

**KATEDRA SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH
i
URZĄDZEŃ OCHRONY ŚRODOWISKA**

Termodynamika

LABORATORIUM

PRZEMIANY POWIETRZA WILGOTNEGO

Opracował:
dr inż. Jerzy Wojciechowski
mgr inż. Tomasz Kuś

AGH

**WIMiR
KRAKÓW**

KSEiUOŚ

Ćwiczenie

Temat: PRZEMIANY POWIETRZA WILGOTNEGO

Cel ćwiczenia: Celem ćwiczenia jest określenie podstawowych parametrów powietrza wilgotnego oraz analiza procesu izobarycznego nawilżania.

1. Podstawy teoretyczne

Gazem wilgotnym nazywamy roztwór gazów, w którym jeden ze składników mieszaniny gazowej może ulegać przemianom fazowym podczas procesów termodynamicznych. Gaz wilgotny jest to roztwór gazu suchego (nieulegającego przemianom fazowym) i pary.

Gaz wilgotny nienasycony jest roztworem pary przegrzanej i gazu suchego. **Gaz wilgotny nasycony** jest roztworem pary nasyconej suchej i gazu suchego. **Gaz wilgotny przesycony** to roztwór pary wilgotnej, mgły ciekłej lub lodowej i gazu suchego. Wilgotność gazu może być powodowana parą dowolnego czynnika, najczęściej jednak w roztworach występuje para wodna.

Jeżeli ciśnienie gazu suchego i ciśnienie cząstkowe pary jest niskie to gaz wilgotny można traktować jak roztwór gazów doskonałych. Obowiązuje wówczas dla gazu wilgotnego prawo Daltona:

$$p = p_g + p_p \quad (1)$$

gdzie

p – ciśnienie gazu wilgotnego,
 p_g – ciśnienie cząstkowe gazu suchego,
 p_p – ciśnienie cząstkowe pary.

W wilgotnym gazie ilość zawartej w nim pary jest ograniczona. Jeżeli przy stałym ciśnieniu p gazu wilgotnego obniżamy jego temperaturę, to gaz wilgotny nienasycony staje się nasycony po osiągnięciu **temperatury rosy** T_R – temperatury nasycenia pary przy jej ciśnieniu składnikowym p_p . Ciśnienie składnikowe p_p pary jest równe ciśnieniu nasycenia p_s . Jest to maksymalna wartość ciśnienia cząstkowego, jakie może osiągnąć para zawarta w wilgotnym gazie przy niezbyt wysokim ciśnieniu gazu.

$$p_{pmax} = p_s \quad (p_s \leq p) \quad (2)$$

Ciśnienie nasycenia pary rośnie ze wzrostem temperatury, nie może jednak przekroczyć sumarycznego ciśnienia gazu wilgotnego. Maksymalne ciśnienie składnikowe pary w wilgotnym gazie wynosi:

$$p_{pmax} = p \quad (p_s \geq p) \quad (3)$$

Wilgotność gazu może być opisana przez; wilgotność bezwzględną, wilgotność względną oraz stopień zawilżenia.

Wilgotnością bezwzględną (wilgocią) ρ_p nazywamy stosunek masy pary M_p do objętości V gazu wilgotnego:

$$\rho_p = \frac{M_p}{V} \quad (4)$$

Po zastosowaniu równania Clapeyrona dla pary ($p_p V = M_p R_p T$) w równaniu (4), zależność na wilgotność bezwzględną przyjmuje postać:

$$\rho_p = \frac{P_p}{R_p T} \quad (4a)$$

R_p – indywidualna stała gazowa dla pary [J/kgK],

T – temperatura gazu wilgotnego, [K],

p_p – ciśnienie cząstkowe pary, [Pa].

Wilgotność bezwzględna jest gęstością pary przy jej ciśnieniu cząstkowym p_p i temperaturze gazu wilgotnego. Wilgotność bezwzględna jest maksymalna, gdy ciśnienie cząstkowe pary osiąga wartość ciśnienia nasycenia $p_p = p_s$ i równa jest gęstości pary nasyconej:

$$\rho_{p_{\max}} = \rho_p'' = \frac{P_s}{R_p T} \quad (5)$$

Wilgotność względna gazu φ jest stosunkiem wilgotności bezwzględnej ρ_p do maksymalnej wilgotności bezwzględnej ρ_p'' przy tej samej temperaturze. Może być również wyrażona jako stosunek odpowiednich ciśnień składnikowych p_p i $p_{p_{\max}}$ przy tej samej temperaturze:

$$\varphi = \left(\frac{\rho_p}{\rho_p''} \right)_T = \left(\frac{P_p}{P_{p_{\max}}} \right)_T \quad (6)$$

Jeżeli spełnione jest równanie (2) to wilgotność względna gazu jest określona zależnością:

$$\varphi = \left(\frac{P_p}{P_s} \right)_T \quad (6a)$$

przyjmującą wartości od zera do jeden. Często jest również wyrażana w procentach.

Stopień zawilżenia gazu X jest to stosunek ilości wilgoci do ilości gazu suchego. Do określenia stopnia zawilżenia gazu brana jest całkowita ilość wilgoci w gazie, czyli ilość pary lotnej i skondensowanej (w postaci mgły ciekłej lub lodowej):

$$X = \frac{M_p}{M_g} \quad [\text{kg pary/kg gazu suchego}] \quad (7)$$

gdzie: M_p – całkowita masa wilgoci w gazie,

M_g – masa gazu suchego.

Jeżeli gaz wilgotny nie zawiera mgły (gaz wilgotny nienasycony) to stopień zawilżenia można wyznaczyć z następujących zależności:

- na podstawie gęstości pary i gazu suchego:

$$X = \frac{\rho_p}{\rho_g} \quad (8a)$$

- na podstawie równania Clapeyrona dla pary $\frac{P_p}{\rho_p} = R_p T$ i gazu suchego $\frac{P_g}{\rho_g} = R_g T$:

$$X = \frac{R_g \cdot P_p}{R_p \cdot P_g} = \frac{\mu_p P_p}{\mu_g P_g} \quad (8b)$$

Uwzględniając w równaniu (8b) prawo Daltona (1) oraz relację na wilgotność względną (6a) uzyskujemy zależność:

$$X = \frac{\mu_p P_p}{\mu_g (p - p_p)} = \frac{\mu_p}{\mu_g} \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s} \quad (8c)$$

Dla wilgotnego gazu przesyconego, zawilżenie fazą skondensowaną X_k wyznacza się uwzględniając zawilżenie dla nasycenia $\varphi = 1$:

$$X_k = X - X'' \quad (9)$$

gdzie stopień wilgoci gazu nasyconego:

$$X'' = \frac{\mu_p}{\mu_g} \frac{p_s}{p - p_s} \quad (10)$$

Molowy stopień zawilżenia X_z , definiowany jest jako stosunek ilości kmoli wilgoci do ilości kmoli gazu suchego:

$$X_z = \frac{n_p}{n_g} \text{ [kmol pary/kmol gazu suchego]} \quad (11)$$

Dla molowego stopnia zawilżenia równanie (8c) przekształca się do postaci:

$$X_z = \frac{P_p}{p - P_p} = \frac{\varphi P_s}{p - \varphi P_s} \quad (12)$$

Zawartość wilgoci w gazie odnosi się do jednostki gazu suchego. Jest to dogodne, ponieważ ilość gazu suchego nie ulega zmianie w przemianach gazu wilgotnego. Tworząc wielkości właściwe (i, u, \dots), gazu wilgotnego odnosi się je do takiej jego ilości, która zawiera 1 kg lub 1 kmol gazu suchego. Jednostką gazu wilgotnego jest więc $(1 + X)$ kg lub $(1 + X_z)$ kmol gazu. Równanie Clapeyrona dla gazu wilgotnego możemy zapisać w postaci:

$$pV = M_g (1 + X) RT \quad (13)$$

W równaniu (13) występuje zastępcza stała gazowa R gazu wilgotnego. Wartość jej wyznacza się z zależności:

$$R = \frac{R_g + X \cdot R_p}{1 + X} \quad (14)$$

Gęstość gazu wilgotnego jest równa sumie gęstości gazu suchego i pary przy ich ciśnieniach cząstkowych:

$$\rho = \rho_g + \rho_p \quad (15)$$

Po zastosowaniu równania Clapeyrona dla gazu suchego i pary równanie (15) przyjmuje postać:

$$\rho = \left(\frac{p_g}{R_g} + \frac{p_p}{R_p} \right) \frac{1}{T} = \frac{p_g}{R_g T} (1 + X) \quad (16)$$

Gęstość gazu wilgotnego nienasyconego, po uwzględnieniu równania Clapeyrona, prawa Daltona i wzoru (6a), określa równanie:

$$\rho = \frac{p - \varphi \cdot p_s}{R_g T} + \varphi \cdot \rho_p'' \quad (17)$$

Masę odniesienia dla wielkości właściwych stanowi $(1+X)$ kg gazu wilgotnego. Entalpię właściwą $(1+X)$ kg gazu wilgotnego wyznacza się z zależności:

$$i_{1+X} = i_g + X \cdot i_p \quad (18)$$

Dla gazu wilgotnego nienasyconego i nasyconego relację (18) można zapisać w postaci:

$$i_{1+X} = c_{pg}(T - T_0) + X[r_0 + c_{pp}(T - T_0)] \left[\frac{\text{kJ}}{(1+X)\text{kg}} \right] \quad (19)$$

gdzie:

c_{pg}, c_{pp} – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu odpowiednio dla gazu suchego i pary, [kJ/kgK]

T_0 – temperatura odniesienia, [K]

r_0 – ciepło parowania w stanie odniesienia o temperaturze T_0 , [kJ/kg]

Entalpia $(1 + X)$ kg gazu wilgotnego przesyconego z mgłą ciekłą wyznacza się z relacji:

$$i_{1+X} = c_{pg}(T - T_0) + X''[r_0 + c_{pp}(T - T_0)] + (X - X'')c_c(T - T_0) \quad (20)$$

gdzie: c_c – ciepło właściwe mgły ciekłej

Entalpia $(1 + X)$ kg gazu wilgotnego przesyconego z mgłą lodową wyznacza się z relacji:

$$i_{1+X} = c_{pg}(T - T_0) + X''[r_0 + c_{pp}(T - T_0)] - (X - X'')[q_t - c_s(T - T_0)] \quad (21)$$

gdzie: q_t – ciepło topnienia,

c_s – ciepło właściwe fazy stałej.

Entalpię I gazu wilgotnego, znając i_{1+X} , można obliczyć ze wzoru:

$$I = M_g \cdot i_{1+X} \quad [\text{J}] \quad (22)$$

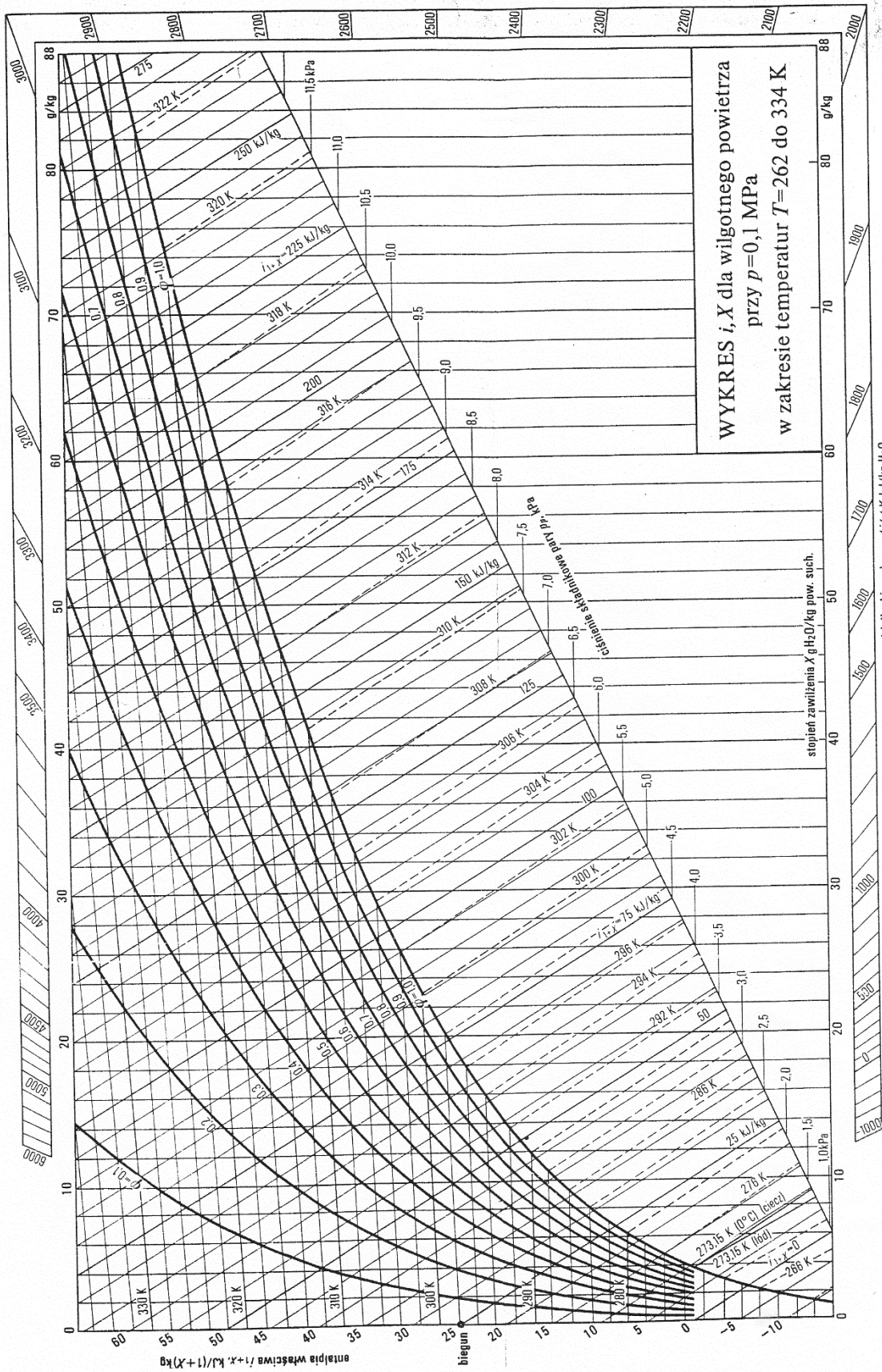
Energię wewnętrzną gazu wilgotnego obliczamy wykorzystując równanie Gibbsa:

$$u_{1+X} = i_{1+X} - p \cdot v_{1+X} \quad (23)$$

Objętość właściwą gazu wilgotnego v_{1+X} we wzorze (23) określa relacja:

$$v_{1+X} = v \cdot (1 + X) = R_p \left(\frac{R_g}{R_p} + X \right) \frac{T}{p} \left[\frac{\text{m}^3}{(1+X)\text{kg}} \right] \quad (24)$$

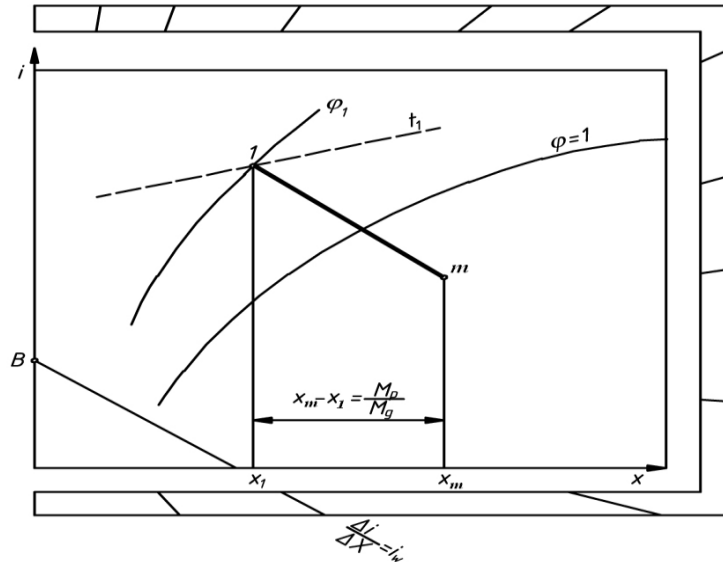
Jeżeli gazem wilgotnym jest powietrze zawilgocone wodą to za stan odniesienia przyjmuje się punkt potrójny wody $T_{Tr} = 273,16$ K. Przy niewielkich zmianach temperatury, ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu można przyjąć jako stałe: $c_{pg} = 1,005$ kJ/(kgK), $c_{pp} = 1,86$ kJ/(kgK), $c_c = 4,19$ kJ/(kgK), $c_s = 2,09$ kJ/(kgK). Ciepło parowania wody $r_0 = 2501$ kJ/kg, oraz ciepło topnienia lodu $q_t = 334,1$ kJ/kg.



Rys. 1. Wykres Molliera dla powietrza wilgotnego

2. Nawilżanie powietrza wilgotnego wodą ciekłą i parą wodną.

Analizowany jest proces, w którym do strumienia wilgotnego powietrza ($\dot{M}_{g1}, i_{(1+X)1}, T_1, X_1$) doprowadzany jest strumień wody ciekłej lub pary wodnej (\dot{M}_w, i_w, T_w). W wyniku zmieszania otrzymujemy jednorodny roztwór ($\dot{M}_{gm}, i_{(1+X)m}, T_m, X_m$) (rys. 2.). W tym procesie ilość suchego powietrza nie ulega zmianie ($\dot{M}_{g1} = \dot{M}_{gm}$), zmienia się ilość wilgoci.



Rys. 2. Proces nawilżania powietrza wodą ciekłą lub parą.

Bilans wilgoci ma postać:

$$\dot{M}_{g1}X_1 + \dot{M}_w = \dot{M}_{gm}X_m = \dot{M}_{g1}X_m \quad (25)$$

Bilans energii:

$$\dot{M}_{g1}i_{(1+X)1} + \dot{M}_w i_w = \dot{M}_{g1}i_{(1+X)m} \quad (26)$$

Wyznaczając z tych równań stosunek strumienia wody do strumienia gazu suchego otrzymujemy równanie:

$$\frac{\dot{M}_w}{\dot{M}_{g1}} = X_m - X_1 = \frac{i_{(1+X)m} - i_{(1+X)1}}{i_w} \quad (27)$$

Zależność (27) można zapisać w postaci:

$$\frac{i_{(1+X)m} - i_{(1+X)1}}{X_m - X_1} = i_w \quad (28)$$

W równaniu (28) licznik lewej strony stanowi zmianę entalpii Δi , a mianownik zmianę stopnia zawilżenia ΔX w procesie nawilżania.

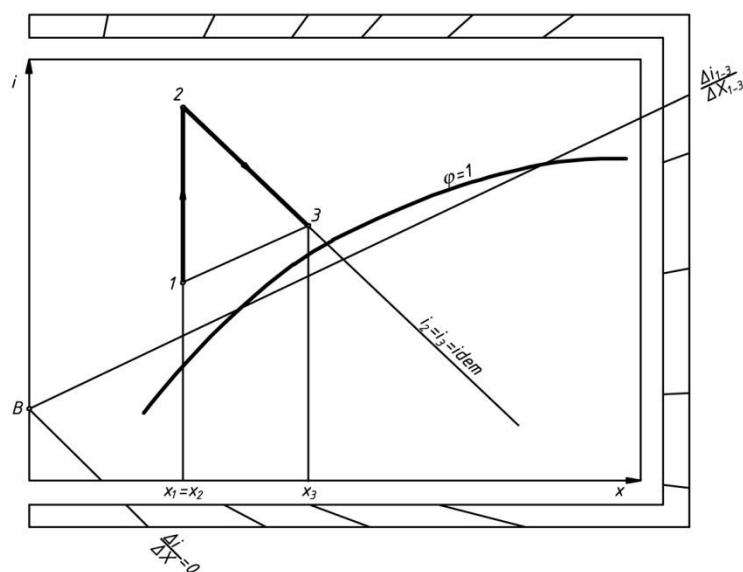
$$\frac{\Delta i}{\Delta X} = i_w \quad (29)$$

W procesie nawilżania powietrza wodą ciekłą lub parą wodną punkt charakteryzujący stan powietrza przesuwa się po linii prostej. Jej kierunek zależy od entalpii wody (pary) dodawanej do powietrza (29). Można go ustalić, na wykresie Molliera, łącząc odpowiednią kreskę podziałki z biegunem (rys. 2.). Równoległe do tego kierunku prowadzi się prostą przez punkt określający stan początkowy 1. Położenie punktu końcowego m wynika z różnicy ($X_m - X_1$).

3. Suszenie.

Suszenie materiałów występuje w wielu procesach przemysłowych. Suszenie odbywa się poprzez kontakt materiału, z którego usuwana jest wilgoć, z gazem nienasyconym wilgocią. Intensywność procesów suszenia można zwiększyć przez obniżenie wilgotności powietrza suszącego, co realizuje się przez jego podgrzanie albo też przez wykraplanie pary wodnej z powietrza kontaktującego się z materiałem suszonym.

W procesie suszenia wyróżnia się trzy fazy. W pierwszej fazie powierzchnia materiału jest nasycona wodą. Ciśnienie pary wodnej przy powierzchni materiału jest równe ciśnieniu nasycenia. Temperatura powierzchni zbliża się do temperatury termometru mokrego. W drugiej fazie procesu suszenia na powierzchni suszonego materiału występuje tylko wilgoć higroskopijna. Ciśnienie pary przy powierzchni jest niższe od ciśnienia nasycenia, a temperatura nieco wyższa od temperatury termometru mokrego. Zmniejsza się szybkość procesu suszenia. Wilgoć dyfunduje z wnętrza materiału do jego powierzchni. W trzeciej fazie powierzchnia parowania przesuwa się w głąb materiału. Wilgoć do powierzchni materiału dyfunduje z wnętrza w postaci pary. Rośnie temperatura powierzchni materiału. Dalszej analizie zostanie poddana tylko pierwsza faza suszenia. Zakładamy, że temperatura suszonego materiału jest stała i równa temperaturze termometru mokrego oraz nie ma strat ciepła do otoczenia.



Rys. 3. Proces suszenia w układzie $i_{(1+X)} - X$.

W początkowym okresie powietrze o parametrach określonych przez punkt 1: $(\dot{M}_{g1}, i_{(1+X)1}, T_1, \varphi_1, X_1)$ na rys. 3 zostaje podgrzane, (co powoduje zmniejszenie wilgotności φ , nie zmienia się ilość wilgoci X) do osiągnięcia stanu określonego punktem 2: $(\dot{M}_{g2}, i_{(1+X)2}, T_2, \varphi_2, X_2 = X_1)$. Powietrze doprowadzane jest do suszonego materiału i następuje jego nawilżenie wodą, o stałej temperaturze termometru mokrego, do stanu określonego przez punkt 3: $(\dot{M}_{g3}, i_{(1+X)3}, T_3, \varphi_3, X_3)$. Punkt charakteryzujący stan powietrza suszącego przesuwa się w układzie $i_{(1+X)} - X$ po linii prostej o nachyleniu określonym równaniem:

$$\frac{\Delta i}{\Delta X} = i_w = c_{pw} t \quad (30)$$

Pochylenie tej linii niewiele odbiega od linii stałej entalpii i dlatego przyjmuje się, że przemiana powietrza w czasie suszenia jest przemianą izentalpową ($i_2 = i_3$). (Jest to ściśle spełnione, gdy temperatura suszonego materiału wynosi 0°C.) Wilgotność względna powietrza opuszczającego suszarnię jest mniejsza od 1.

Ilość ciepła doprowadzana do podgrzania powietrza wynosi:

$$Q_{1-2} = M_{g1}(i_{(1+X)2} - i_{(1+X)1}) = M_{g1}(i_{(1+X)3} - i_{(1+X)1}) \quad (31)$$

Ilość wilgoci odparowanej z suszonego materiału:

$$M_w = M_{g1}(X_3 - X_2) = M_{g1}(X_3 - X_1) \quad (32)$$

Mając do dyspozycji te równania można określić zużycie ciepła przypadające na 1 kg odparowanej wilgoci:

$$q = \frac{Q_{1-2}}{M_w} = \frac{i_{(1+X)3} - i_{(1+X)1}}{X_3 - X_1} = \frac{\Delta i_{1-3}}{\Delta X_{1-3}} \quad (33)$$

Równanie (33) oznacza, że jednostkowe zużycie ciepła można wyznaczyć wykorzystując podziałkę kierunkową na wykresie Molliera (rys.3). W tym celu należy połączyć punkty 1 i 3 na wykresie, następnie równoległe do tego odcinka narysować promień przechodzący przez biegun podziałki kierunkowej i odczytać wartość stosunku $\Delta i/\Delta X$. Rzeczywiste zapotrzebowanie na ciepło w procesie suszenia będzie większe o straty z suszarni do otoczenia.

4. Pomiar parametrów powietrza wilgotnego

Przyrządy do pomiarów wilgotności powietrza można podzielić:

- higrometry
- psychrometry.

Higrometry to przyrządy, które wykorzystują zależność mierzalnych właściwości materiałów i substancji od wilgotności powietrza. Psychrometryczna metoda pomiaru wilgotności polega na zastosowaniu dwóch identycznych termometrów, z których jeden „suchy” mierzy temperaturę otoczenia, drugi „mokry” ma bańkę termometru owiniętą tkaniną, która jest nawilżona wodą destylowaną.

Higrometr włosowy

Higrometr włosowy jest najstarszym przyrządem do pomiaru wilgotności względnej powietrza wykorzystującym higroskopijne własności ciał stałych. Do jego budowy stosuje się ludzkie lub zwierzęce włosy oraz niektóre włókna syntetyczne, które zmieniają długość pod wpływem zmian wilgotności powietrza.

Przyrządy te odznaczają się prostą konstrukcją i działaniem. Dokładność pomiaru mieści się w przedziale od $\pm 3\%$ do $\pm 5\%$ wilgotności względnej. Wydłużenie włosa ludzkiego w zakresie od 0% do 100% wilgotności względnej wynosi 1,5% ÷ 2,5% jego długości. Wydłużenie włókien syntetycznych jest 2 ÷ 4 razy większe w porównaniu z włosami ludzkimi. Zakres pracy higrometrów włosowych to wilgotność względna 40% ÷ 90% i temperatura do 50°C (z włóknami syntetycznymi do 120°C). Higrometry włosowe są wykorzystywane w układach sterowania i regulacji oraz do rejestracji zmian wilgotności względnej.

Higrometr punktu rosy (kondensacyjny)

Określenie wilgotności za pomocą higrometru kondensacyjnego jest oparte na pomiarze temperatury punktu rosy, czyli początku kondensacji pary wodnej z powietrza na gładkiej metalowej lub szklanej powierzchni – lustrze. Powierzchnia lustra musi być chłodzona. Higrometry tego typu są najdokładniejszymi przyrządami do pomiaru wilgotności gazu. Niedokładność higrometrów kondensacyjnych jest w granicach $0,15^{\circ}\text{C} \div 0,5^{\circ}\text{C}$ temperatury punktu rosy w zakresie temperatur $-60^{\circ}\text{C} \div 40^{\circ}\text{C}$.

Higrometry elektryczne

Higrometry elektryczne wykonuje się jako przyrządy rezystancyjne lub pojemnościowe.

Czujniki rezystancyjne wykonuje się jako elektrolityczne lub ceramiczne.

Zasada działania czujników elektrolitycznych oparta jest na zmianie przewodności cienkiej warstwy materiału higroskopijnego na skutek zmiany wilgotności. Zakres zmian wilgotności względnej $5\% \div 95\%$, temperatura pracy: $-20^{\circ}\text{C} \div 70^{\circ}\text{C}$. Rezystancyjne czujniki ceramiczne są wykonane z warstwy polimeru naniesionego na ceramiczne podłoże. Rezystancja mierzona między elektrodami pomiarowymi zależy w sposób eksponencjalny od zmian wilgotności. Rezystancja rośnie ze zmniejszeniem wilgotności. Pomiar wilgotności w przedziale $20\% \div 90\%$, temperatura pracy $0^{\circ}\text{C} \div 90^{\circ}\text{C}$.

Higrometry pojemnościowe są budowane w postaci płaskiego kondensatora. Dielektryk kondensatora adsorbuje parę wodną w stopniu zależnym od wilgotności otaczającego powietrza. Zaletą higrometrów pojemnościowych jest pełny zakres mierzonej wilgotności względnej, dobra stabilność długoterminowa, odporność na zanieczyszczenia i liniowa charakterystyka. Zakres mierzonej wilgotności $0\% \div 100\%$, temperatura pracy $-40^{\circ}\text{C} \div 160^{\circ}\text{C}$.

Psychrometry

Psychrometry nie pozwalają na bezpośredni odczyt wilgotności względnej powietrza. Zaletami ich jest prosta budowa, łatwość użycia oraz niska cena.

Psychrometr składa się z dwóch termometrów: suchego i mokrego. Naczynie termometru mokrego jest owinięte gazą zwilżoną wodą destylowaną. Podstawą pomiaru jest założenie, że w warstwie powietrza otaczającego bezpośrednio naczynie termometru mokrego ustala się stan nasycenia powietrza parą wodną. W wyniku parowania wody z gazy termometru mokrego następuje obniżenie temperatury powietrza około naczynia termometru mokrego. Różnica wskazań termometru suchego i mokrego jest nazywana różnicą psychrometryczną. Różnica ta jest tym większa, im powietrze jest bardziej suche. Różnica psychrometryczna jest podstawą do wyznaczenia wilgotności względnej powietrza. Wilgotność względna jest określana na podstawie zależności:

$$\varphi = \frac{P_p}{P_{ss}} = \frac{P_{sm} - A(t_s - t_m)}{P_{ss}} 100\% \quad (34)$$

p_{ss} – ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze termometru suchego t_s ,

p_{sm} – ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze termometru mokrego t_m ,

t_s – temperatura termometru suchego,

t_m – temperatura termometru mokrego,

A – współczynnik (stała) psychrometryczny.

Współczynnik psychrometryczny A zależy od prędkości powietrza opływającego termometry. W pomiarach wilgotności względnej powietrza stosowane są dwa typy psychrometrów: Augusta oraz Assmanna.

Psychrometr Augusta ma nieunormowany przepływ powietrza wokół termometrów. Zakłada się, że prędkość powietrza wokół termometrów wynosi ok. 0,5 m/s, wartość stałej psychrometrycznej $A = 80 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Psychrometr Augusta jest mało dokładny.

Psychrometr Assmanna posiada wymuszony przepływ powietrza wokół termometrów. Przepływ jest wymuszony za pomocą wentylatora. Prędkość przepływu wynosi ok. 2,5 m/s, dla której współczynnik psychrometryczny ma wartość $A = 67,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

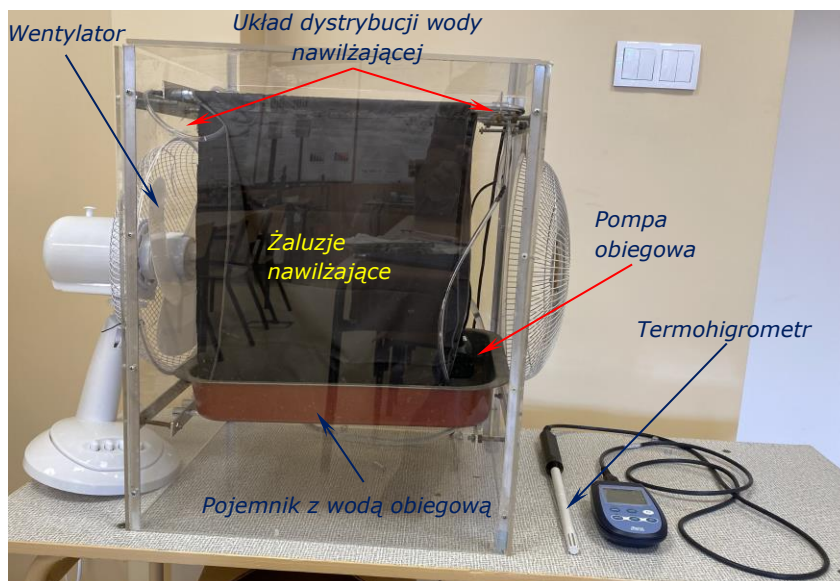
Wilgotność względną wylicza się za pomocą wzoru (34), z wykresu $i - X$ lub wykorzystując specjalnie do tego przeznaczone tablice.

5. Przebieg ćwiczenia

Do pomiarów parametrów powietrza wilgotnego jest wykorzystane stanowisko „klimatyzatora wyparnego”. Pomysł i realizacja stanowiska są efektem pracy studentów z Koła Naukowego Mechaników Energetyków.

5.1. Stanowisko pomiarowe

Widok „klimatyzatora wyparnego” jest pokazany na rysunku 4. Podstawowe elementy układu to: wentylator powietrza, żaluzje nawilżające oraz układ dystrybucji wody nawilżającej. Pomiar parametrów powietrza jest realizowany za pomocą termohigrometrów pojemnościowych.



Rys. 4. Stanowisko do pomiaru parametrów powietrza wilgotnego

Przepływ powietrza przez klimatyzator jest wymuszany za pomocą wentylatora. Możliwe są trzy wartości strumienia powietrza, które wynikają z wybrania prędkości obrotowej wentylatora. Powietrze przepływa przez kanały utworzone przez tkaninowe żaluzje lub kanały wkładu ewaporacyjnego. Materiał żaluzji (wkład ewaporacyjny) jest nawilżany wodą. Woda jest rozprowadzana za pomocą układu dystrybucyjnego, który składa się z pompy obiegowej i kanałów przepływowych. Woda jest pobierana z dolnego pojemnika i tłoczona do przewodów rozprowadzających umieszczonych na górnej płaszczyźnie żaluzji nawilżających. W przewodach rozprowadzających wodę, na górnej płaszczyźnie żaluzji, wykonane są otwory

pozwalające na równomierne nawilżanie materiału żaluzji (wkładu ewaporacyjnego). Nadmiar wody sływa do pojemnika.

Parametry powietrza wilgotnego są mierzone za pomocą termohigrometrów pojemnościowych w dwóch przekrojach klimatyzatora: za wentylatorem, w przekroju wejściowym oraz w przekroju wypływowym za żaluzjami nawilżającymi.

5.2. Pomiary

W czasie ćwiczenia jest przeprowadzany pomiar wilgotności powietrza przepływającego pomiędzy nawilżonymi żaluzjami lub w kanałach wkładu ewaporacyjnego. Dostępne są trzy typy żaluzji różniące się materiałem, z którego są zbudowane: len, materiał szybko schnący, materiał hydrofobowy (rys. 5). (Na ćwiczeniach będzie wykorzystany jeden wybrany przez prowadzącego.)

Przepływ powietrza powoduje odparowanie wody (zjawisko ewaporacji). Parująca woda pobiera ciepło od przepływającego powietrza powodując obniżenie jego temperatury, jednocześnie wzrasta ilość wilgoci w powietrzu, co obserwuje się przez wzrost stopnia zawilżenia X i wilgotności względnej ϕ .



Rys. 5. Żaluzje nawilżające wykonane z trzech różnych materiałów: *a* – lniane, *b* – z materiału szybko schnącego, *c* – z materiału hydrofobowego

Wkład ewaporacyjny celulozowy (rys. 6) posiada strukturę plastra miodu. Wkład jest nawilżany wodą, która jest równomiernie rozprowadzana na górnej powierzchni za pomocą układu dystrybuującego. Spadek temperatury powietrza może wynosić kilka kelwinów (w układach technologicznych $\Delta T = 6 \div 12$ K)



Rys. 6. Wkład ewaporacyjny celulozowy

Do przestrzeni z żaluzjami dopływa powietrze o parametrach otoczenia. Z klimatyzatora wypływa powietrze o zmienionych parametrach – temperatury i wilgotności. Mierzone są początkowe parametry powietrza oraz parametry powietrza za obszarem nawilżania. Mierzone parametry powietrza to: ciśnienie otoczenia p_o , temperatura początkowa $t_1 = t_o$, wilgotność względna początkowa $\varphi_1 = \varphi_o$, temperatura końcowa t_2 , wilgotność względna końcowa φ_2 . Wyniki pomiarów parametrów powietrza wilgotnego należy przedstawić w tabeli 1.

Tabela 1. Wielkości mierzone

Lp.	Ciśnienie otoczenia p_o	Temperatura początkowa $t_1 = t_o$	Wilgotność względna $\varphi_1 = \varphi_o$	Temperatura końcowa t_2	Wilgotność względna φ_2
	hPa	°C	%	°C	%
1					

6. Opracowanie wyników

Obliczenia należy przeprowadzić dla obu stanów pomiarowych!

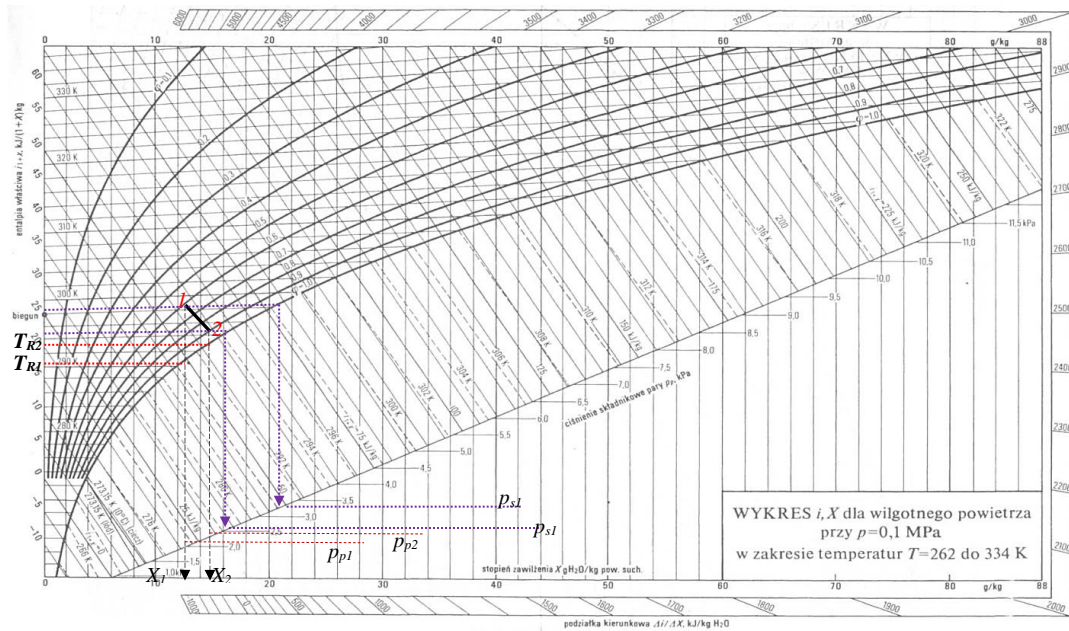
Na podstawie zmierzonych wartości temperatury i wilgotności względnej zaznaczamy punkt początkowy 1 i końcowy 2 na wykresie Molliera $i_{(1+X)} - X$ dla powietrza wilgotnego. Z wykresu dla tych punktów odczytujemy następujące wielkości (rys. 7):

- stopień zawilżenia gazu X [g H₂O/kg pow. such.];
- ciśnienie cząstkowe pary p_p [kPa];
- ciśnienie nasycenia pary p_s [kPa];
- temperaturę punktu rosy T_R [K].

Wartość ciśnienia nasycenia pary wodnej można dokładniej odczytać z tablic.

Tabela 2. Wielkości odczytane z wykresu Molliera $i_{(1+X)} - X$

Punkt początkowy 1		Punkt końcowy 2	
Temperatura t_1 [°C]		Temperatura t_2 [°C]	
Wilgotność względna φ_1 [-]		Wilgotność względna φ_2 [-]	
Stopień zawilżenia gazu X_1 [g/kg]		Stopień zawilżenia gazu X_2 [g/kg]	
Ciśnienie cząstkowe pary p_{p1} [kPa]		Ciśnienie cząstkowe pary p_{p2} [kPa]	
Ciśnienie nasycenia pary p_{s1} [kPa]		Ciśnienie nasycenia pary p_{s2} [kPa]	
Temperatura punktu rosy T_{R1} [K]		Temperatura punktu rosy T_{R2} [K]	



Rys. 7. Odczytanie wybranych parametrów powietrza wilgotnego z wykresu Molliera

Na podstawie wyników pomiarów i wartości odczytanych z wykresu i tablic obliczamy następujące wielkości (obliczenia należy przeprowadzić dla obu stanów pomiarowych).

1. Wzrost stopnia zawilżenia powietrza:

$$\Delta X = X_2 - X_1 \text{ [g H}_2\text{O/kg pow. such.]} \quad (35)$$

2. Wilgotność bezwzględna (wilgoć) ρ_p

$$\rho_p = \frac{p_p}{R_p T} \quad (4a)$$

$R_p = 461,9 \text{ J/kgK}$ – indywidualna stała gazowa dla pary wodnej,

T – temperatura gazu wilgotnego, [K],

p_p – ciśnienie cząstkowe pary, [Pa].

3. Ciśnienia cząstkowe

- 3.1. Ciśnienie cząstkowe pary wodnej.

Wykorzystując definicję wilgotności względnej i odczytane z tablic ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze t obliczamy ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu

$$p_p = \varphi p_s \quad (6a)$$

- 3.2. Ciśnienie cząstkowe powietrza suchego

Ciśnienie cząstkowe powietrza suchego można obliczyć wykorzystując prawo Daltona

$$p_g = p - p_p = p - \varphi p_s$$

4. Masowy stopień zawilżenia

$$X = \frac{R_g \cdot p_p}{R_p \cdot p_g} = \frac{\mu_p p_p}{\mu_g (p - p_p)} \quad X = \frac{\mu_p}{\mu_g} \cdot \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad (8)$$

5. Molowy stopień zawilżenia X_z

$$X_z = \frac{P_p}{p - p_p} = \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad (12)$$

6. Zastępcza stała gazowa R gazu wilgotnego.

$$R = \frac{R_g + X \cdot R_p}{1 + X} \quad (14)$$

$R_g = 287,6 \text{ J/kgK}$ – indywidualna stała gazowa dla powietrza suchego,

Uwaga! Stopień zawilżenia musi być podstawiony w $[\text{kg H}_2\text{O/kg pow. such.}]$.

7. Gęstość powietrza wilgotnego

$$\rho = \frac{p - \varphi \cdot p_s}{R_g T} + \varphi \cdot \rho_p'' \quad \text{lub} \quad \rho = \rho_n \frac{(p - \varphi p_s) T_n}{p_n T} + \varphi \rho_p'' \quad (17)$$

ρ_p'' – gęstość nasyconej pary wodnej w temperaturze T (z tablic).

Tabela 3. Obliczone parametry powietrza wilgotnego

<i>Punkt początkowy 1</i>		<i>Punkt końcowy 2</i>	
Wilgotność bezwzględna (wilgoć) ρ_{p1} [kg/m ³]		Wilgotność bezwzględna (wilgoć) ρ_{p2} [kg/m ³]	
Molowy stopień zawilżenia X_{z1} [kmol H ₂ O/kmol pow. such.]		Molowy stopień zawilżenia X_{z2} [kmol H ₂ O/kmol pow. such.]	
Zastępcza stała gazowa R_1 [J/kgK]		Zastępcza stała gazowa R_2 [J/kgK]	
Gęstość powietrza wilgotnego ρ_1 [kg/m ³]		Gęstość powietrza wilgotnego ρ_2 [kg/m ³]	

7. Wnioski

W podsumowaniu należy przeprowadzić analizę otrzymanych wyników i przedstawić wnioski z wykonanego ćwiczenia.

Literatura:

1. Szewczyk W., Wojciechowski J.: Wykłady z termodynamiki z przykładami zadań. Uczelniane Wydawnictwo Naukowe – Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
2. Szargut J.: Termodynamika techniczna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
3. Kulesza J.(red): Miernictwo cieplne. Część I, WNT, Warszawa.