilgotności powietrza

W zależności od budowy i zasady działania przyrządy do pomiaru wilgotności powietrza można podzielić na dwie grupy: higrometry i psychrometry.

3.1. Higrometry

3.1.1. Higrometry absorpcyjne

W higrometrach tego typu wilgotność powietrza oznacza się metodą bezwzględną drogą pochłaniania pary wodnej z powietrza przez dowolny osuszacz i pomiar ilości tej pary oraz ilości tej powietrza suchego użytego do analizy.

Jako środka pochłaniającego wodę używa się następujących substancji higroskopijnych:

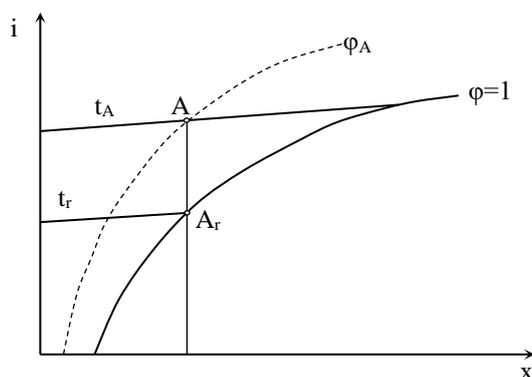
- ciała porowate o silnie rozwiniętej powierzchni np. węgiel aktywowany, żel krzemionkowy-osuszające gaz wskutek adsorpcji,
- substancje wiążące chemicznie wodę np. pięciotlenek fosforu, tlenek wapnia,

Higrometry absorpcyjne są zbyt skomplikowane i kłopotliwe w użyciu do praktycznego stosowania w technice cieplnej – są natomiast wykorzystywane do pomiarów laboratoryjnych oraz jako przyrządy wzorcowe.

3.1.2. Higrometry kondensacyjne

Za pomocą tych higrometrów oznaczamy wilgotność względną powietrza na podstawie pomiaru temperatury punktu rosy, czyli temperatury przy, której rozpoczyna się proces kondensacji pary wodnej z badanego powietrza na gładkiej metalowej lub szklanej powierzchni (lustrze).

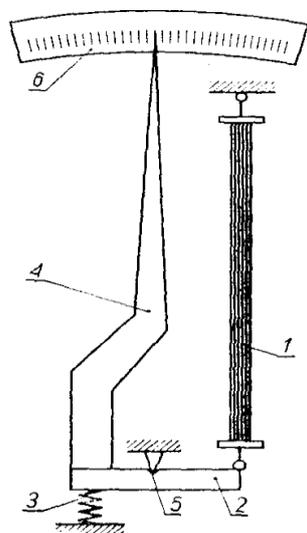
Powierzchnia ta jest chłodzona, przez co powietrze otaczające ją obniża swoją temperaturę. Osiągnięciu przez powietrze temperatury punktu rosy sygnalizowane jest pojawieniem się mgiełki na wypolerowanej, gładkiej powierzchni (powierzchnia ta matowieje). Metoda pomiarowa w tym przyrządzie oparta jest na tym, że chłodzenie powietrza otaczającego lustro odbywa się przy stałej zawartości wilgoci ($x = const$). Sposób wyznaczania wilgotności na podstawie wskazań higrometru kondensacyjnego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Wyznaczanie wilgotności względnej φ na wykresie i - x według wskazań higrometru kondensacyjnego

3.1.3. Higrometry oparte na działaniu higroskopowym

3.1.3.a. Higrometry włosowe



Rys. 2. Budowa higrometru włosowego: 1 – wiązka włosów odtłuszczonych; 2 – dźwignia; 3 – sprężyna dźwigni; 4 – wskazówka; 5 – punkt podparcia dźwigni; 6 – skala

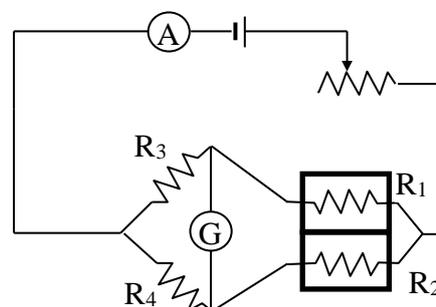
Przyrządy te oparte są na własnościach włosów ludzkich, zwierzęcych oraz niektórych włókien syntetycznych, polegające na zmianie ich długości pod wpływem zmian wilgotności powietrza.

Za względu na prostotę budowy i działania, higrometry włosowe są powszechnie stosowane. Dokładność pomiaru zawiera się w granicach $\pm 3\%$ przy zakresie pomiarowym od 30% do 100% wilgotności względnej. Budowa higrometru włosowego przedstawiona jest na rysunku 2.

Do wad higrometrów włosowych należą: występowanie zjawiska histerezy, konieczność starannego odtłuszczenia włosów, zakres stosowania tylko w temp. do 50°C , konieczność okresowej regeneracji oraz okresowego sprawdzania i regulacji.

3.1.3.b. Higrometry oparte na zasadzie przewodnictwa cieplnego

Higrometr ten to typowy elektryczny mostek Wheatstone'a. Mostek ten składa się z dwóch jednakowych oporów $R_1 = R_2$ i dwóch innych oporów $R_3 = R_4$. Rysunek 3 przedstawia schematycznie ten higrometr. Jeżeli opory R_1, R_2 są w jednakowych warunkach, to wskazówka galwanometru nie wychyla się. Natomiast jeżeli wokół jednego z tych oporów zmieni się wilgotność powietrza, a tym samym przewodnictwo cieplne tego powietrza, to ustali się inna temperatura spirali, czyli zmieni się jej opór. Wtedy opory R_1 i R_2 nie są sobie równe i wskazówka galwanometru wychyli. Galwanometr można wyskalować tak, aby od razu wskazywał wilgotność względną.



Rys. 3. Schemat higrometru opartego na zasadzie zmiany przewodnictwa cieplnego powietrza

3.1.4. Higrometry elektryczne

3.1.4.a. Higrometry rezystancyjne z czujnikami elektrolitycznymi

Czujniki tych higrometrów składają się z elektrod rozdzielonych warstwą higroskopijną zmieniającą przewodność elektryczną przy zmianie wilgotności powietrza. Przyrządy te można podzielić na dwie grupy:

1) higrometr z czujnikiem elektrolitycznym

Przyrząd ten składa się z elektrod zanurzonych w elektrolicie (nienasycone roztwory soli lub kwasów). Zmiana stężenia elektrolitu, spowodowana zmianą wilgotności powietrza otaczającego czujnik, powodują zmianę jego przewodności elektrycznej, przez co natężenia prądu płynącego pomiędzy elektrodami zmienia się. Odpowiednio wyskalowany amperomierz pozwala na bezpośredni odczyt wilgotności powietrza.

2) higrometry z czujnikami sorpcyjnym

Higrometr ten działa na tej samej zasadzie co czujnik elektrolityczny, z tym, że zamiast elektrolitu stosuje się specjalne materiały aktywne, o właściwościach higroskopijnych, pochłaniające wilgoć z otoczenia.

3.1.4.b. Higrometry z ogrzewanymi czujnikami

Działanie ich oparte jest na pomiarze temperatury przemiany wodnego roztworu chlorku litu na stałą sól chlorku litu. Temperatura tej przemiany zależy tylko od ciśnienia cząstkowego pary wodnej w otaczającym powietrzu.

Czujnikiem pomiarowym jest termometr oporowy (lub inny) owinięty koszulką z tkaniny szklanej nasyconej stężonym roztworem chlorku litu LiCl . Na koszulce są nawinięte spiralnie, ściśle do niej przylegające, leżące obok siebie elektrody zasilane niskim napięciowym źródłem prądu zmiennego.

Zasada działania: przepływający pomiędzy elektrodami, przez roztwór chlorku litu, prąd powoduje wydzielanie się ciepła, które powoduje parowanie wody z roztworu i wykrystalizowanie się soli chlorku litu. Krystaliczny chlorek litu posiada większy opór elektryczny niż jego wodny roztwór. Zwiększenie oporu powoduje zmniejszenie natężenia płynącego prądu oraz zmniejszenie ilości wydzielanego ciepła. Kryształki chlorku litu posiadają silne właściwości higroskopijne i pobierają wilgoć z otaczającego powietrza. To powoduje zmniejszenie oporu, wzrost natężenia prądu i temperatury (ponowne odparowywanie wody, itd.). Po kilku takich cyklach ustali się stan równowagi (nie będzie istniała wymiana wilgoci między chlorkiem litu a otoczeniem). Roztwór chlorku litu jest nasycony, a ciśnienie pary wodnej roztworu jest równe ciśnieniu cząstkowemu pary wodnej w otaczającym powietrzu.

Do określenia wilgotności bezwzględnej wagowej x , na podstawie wzoru (4), należy jeszcze odczytać wartość ciśnienia barometrycznego p_b .

3.2. Psychrometry

Psychrometry, pomimo tego, że nie pozwalają na bezpośrednie odczyty wilgotności względnej powietrza, są przyrządami prostymi, tanimi i wygodnymi w użyciu. Właściwe użytkowanie tych przyrządów pozwala na osiągnięcie najwyższej dokładności.

Psychrometr składa się z dwóch jednakowych termometrów: tzw. suchego i mokrego. Naczynie termometru mokrego owinięte jest koszulką np. z gazy, zwilżoną wodą destylowaną.

Pomiar opiera się na założeniu, że w warstwie powietrza graniczącego bezpośrednio z termometrem mokrym ustali się stan nasycenia powietrza parą wodną. Na skutek różnicy ciśnień składnikowych pary wodnej w tej warstwie i otaczającym powietrzu nastąpi parowanie z higroskopijnej warstwy termometru mokrego. Parowanie to obniży temperaturę powietrza naokoło naczynia termometru mokrego, który z tego powodu wskazuje temperaturę niższą niż suchy. **Różnica wskazań termometru suchego i mokrego nazywa się różnicą psychrometryczną.** Różnica ta maleje wraz ze wzrostem wilgotności powietrza. Jeżeli powietrze jest nasycone to oba termometry wskazują jednakową temperaturę. Przy ustalonej wymianie ciepła i swobodnym dopływie masy ciepło zużyte na odparowanie wody z koszuli termometru mokrego, pobierane z powietrza, powraca do niego w postaci ciepła parowania wody. Można założyć, że proces ten jest zbliżony do adiabatycznego (nie występuje wymiana ciepła z otoczeniem).

Do wyznaczenia wilgotności powietrza dla temperatury do 50 °C, można zastosować wzór Sprunga:

$$\varphi = \frac{p_{sm} - A \cdot (t_s - t_m) \cdot p_b}{p_{ss}} \cdot 100\% \quad (9)$$

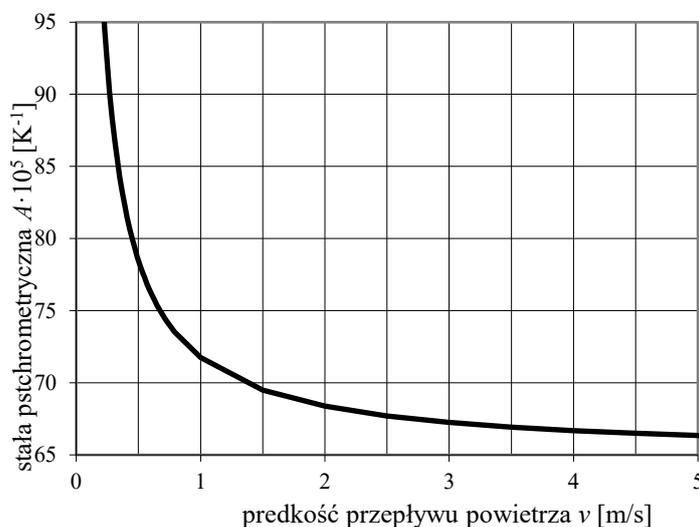
gdzie: p_{sm} – ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze termometru mokrego, p_{ss} – ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze termometru suchego; p_b – ciśnienie barometryczne w chwili pomiaru, t_m – temperatura termometru mokrego, t_s – temperatura termometru suchego; A – stała psychrometryczna.

Stała psychrometryczna zależy głównie od rodzaju gazu i od prędkości przepływu v tego gazu wokół termometru mokrego. Dla powietrza stałą tą można obliczyć korzystając z empirycznego wzoru:

$$A = \left(65 + \frac{6.75}{v}\right) \cdot 10^{-5} \quad [K^{-1}] \quad (10)$$

gdzie: v – prędkość przepływu powietrza wokół czujnika termometru mokrego [m/s].

Zmienność stałej A od prędkości obrazuje rysunek 4.



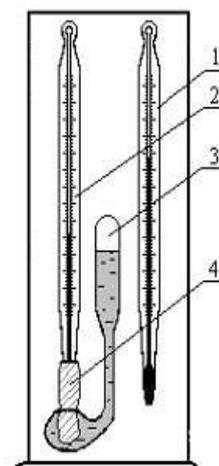
Rys. 4. Wykres zależności stałej psychrometrycznej od szybkości przepływu powietrza: $A = f(v)$

Z przebiegu krzywej obrazującej zależność $A = f(v)$ widać, że największa zmienność stałej A jest dla prędkości powietrza poniżej 1 [m/s]. Tak duża zmienność stałej A powoduje małą dokładność pomiarów. Chcąc zwiększyć dokładność pomiarów psychrometrem należy prędkość przepływu powietrza wokół czujnika termometru mokrego zwiększyć do poziomu, przy którym krzywa $A = f(v)$ ma dostatecznie płaski przebieg.

3.2.1. Psychrometr Augusta

Psychrometr Augusta (rys. 5) zbudowany jest z dwóch termometrów umocowanych na wspólnym statywie, z których jeden owinięty jest tkaniną (koszulką), która stale jest zwilżana wodą destylowaną pobieraną ze zbiorniczka.

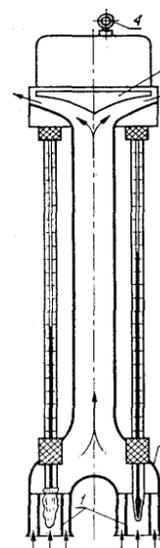
Ruch powietrza wokół termometrów nie jest unormowany, wynika on z konwekcji naturalnej cząstek powietrza. Zakłada się, że szybkość przepływu powietrza wokół termometru mokrego wynosi około $v = 0,5$ m/s, toteż psychrometr ten nadaje się tylko do pomiarów orientacyjnych. Przy niesprzyjających warunkach błędy pomiaru mogą dochodzić do 15%.



Rys. 5. Psychrometr Augusta:
1 – termometr suchy, 2 – termometr mokry, 3 – naczynie z wodą destylowaną, 4 – tkanina zwilżająca

3.2.2. Psychrometr Assmanna

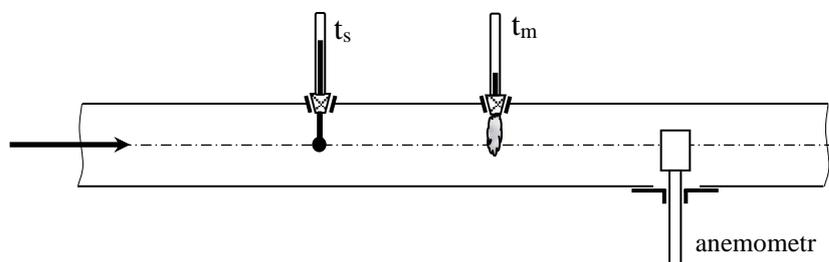
Psychrometr ten w odróżnieniu od psychrometru Augusta posiada wymuszony przepływ powietrza. W psychrometrze Assmanna czujniki termometrów suchego i mokrego zostały umieszczone w dwóch gałęziach wlotowych rury, przez którą przepływa badane powietrze, zasysane wentylatorem. Prędkość przepływu powietrza jest zawsze jednakowa i wynosi około 2,5 m/s. Każda z gałęzi wlotowych, w których umieszczono czujniki termometrów ma postać dwóch koncentrycznych tulei metalowych dokładnie wypolerowanych z zewnątrz dla zabezpieczenia przed szkodliwym wpływem promieniowania na wyniki pomiarów. Psychrometry te są przyrządami bardzo dokładnymi.



Rys. 6. Psychrometr Assmanna:
1 – tulejki do zasysania powietrza;
2 – osłona; 3 – wentylator;
5 – termometr wilgotny (mokry);
6 – termometr suchy

3.3.3. Pomiar wilgotności powietrza w kanale

W technice często zachodzi potrzeba zmierzenia wilgotności względnej powietrza, płynącego z pewną stałą prędkością wewnątrz kanału. Sposób pomiaru przedstawiony jest schematycznie na rys. 7.



Rys. 7. pomiar wilgotności powietrza w kanale

Należy pamiętać o tym, aby gaza termometru mokrego była cały czas wilgotna (w czasie pomiaru należy ją zwilżać lub zaopatrzyć termometr w zbiorniczek wody destylowanej). Dodatkowo należy jeszcze zmierzyć prędkość powietrza w kanale (jednym ze znanych sposobów).

4. Wyznaczanie wilgotności względnej powietrza na podstawie wskazań psychrometrów

Znając odczyty termometrów suchego i mokrego można wyznaczyć wilgotność na trzy sposoby:

4.1. Za pomocą wzoru Sprunga

W tym przypadku trzeba znać ciśnienie barometryczne w chwili pomiaru lub przyjąć wartość średnią dla Polski, która wynosi $p_b = 745 \text{ mmHg}$. Ciśnienia nasycenia pary wodnej p_{ss} i p_{sm} odczytujemy z tablic par nasyconych lub wykresu $i-x$.

Wartość stałej psychrometrycznej A obliczamy ze wzoru nr 9 przyjmując odpowiednio prędkości powietrza dla:

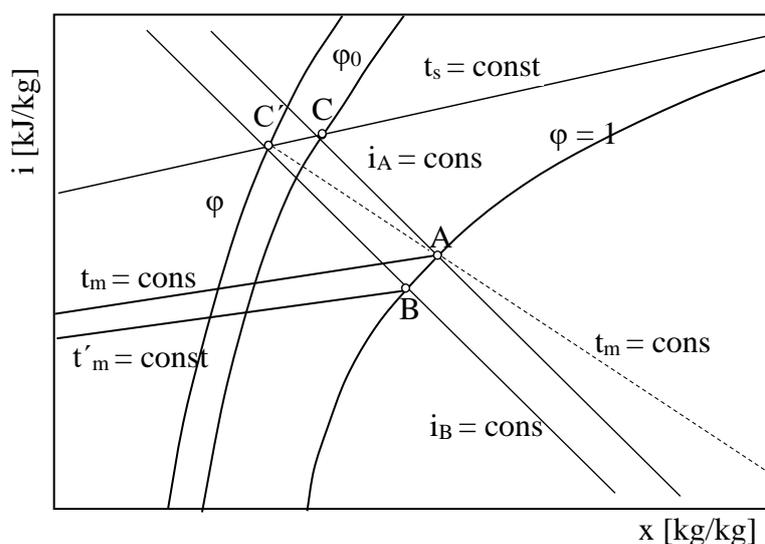
- psychrometru Augusta $v = 0,5 \text{ m/s}$,
- psychrometru Assmanna $v = 2,5 \text{ m/s}$.

4.2. Za pomocą gotowych tablic lub wykresów psychrometrycznych

W przypadku psychrometru Augusta korzystamy z wykresu psychrometrycznego dla prędkości powietrza $v = 0,46 \text{ m/s}$ zamieszczonego w załączniku nr 2. W zwykłych warunkach przy braku przewiewu, błędy pomiaru nie przekraczają kilku procent. Przy posługiwaniu się psychrometrem Assmanna korzystamy z wykresu obliczonego dla szybkości powietrza $v = 2,5 \text{ m/s}$ zamieszczonego w załączniku nr 2.

4.3. Za pomocą wykresu Molliera $i-x$

Jeżeli na wykresie nie ma izoterm obszaru mgły, to wilgotność φ znajdujemy następująco. Powietrze otaczające czujnik termometru mokrego jest nasycone parą i posiada temperaturę t_m . Na wykresie punktem określającym stan tego powietrza jest punkt przecięcia izoterm $t_m = \text{const}$ z krzywą $\varphi = 1$, oznaczony na rys. 8 przez A. Zakładając, że zmiana stanu powietrza otaczającego koszulkę termometru mokrego zachodzi adiabatycznie, można poprowadzić przez punkt A izentalpę aż do przecięcia izoterm $t_s = \text{const}$, otrzymując punkt C, który określa stan otaczającego powietrza (wilgotność względną φ_0).



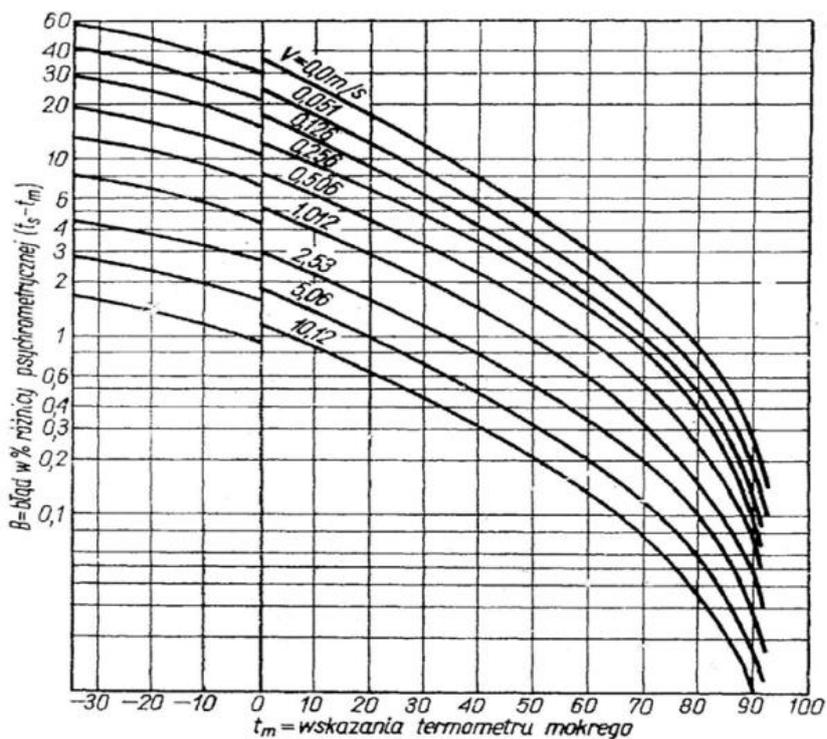
Rys. 8. Wyznaczanie wilgotności względnej wg wskazań psychrometru na wykresie $i-x$

Ze względu na to, że założenie adiabatycznej przemiany powietrza nie jest ścisłe oraz ze względu na niedokładność procesu wymiany ciepła termometr mokry wskazuje zawsze temperaturę wyższą od temperatury zupełnego nasycenie powietrza. Ten fakt powoduje to, iż znaleziona wilgotność φ_0 jest obarczona pewnym błędem (błąd ten nie występuje przy wyznaczeniu wilgotności za pomocą dwóch wcześniejszych metod).

Istnieje możliwość dokładnego odczytu, ale należy znaleźć błąd wskazań termometru mokrego. W tym celu należy posłużyć się wykresem błędów termometru mokrego (Rys. 9). Po odczytaniu z wykresu wartości błędu B%, właściwą temperaturę nasycenia powietrza w warstwie granicznej t'_m obliczamy z następującego wzoru:

$$t'_m = t_m = \frac{B}{100}(t_s - t_m) \quad (12)$$

Następnie postępujemy analogicznie określając stan powietrza przez punkt C' i odczytując rzeczywistą wilgotność względną powietrza φ .



Rys. 9. Wykres błędów dla wskazań psychrometrów

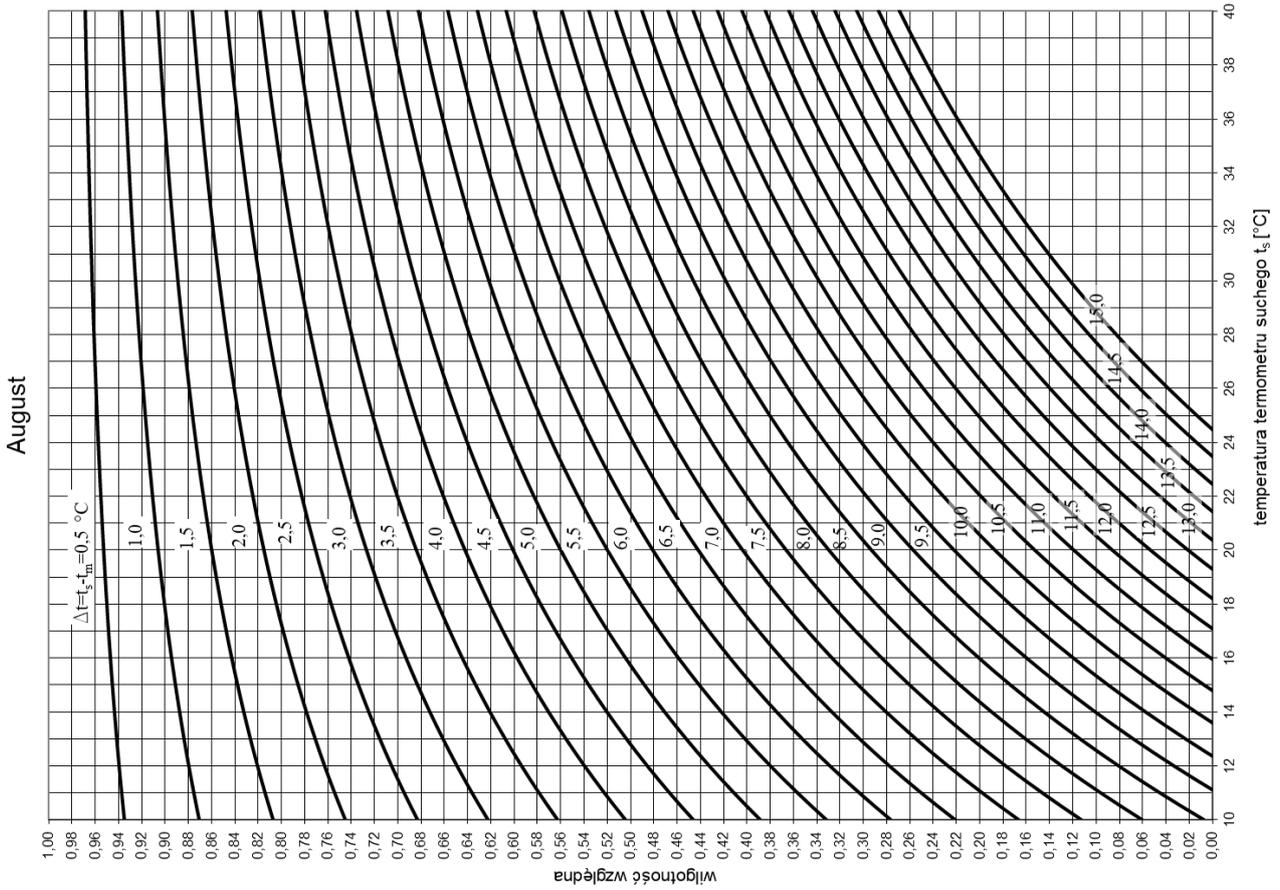
5. Przebieg ćwiczenia i metodyka pomiaru

Pomiar wilgotności powietrza zostanie przeprowadzony za pomocą trzech przyrządów: higrometru włosowego, psychrometru Augusta i Assmanna.

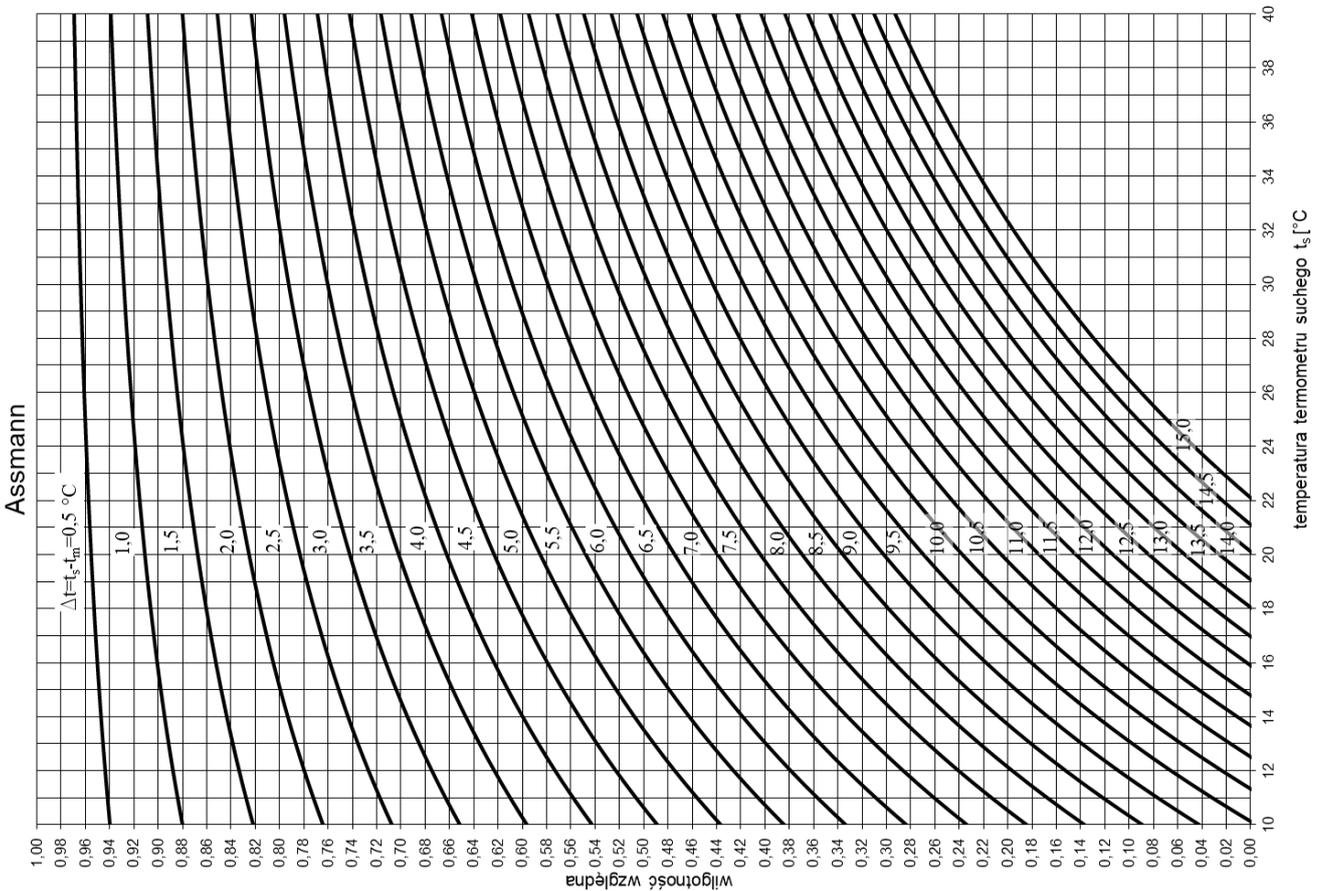
Przed przystąpieniem do pomiaru za pomocą higrometru włosowego należy sprawdzić poprawność jego wskazań. Dokonujemy tego poprzez umieszczenie czujnika tego higrometru w powietrzu nasyconym (wilgotności $\phi = 100\%$) i ewentualne skorygowanie jego wskazań.

Przystępując do pomiarów za pomocą psychrometrów należy wcześniej zwilżyć koszulki termometrów mokrych wodą destylowaną. Po wykonaniu tych czynności należy poczekać do ustalenia się wskazań. Gdy to nastąpi dokonać 5 odczytów temperatury w odstępach 1 minuty i uzyskane wyniki wpisać do tabeli pomiarowych. Odczytujemy także wartość ciśnienia barometrycznego.

ZAŁĄCZNIK nr 2



Rys. 11. Wykres psychrometryczny dla $v=0,46$ [m/s]



Rys. 12. Wykres psychrometryczny dla $v=2,5$ [m/s]