

Chłodzenie adiabatyczne i posługiwanie się wykresem i-x dla powietrza wilgotnego

Powietrze wilgotne i parametry jego stanu

Powietrze wilgotne (zawierające pewną ilość pary wodnej) odgrywa niezwykle istotną rolę w systemach chłodniczych, wentylacyjnych czy klimatyzacyjnych. W celu zapewnienia warunków komfortu w chłodzonym/wentylowanym czy klimatyzowanym pomieszczeniu powietrze w nim musi zostać odpowiednio przygotowane (musi ulec odpowiednim przemianom) tak, aby jego parametry odpowiadały wymogom wynikającym z przeznaczenia takiego pomieszczenia.

Parametry stanu powietrza wilgotnego

- Temperatura – wyrażona w K lub °C;
- Ciśnienie – wyrażona w Pa lub bar. Ciśnienie powietrza wilgotnego jest, zgodnie z prawem Daltona, sumą ciśnień parcjalnych pary wodnej p_w i powietrza suchego p_s :

$$p = p_s + p_w$$

- Wilgotność bezwzględna – definiowana jako stosunek ilości wody m_w (wyrażony w gramach) do 1 kg powietrza suchego m_s , co można zapisać w postaci:

$$x = m_w/m_s \text{ [g/kg]}$$

Im większa jest zawartość pary wodnej w powietrzu wilgotnym x , tym większe jest ciśnienie parcjalne pary wodnej p_w .

- Wilgotność względna – maksymalna zawartość pary wodnej w powietrzu zależy od temperatury oraz ciśnienia. Im wyższa temperatura oraz ciśnienie, tym więcej pary wodnej może znajdować się w powietrzu. Jeżeli w powietrzu znajduje się ta maksymalna ilość pary wodnej, to mówimy, że powietrze znajduje się w stanie nasycenia, a wilgotność względna φ wynosi 100%. Załóżmy, że przy pewnym ciśnieniu i temperaturze maksymalna zawartość pary wodnej w powietrzu wynosi $x_s = 10 \text{ g/kg}$. Jeżeli jednak powietrze to w rzeczywistości zawiera tylko $x = 5 \text{ g/kg}$ pary wodnej, to wilgotność względna wynosi tylko 50%. Wilgotność względna definiowana jest więc jako:

$$\varphi = x/x_s$$

Gdzie: x – zawartość wilgoci w powietrzu [g/kg], x_s – zawartość pary wodnej w powietrzu w stanie nasycenia [g/kg].

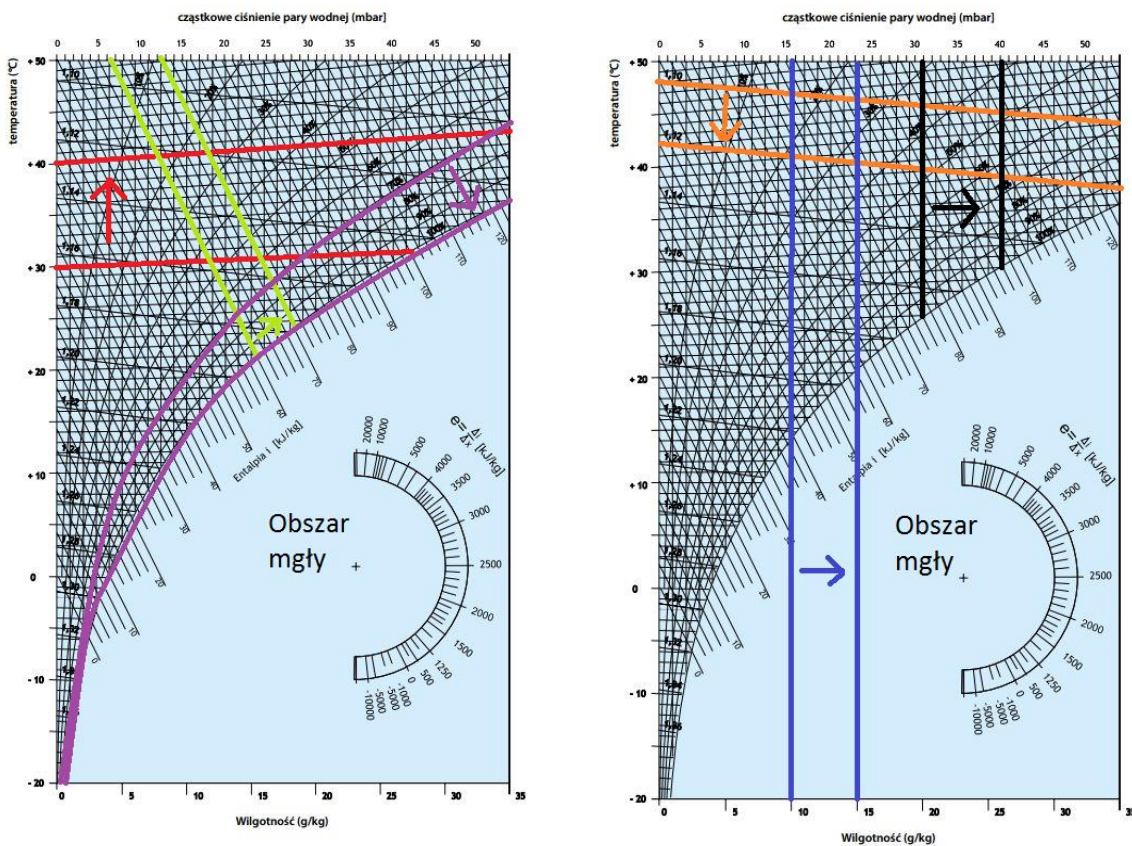
- Gęstość – jest to stosunek masy powietrza wilgotnego do jego objętości. Wyrażany jest w kg/m^3 . Gęstość suchego powietrza przy temperaturze 0 °C wynosi $1,29 \text{ kg/m}^3$, a pary wodnej $0,8 \text{ kg/m}^3$.
- Pojemność cieplna – wyrażana jest w kJ/kgK . Dla powietrza suchego $c_{p,s} = 1 \text{ kJ/kgK}$, a powietrza wilgotnego $c_{p,w} = 1,86 \text{ kJ/kgK}$.
- Entalpia – różnica entalpii jest wielkością niezbędną do obliczania ilości ciepła, którą należy dostarczyć do powietrza wilgotnego w czasie jego przemiany termodynamicznej. Entalpia powietrza wilgotnego może być obliczana z następującej zależności:

$$h(t) = c_{p,s}t + x(c_{p,w}t + r)$$

Gdzie: t – temperatura w °C, r – ciepło parowania pary wodnej $2,45 \text{ kJ/kg}$.

Budowa wykresu i-x

W celu zmiany parametrów stanu powietrza wilgotnego może ono podlegać przemianie ogrzewania, ochładzania, nawilżania lub usuwania wilgoci. Zarówno początkowe jak i końcowe parametry stanu powietrza wraz z krzywą obrazującą przebieg przemiany można przedstawić na wykresie i-x (psychrometrycznym, nazywany także wykresem Moliera). Wykresy te generowane są dla konkretnych ciśnień p – najczęściej spotykane są wykresy dla ciśnienia równego ciśnieniu atmosferycznemu. Przebieg charakterystycznych krzywych na wykresie przedstawiono na Rysunku 1. Kolorem czerwonym zaznaczono izotermę, fioletowym linie stałej wilgotności względnej, zielonym izentalpę, niebieskim linie stałej wilgotności bezwzględnej x , pomarańczowym linie stałej gęstości, a czarnym linie stałego ciśnienia parcyjnego pary wodnej. Strzałkami zaznaczono kierunek wzrostu wartości danej wielkości.



Rysunek 1. Budowa wykresu i-x.

Przemiany powietrza wilgotnego

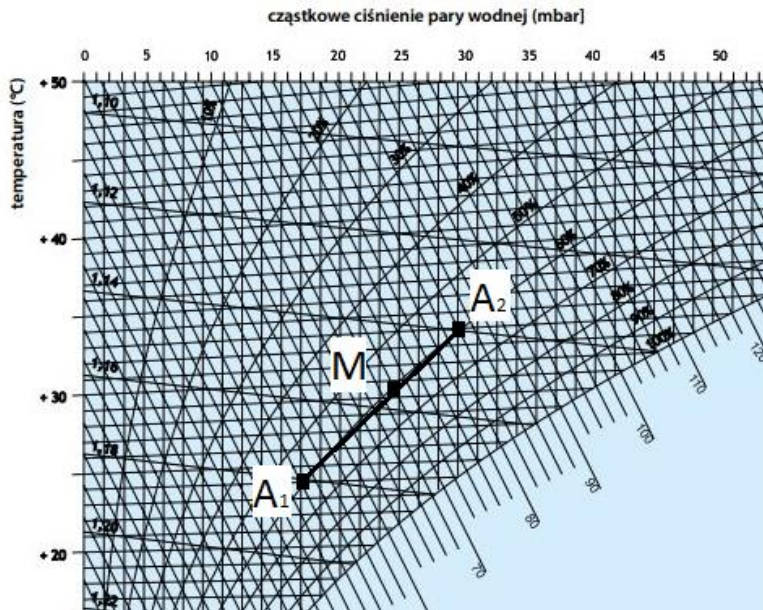
Mieszanie

W wyniku mieszania dwóch strumieni powietrza wilgotnego \dot{m}_1 i \dot{m}_2 znajdujących się w stanie A_1 i A_2 uzyskuje się strumień powietrza wilgotnego o strumieniu masowym:

$$\dot{m}_m = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

Parametry stanu wynikowego strumienia ciepła M można wyznaczyć posługując się regułą dźwigni (Rysunek 2):

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{|MA_2|}{|A_1M|}$$



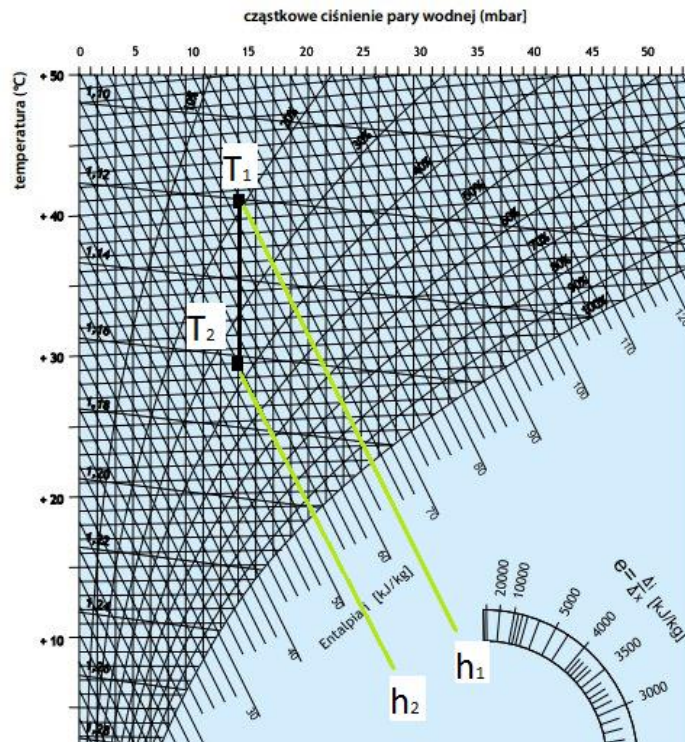
Rysunek 2. Mieszanie dwóch strumieni powietrza wilgotnego.

Ogrzewanie

Ilość ciepła, które należy dostarczyć do powietrza wilgotnego o strumieniu masowym \dot{m} , aby je ogrzać od temperatury T_2 do temperatury T_1 wynosi:

$$\dot{Q}_{2-1} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

Sposób wyznaczania entalpii h_1 i h_2 z wykresu i-x przedstawiono na Rysunku 3. W czasie tego procesu nie dochodzi do wykroplenia wilgoci (wilgotność bezwzględna x pozostaje bez zmian).



Rysunek 3. Ogrzewanie powietrza.

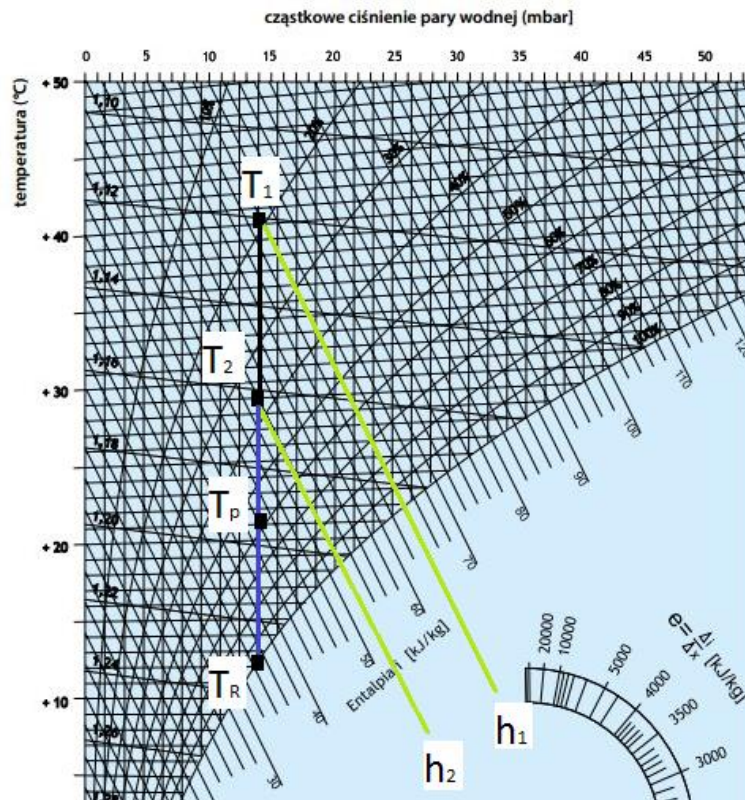
Chłodzenie powietrza

Chłodzenie powietrza wilgotnego może się odbywać na dwa sposoby:

- Chłodzenie powierzchniowe,
- Chłodzenie wyparnej (adiabatycznej).

W chłodzeniu powierzchniowym bez wykroplenia wilgoci powietrze obniża swoją temperaturę od T_1 do T_2 na skutek kontaktu z powierzchnią o temperaturze T_p niższej od temperatury początkowej tego powietrza, ale wyższej od temperatury punktu rosy T_R . Temperatura punktu rosy jest to temperatura, przy której powietrze o danej wilgotności bezwzględnej x osiąga stan nasycenia $\varphi = 100\%$. Na wykresie $i-x$ wyznacza się tę temperaturę poprzez poprowadzenie linii stałej zawartości wilgoci x od punktu opisującego stan powietrza wilgotnego do krzywej $\varphi = 100\%$ (Rysunek 4). Obniżanie temperatury powietrza poniżej temperatury punktu rosy powoduje, że powietrze wkracza w obszar mgły – w powietrzu zawieszane są krople wody.

Ilość ciepła odbieranego w tym procesie liczy się w taki sam sposób jak w procesie ogrzewania. Podczas tego typu chłodzenia nie dochodzi do wykroplenia wilgoci.

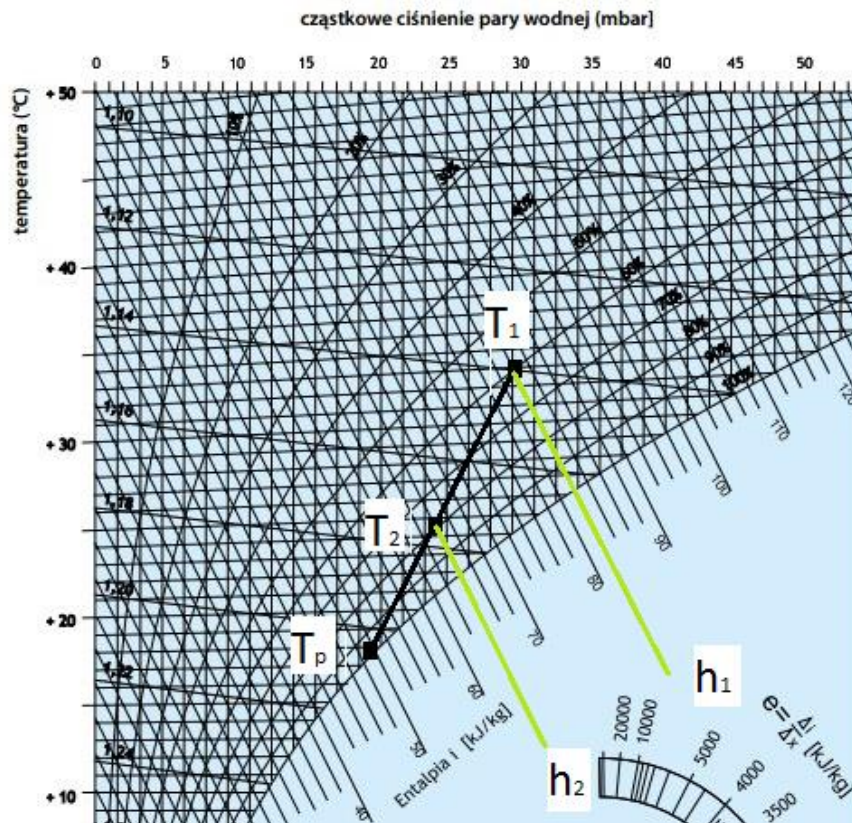


Rysunek 4. Powierzchniowe chłodzenie powietrza. Temperatura powierzchni niższa niż temperatura punktu rosy.

W chłodzeniu powierzchniowym z wykropleniem wilgoci powietrze obniża swoją temperaturę od T_1 do T_2 na skutek kontaktu z powierzchnią o temperaturze T_p niższej zarówno od temperatury

początkowej tego powietrza jak i temperatury punktu rosy T_R . W wyniku tej przemiany powstaje mieszanina:

- Powietrza schłodzonego
- Powietrza schłodzonego oraz osuszonego (na powierzchni dojdzie do wykroplenia wilgoci, więc powietrze w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni zostanie nie tylko schłodzone, ale i wysuszone).

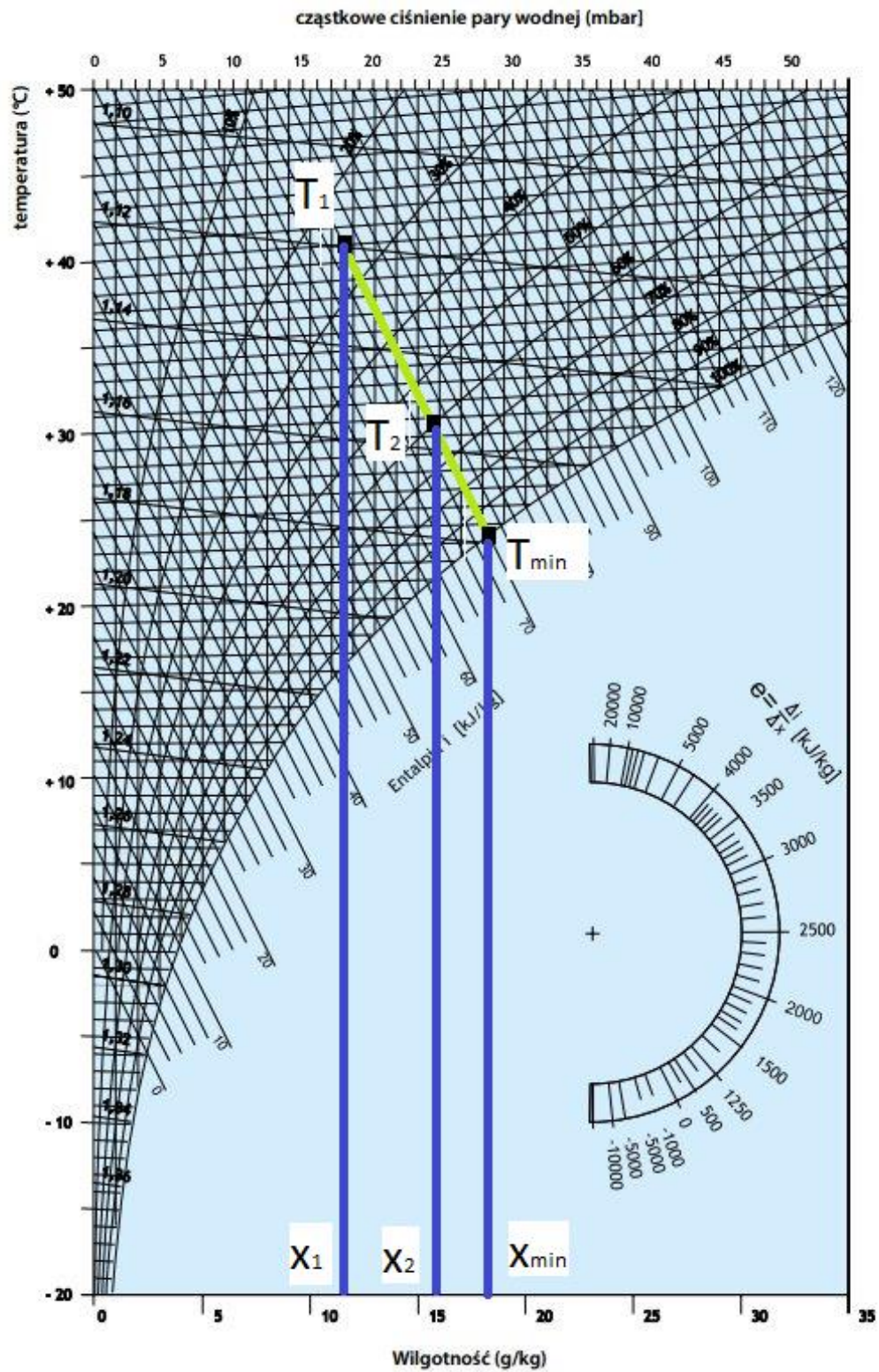


Rysunek 5. Chłodzenie powierzchniowe z wykropleniem wilgoci.

Chłodzenie adiabatyczne (nawilżanie)

W tej sekcji omówione zostanie nawilżanie powietrza wodą. Oprócz wody można również stosować parę wodną.

Chłodzenie adiabatyczne przebiega w komorze zraszania, gdzie woda jest rozpylana nad strumieniem przepływającego powietrza. Woda odparowuje kosztem energii pobranej od powietrza. W konsekwencji temperatura powietrza spada od T_1 do T_2 a jego wilgotność bezwzględna x rośnie. Należy jednak zwrócić uwagę, że w tym procesie do układu powietrze-woda nie jest dostarczane ciepło z zewnątrz – proces przebiega więc adiabatycznie. Najniższa temperatura T_{min} , która może być uzyskana w procesie chłodzenia adiabatycznego wyznacza się na przecięciu izentalpy, po której przebiega proces z krzywą $\varphi = 100\%$ (Rysunek 6).



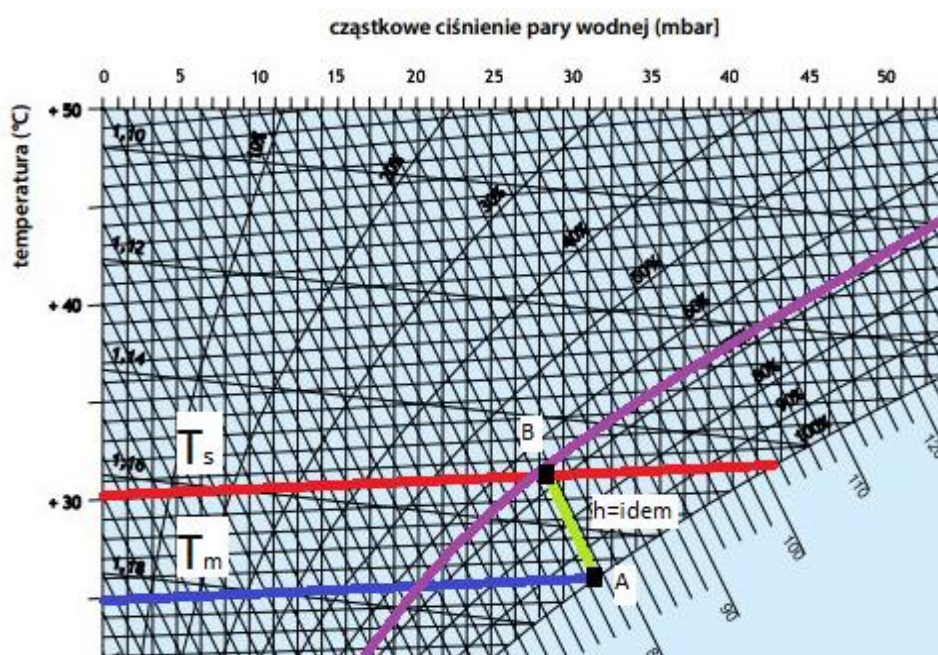
Rysunek 6. Chłodzenie adiabatyczne.

Sprawność procesu nawilżania definiowana jest jako:

$$\eta = \frac{x_2 - x_1}{x_{min} - x_1}$$

Pomiar wilgotności względnej

Najczęściej pomiaru wilgotności względnej dokonuje się przy pomocy psychrometru Assmanna lub Augusta. Zasada pomiaru dla obu psychrometrów jest taka sama. W ich skład wchodzi 2 termometry – jeden z nich jest wykorzystywany do pomiaru temperatury badanego powietrza (jest to tzw. termometr suchy T_s), a czujnik drugiego termometru znajduje się w otulinie nasączonej wodą destylowaną (tzw. termometr mokry T_m). Przyjmuje się, że powietrze w otoczeniu czujnika termometru mokrego znajduje się w stanie nasycenia $\varphi = 100\%$ na skutek odparowania wody z otuliny do otaczającego powietrza (proces ten odbywa się bez dostarczenia ciepła do układu powietrza i wody destylowanej, więc przebiega wg przemiany $h=\text{idem}$). Sposób odczytu tak zmierzonej wilgotności względnej przedstawiono na Rysunku 7. W pierwszym kroku szukamy punktu przecięcia izoterm T_m z krzywą $\varphi = 100\%$ - otrzymujemy punkt A. Z tego punktu prowadzimy izentalpę aż do przecięcia z izotermą T_s – otrzymujemy punkt B. Krzywa wilgotności względnej, na której leży punkt B wyznacza wilgotność względną powietrza, które podlegało pomiarom.



Rysunek 7. Wyznaczanie wilgotności względnej powietrza na podstawie pomiaru psychrometrem.

W przypadku psychrometru Assmanna przepływ powietrza wokół termometrów jest wymuszony (prędkość powietrza wynosi ok. 2,5 m/s), co zwiększa dokładność pomiaru w stosunku do psychrometru Augusta, gdzie przepływ powietrza wokół termometrów wywołany jest konwekcją naturalną.

Cel i przebieg ćwiczenia

Celem zajęć jest pomiar parametrów stanu powietrza wilgotnego podlegającego chłodzeniu adiabatycznemu.

Podczas ćwiczenia należy zmierzyć temperaturę oraz wilgotność względną φ powietrza na wlocie i wylocie komory zraszania. Należy wyznaczyć również strumień masowy powietrza wilgotnego przepływającego przez komorę. W tym celu należy dokonać pomiaru prędkości wypływu powietrza oraz zmierzyć pole przekroju poprzecznego kanału wylotowego. Ponadto należy zmierzyć temperaturę wody wykorzystywanej do zraszania na wlocie i wylocie do komory.

W sprawozdaniu należy na podstawie wykonanych pomiarów przedstawić stan powietrza na wlocie i wylocie komory na wykresie i-x. Następnie należy odczytać z wykresu entalpie powietrza w stanie początkowym i końcowym przemiany. Na podstawie odczytanych wartości entalpii oraz obliczonego strumienia masowego powietrza należy obliczyć ilość ciepła odebranego od powietrza. Do sprawozdania należy dołączyć wykres i-x z naniesionymi punktami opisującymi stan powietrza na początku i końcu przemiany.

Pytania kontrolne

1. Powietrze wilgotne jest cięższe czy lżejsze od powietrza suchego? Odpowiedź uzasadnij.
2. Omów budowę wykresu i-x.
3. Omów podstawowe przemiany powietrza wilgotnego na wykresie i-x.

Literatura

Leon Kołodziejczyk, Marian Rubik: „Technika chłodnicza w klimatyzacji”, Warszawa, 1976.

Wykres i-x został zaczerpnięty ze strony: <http://www.vents-group.pl/>.