Paweł Kozakiewicz

Klimat a drewno - zbiór zadań

Wydawnictwo SGGW
Warszawa 2006

Paweł Kozakiewicz: **Klimat a drewno – zbiór zadań**.
Wydanie II uzupełnione
Warszawa 2006

Recenzent: Prof. dr hab. Mieczysław Matejak

Projekt okładki i strony tytułowej – Paweł Kozakiewicz
Fotografie na okładce – Paweł Kozakiewicz
Na okładce rzeźba anioła z XVIII wieku, wykonana w drewnie lipowym – własność prywatna

ISBN 83-7244-374-2

WYDAWNICTWO SZKOŁY GŁÓWNEJ GOSPODARSTWA WIEJSKIEGO
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa
tel. (022) 593 55 20 (sekretariat), (022) 593 55 27, fax (022) 593 55 21
e-mail: jmw_wyd@alpha.sggw.waw.pl (funkcjonuje do końca 2006 roku)
wydawnictwo@sggw.pl

Spis treści

	str.
Wstęp	3
Indeks	4
1. Zadania z pełnymi rozwiązaniami	5
1.1. Podstawowe parametry i przemiany powietrza	5
1.2. Wilgotność równoważna drewna	17
1.3. Sterowanie klimatem	21
2. Zadania do samodzielnego rozwiązania	27
2.1. Treść zadań	27
2.2. Odpowiedzi	30
Spis najważniejszych wzorów	31
Tabele i wykresy	33
Literatura	44

Wstęp

Zbiór zadań „Klimat a drewno" został napisany z myślą o studentach studiów wieczorowych Wydziału Technologii Drewna SGGW specjalność Konserwacja Drewna Zabytkowego.

Zbiór stanowi uzupełnienie do podręcznika noszącego zbliżony tytuł: „Klimat a drewno zabytkowe" autorstwa P. Kozakiewicza i M. Matejaka, wydanego przez Wydawnictwo SGGW w 2000 roku ze wznowieniem w 2002 roku. Zbiór zadań zawiera praktyczne ujęcie zagadnień omówionych w wyżej wymienionym podręczniku.

Dobór odpowiednich warunków klimatycznych w pomieszczeniach w których przechowywane jest drewno jest działaniem równie ważnym jak jego prawidłowa konserwacja. Umiejętność praktycznego zastosowania i wykorzystania odpowiednich zależności (opisanych wzorami) do rozwiązywania konkretnych zagadnień z zakresu klimatyzacji, posiadanie wiedzy dotyczącej właściwości higroskopijnych drewna, umiejętność sterowania parametrami powietrza w pomieszczeniach jest bazą do działań bardzo istotnych w zabezpieczaniu i ochronie drewna.

Zbiór zadań, który trzymają Państwo w rękach, składa się z dwóch części:

1) zadaniowej, z zadaniami omówionymi i rozwiązanymi „krok po kroku";
2) ćwiczeniowej, z zadaniami do samodzielnego rozwiązania.

Zadania zamieszczone w pierwszej części zbioru zapoznają z podstawowymi parametrami powietrza i rodzajami przemian oraz uczą posługiwania się wykresem h-x. Kolejne z nich przedstawiają zależność wilgotności równoważnej drewna od parametrów powietrza i wprowadzają w zagadnienia związane z klimatyzacją.

W drugiej części znajdą Państwo treści zadań do samodzielnego rozwiązania z podanymi końcowymi wynikami. Wyniki te mogą nieco odbiegać od otrzymanych przez Państwa, co może być skutkiem zaokrągleń stosowanych podczas obliczeń i niedokładności przy odczytach odpowiednich parametrów z wykresu h-x.

Uzupełnieniem zbioru są tablice i wykresy h-x, zamieszczone na końcu skryptu, obrazujące podstawowe dane dotyczące parametrów powietrza i wilgotności równoważnych drewna.

W stosunku do wydania I skrypt uzupełniono o dodatkowe wykresy h-x oraz zależności do obliczania wilgotności równoważnej drewna.

Warszawa, lipiec 2006 Paweł Kozakiewicz

Indeks

Wykaz oznaczeń

Lp.	*Symbol*	*Znaczenie*	*Jednostki*
1	r_o	ciepło parowania wody	kJ/kg
2	r_L	ciepło topnienia lodu	kJ/kg
3	c	ciepło właściwe powietrza	kJ/kgK
4	c_l	ciepło właściwe lodu	kJ/kgK
5	c_p	ciepło właściwe pary wodnej	kJ/kgK
6	c_w	ciepło właściwe wody	kJ/kgK
7	p_b	ciśnienie barometryczne	MPa
8	p_p	ciśnienie cząstkowe pary wodnej	MPa
9	p”	ciśnienie pary nasyconej	MPa
10	p’	ciśnienie pary suchej	MPa
11	τ	czas	h lub doba
12	h	entalpia	kJ/kg
13	g	gęstość	kg/m^3
14	m_o	masa drewna absolutnie suchego	g lub kg
15	m_w	masa drewna wilgotnego	g lub kg
16	m_l	masa lodu	g lub kg
17	m_p	masa pary	g lub kg
18	m_{ps}	masa powietrza suchego	g lub kg
19	m_{H_2O}	masa wody	g lub kg
20	v	objętość właściwa	m^3/kg
21	ω	prędkość przepływu powietrza	m/s
22	$\dot{m}$	strumień masy	kg/h
23	t	temperatura	^{0}C lub K
24	t_m	temperatura termometru mokrego	^{0}C lub K
25	t_s	temperatura termometru suchego	^{0}C lub K
26	W	wilgotność bezwzględna drewna	%
27	φ	wilgotność względna powietrza	%
28	W_r	wilgotność równoważna drewna	%
29	x	zawartość wilgoci w powietrzu (w 1kg suchego gazu)	g/kg

1. Zadania z pełnymi rozwiązaniami

1.1. Podstawowe parametry i przemiany powietrza

Informacje dotyczące konstrukcji i sposobu posługiwania się wykresem h-x oraz podstawowe dane o parametrach powietrza i sposobach ich wyznaczania podane są w pierwszym rozdziale książki „Klimat a drewno zabytkowe" (Kozakiewicz, Matejak 2002). Czytelników, którzy chcieliby pogłębić widzę z tego zakresu zachęcam do sięgnięcia także po inne książki (np. Krieczetow 1955, Gąsiorowski i in. 1969, Strumiłło 1983, Glijer, Matejak, Osipiuk 1984, Dobrowolska, Matejak, 1997, Dobrowolska, Kozakiewicz, Matejak 1998).

Zadanie I.1.1
Dla powietrza o temperaturze 20°C i wilgotności względnej φ = 0,7 przy ciśnieniu 0,1 MPa wyznaczyć entalpię i zawartość wilgoci (analitycznie i za pomocą wykresu h-x).

Rozwiązanie:

Dane:	*Szukane:*	*Wzory:*
t=20°C	x	$x = 622 \cdot \frac{p'' \cdot \varphi}{p_b - p'' \cdot \varphi}$
φ=0,7=70%	h	$h = c \cdot t + (c_p \cdot t + r_0) \cdot X$
p_b=0,1MPa		

1) wyznaczamy szukane wielkości na drodze obliczeń

a. Potrzebną do obliczeń wartość ciśnienia pary nasyconej odczytujemy z tabeli IV: dla temperatury t=20°C ciśnienie p"=23,37 hPa.

b. Zawartość wilgoci wyliczamy z równania opisującego jej zależność od podanej wilgotności względnej powietrza:

$$x = 622 \cdot \frac{p'' \cdot \varphi}{p_b - p'' \cdot \varphi} = 622 \cdot \frac{23{,}37 \cdot 0{,}7}{1000 - 23{,}37 \cdot 0{,}7} = 10{,}3 \quad \text{[g/kg]}$$

c. Przy temperaturze 20°C i φ = 0,7 w powietrzu znajduje się wilgoć tylko w postaci pary wodnej. By wyliczyć wartość entalpii korzystamy ze wzoru:

$$h = c \cdot t + (c_p \cdot t + r_0) \cdot X$$

Podane w powyższym wzorze wielkości c, c_p, r_o - przyjmujemy z niewielkim błędem jako znane nam wartości stałe (c=1,0 kJ/(kg·K), c_p =1,86 kJ/(kg·K) r_o = 2500 (kJ/kg)) lub uwzględniamy wpływ temperatury i odczytujemy ich dokładną wartość z tabeli VII:
dla temp. t=20°C i p_b=0,1MPa c=1,0058 kJ/(kg·K), c_p=1,860 kJ/(kg·K) i r_o=2453,4 kJ/(kg), stąd:

$$h = 1{,}0 \cdot 20 + 0{,}0103 \cdot (2500 + 1{,}86 \cdot 20) = 46{,}1 \text{ kJ/kg}$$

lub

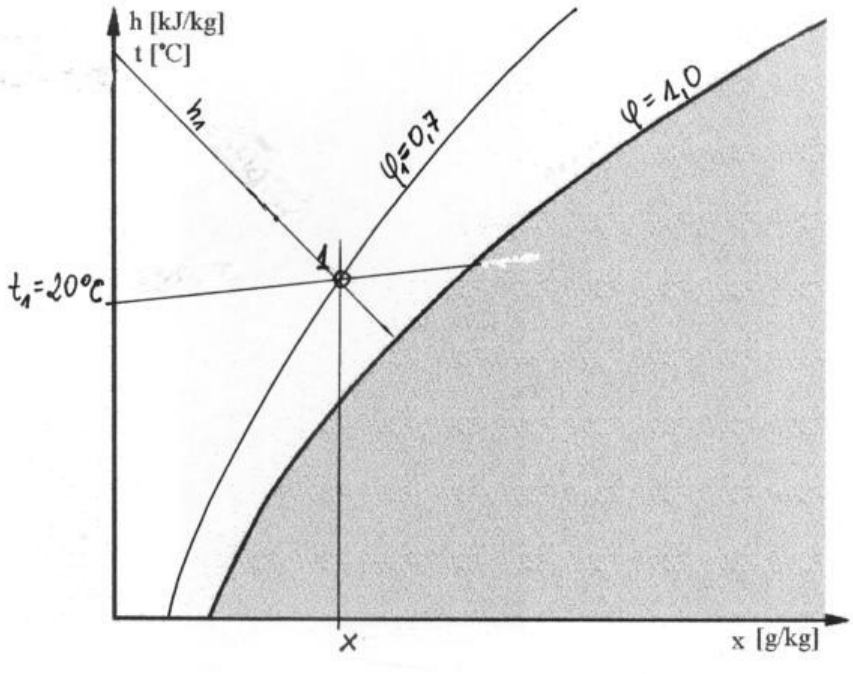
$$h = 1{,}0058 \cdot 20 + 0{,}0103 \cdot (2453{,}4 + 1{,}86 \cdot 20) = 45{,}8 \text{ kJ/kg}$$

2) wyznaczamy szukane wielkości posługując się wykresem h-x

a. Na wykresie h-x (rys.I na końcu skryptu) odnajdujemy punkt (1) przecięcia krzywej stałej wilgotności względnej powietrza φ = 0,7 z prostą stałej temperatury powietrza t= 20°C.

b. Z punktu (1) prowadzimy linię pionową i odczytujemy zawartość wilgoci (x) na osi rzędnych: x≈10,5 g/kg.

c. Z punktu (1) prowadzimy linie równoległą do izoentalp zaznaczonych na wykresie i odczytujemy entalpię (h) na osi odciętych: h≈45 kJ/kg.
Przy odczycie entalpii (h) należy pamiętać, że wykres h-x posiada ukośnokątny układ współrzędnych (kąt ok. 135^o).



Rysunek do zadania I.1.1

ZADANIE II.1.1

Powietrze o temperaturze 5°C, wilgotności względnej 90% i ciśnieniu 0,1 MPa ogrzano do temperatury 25°C. Wyznaczyć końcową zawartość wilgoci oraz końcową wilgotność względną powietrza w sposób analityczny i przy użyciu wykresu h-x.

Rozwiązanie:

Dane:
p_b = 0,1 MPa
t_1= 5°C
φ_1 = 90%
t_2= 25°C

Szukane:
φ_2
x_2

Wzory:

$$x = 622 \cdot \frac{p'' \cdot \varphi}{p_b - p'' \cdot \varphi}$$

$$\varphi = \frac{p_b}{p''} \cdot \frac{x}{x + 622}$$

1) wyznaczamy szukane wielkości na drodze obliczeń

a. Potrzebną do obliczeń wartość ciśnienia pary nasyconej przy temperaturze początkowej i końcowej powietrza odczytujemy z tabeli IV: dla t_1=5°C p_1"=8,718 hPa, a dla t_2=25°C p_2"=31,67 hPa.
b. Przy ogrzewaniu powietrza nie zmienia się zawarta w nim ilość wilgoci ($x_2 = x_1$), wobec powyższego możemy policzyć ją z następującej zależności:

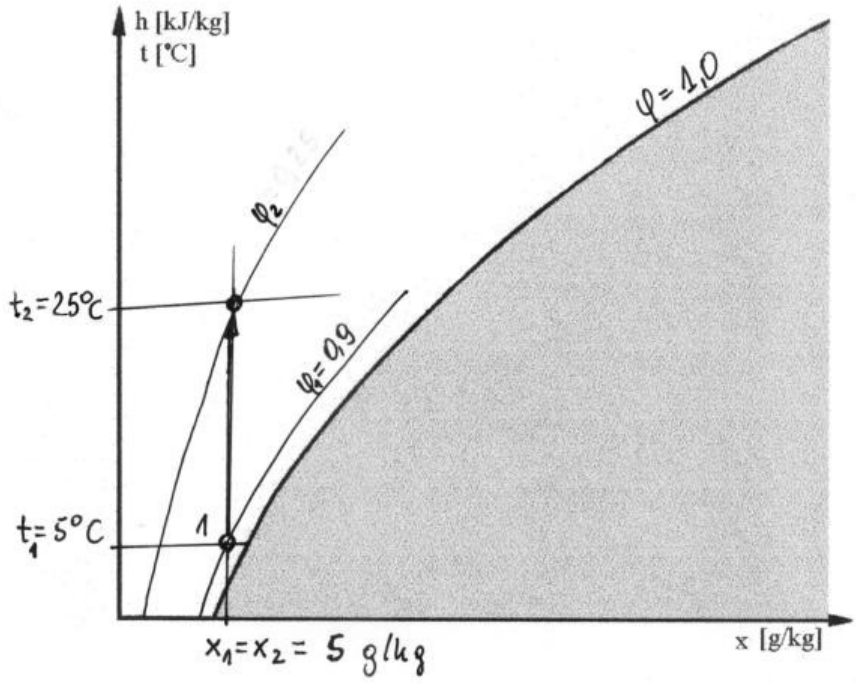
$$x_2 = x_1 = 622 \frac{p_1'' \cdot \varphi_1}{p_b - p_1'' \cdot \varphi_1} = 622 \frac{8{,}718 \cdot 0{,}9}{1000 - 8{,}718 \cdot 0{,}9} = 4{,}92 \approx 5 \text{ g/kg}$$

c. Wilgotność względną powietrza po ogrzaniu obliczymy ze wzoru:

$$\varphi_2 = \frac{p_b}{p_2''} \cdot \frac{x_2}{x_2 + 622} = \frac{1000}{31{,}67} \cdot \frac{4{,}92}{4{,}92 + 622} = 0{,}248 \approx 25 \ \%$$

2) wyznaczamy szukane wielkości posługując się wykresem h-x

a. Na wykresie odnajdujemy punkt (1) odpowiadający parametrom początkowym powietrza (przecięcie krzywej φ_1=0,9 i izotermy t_1=5°C).
b. Następnie z wyznaczonego punktu prowadzimy prostą stałej zawartości wilgoci aż do przecięcia się z izotermą 25°C wyznaczając w ten sposób punkt (2), odpowiadający parametrom końcowym powietrza, czyli powietrza po ogrzaniu.
c. Dla punktu końcowego odczytujemy szukaną wilgotność względną powietrza: $\varphi_2 \approx 25\%$
d. Zawartość wilgoci jest taka sama jak dla punktu (1). Odczytana wartość wynosi: $x_1 = x_2 \approx 5$ g/kg



Rysunek do zadania II.1.1

Zadanie III.1.1

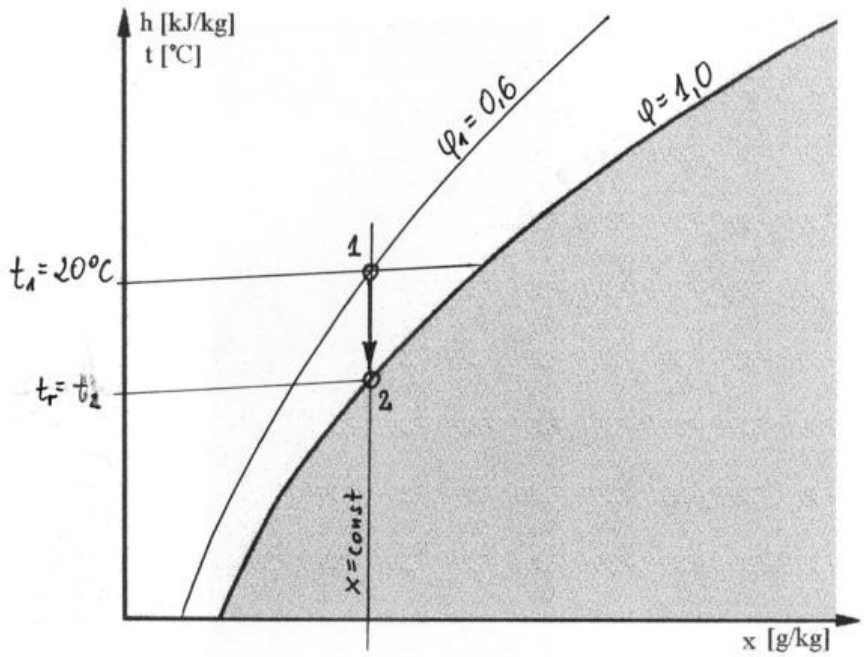
Posługując się wykresem h-x wyznaczyć temperaturę punktu rosy dla powietrza wilgotnego o temperaturze 20°C i wilgotności względnej równej 60%.

Rozwiązanie

Dane:	*Szukane:*
$t=20^oC$	t_r
$\varphi=0,6$	

Temperatura punktu rosy jest to temperatura w której powietrze wilgotne (przy stałej zawartości wilgoci) osiąga podczas chłodzenia pod stałym ciśnieniem stan nasycenia.

a. Na wykresie odnajdujemy punkt odpowiadający podanym parametrom powietrza (punkt 1) na przecięciu krzywej $\varphi = 0,6$ i izotermą t = 20°C).
b. Z wyznaczonego punktu rysujemy pionową linię stałej zawartości wilgoci x=const. i odnajdujemy miejsce jej przecięcia z krzywą nasycenia (φ=100%) – punkt 2.
c. Dla odnalezionego punktu (2) odczytujemy szukaną wartość temperatury rosy: $t_r \approx 12^oC$



Rysunek do zadania III.1.1

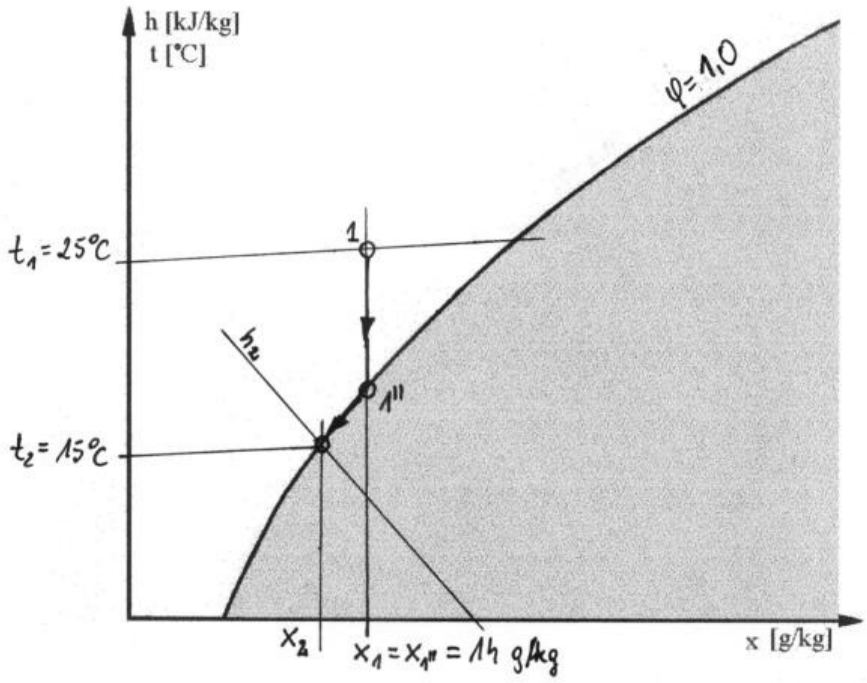
Zadanie IV.1.1

Posługując się wykresem h-x wyznaczyć parametry końcowe powietrza po jego oziębieniu objętościowym do temperatury 15 ^{o}C. Parametry początkowe powietrza były następujące: zawartość wilgoci 14 g/kg i temperatura 25 ^{o}C.

Rozwiązanie:

Dane :	*Szukane :*
t_1= 25°C	φ_2
x_1 = 14 g/kg	x_2
t_2= 15°C	

a. Na wykresie h-x odnajdujemy punkt (1) odpowiadający parametrom początkowym powietrza (przecięcie pionowej lipni stałej zawartości wilgoci x_1=14g/kg z izotermą t_1=25°C).
b. Powietrze zostało poddane oziębianiu objętościowemu, a więc stopniowo spadała jego temperatura przy nie zmieniającej się zawartości wilgoci, aż do osiągnięcia stanu nasycenia. Poruszając się po linii stałej zawartości wilgoci x_1=14 g/kg odnajdujemy miejsce jej przecięcia z krzywą wilgotności względnej powietrza równej 100%. Jest to tak zwany punkt rosy (punkt 1").
c. Przy dalszym oziębianiu nadmiar wilgoci kondensuje (skrapla się) i ogólna zawartość wilgoci w powietrzu maleje. Dlatego dalej poruszamy się po krzywej nasycenia (φ=100%) i odnajdujemy miejsce jej przecięcia z izotermą t=15°C. Miejsce to wyznacza parametry końcowe powietrza (punkt 2).
d. Dla punktu 2 odczytujemy szukane parametry powietrza końcowego: $x_2 \approx$11g/kg, φ_2=100%, $h_2 \approx$37,5 kJ/kg.



Rysunek do zadania IV.1.1

Zadanie V.1.1

Określić zawartość wilgoci w powietrzu jeśli wiadomo, że na każde 5kg powietrza suchego przypada 0,45 kg pary wodnej.

Rozwiązanie :

Dane:	*Szukane:*	*Wzór:*
m_{ps}=1kg m_p=0,045 kg=45g	x	$x = \frac{m_p}{m_{ps}}$

Dane podane w treści zadania wystarczy wstawić do wzoru, pamiętając o odpowiedniej zamianie jednostek:

$$x = \frac{m_p}{m_{ps}} = \frac{45}{5} = 9 \text{ g/kg}$$

Zadanie VI.1.1

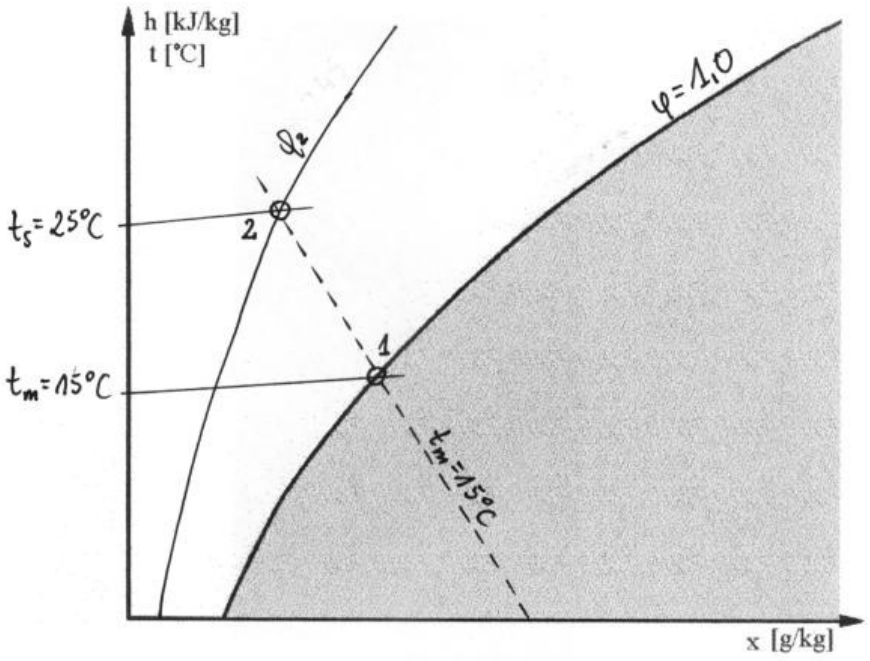
Korzystając z wykresu h-x określić wilgotność względną powietrza, jeśli wiadomo że temperatura termometru suchego dla wynosi 25 ^oC a termometru mokrego 15^oC.

Rozwiązanie :

Dane:	*Szukane:*
t_s=25 ^oC	φ
t_m=15 ^oC	

a. Poruszając się po linii stałej temperatury równej temperaturze termometru mokrego (t_m=15^oC), znajdujemy miejsce jej przecięcia z krzywą nasycenia (φ=1,0) - punkt 1.

b. Z odnalezionego punktu (1) prowadzimy prostą będącą przedłużeniem stałej temperatury (t=15^{o}C) z obszaru mgły. Linia ta jest prawie równoległa do izoentalp.
c. Linię tę prowadzimy aż do przecięcia się jej z linią izotermy termometru suchego (t_s=25^{0}C). Miejsce przecięcia się tych linii (punkt 2) określają szukane parametry powietrza.
d. Dla odnalezionego punktu (2) odczytujemy wartość wilgotności względnej powietrza: $\varphi_2 \approx 45\%$



Rysunek do zadania VI.1.1

Zadanie VII.1.1

Suche powietrze (o wilgotności 0%) i temperaturze 45^{o}C zostało nawilżone w ilości 10 g H_2O na każdy kg poprzez wtrysk mgły wodnej o temperaturze bliskiej 0^{o}C. Posługując wzorami analitycznymi i wykresem h-x określić parametry końcowe powietrza.

Rozwiązanie:

Dane:
p_b = 0,1 MPa
t_1= 45°C
φ_1 = 0%
x_1=0 g/kg
m_p=10 g

Szukane:
φ_2
x_2

Wzory:

$$x = \frac{m_p}{m_{ps}}$$

$$h = c \cdot t + X_w \cdot c_w \cdot t$$

$$\varphi = \frac{p_b}{p''} \cdot \frac{x}{x + 622}$$

1) wyznaczamy szukane wielkości na drodze obliczeń

a. Obliczamy zawartość wilgoci w powietrzu po jego nawilżeniu:

$$x_2 = \frac{m_p}{m_{ps}} = \frac{10}{1} = 10 \text{ g/kg}$$

b. Zakładamy przybliżone wartości ciepła właściwego powietrza (c=1,0 kJ/(kg·K) i wody c_w=4,19 kJ/(kg·K) lub odczytujemy z tabel wartości dokładne uwzględniające wpływ temperatury a następnie wyliczamy końcową entalpię powietrza:

$$h_2 = c \cdot t + X_w \cdot c_w \cdot t = 1{,}0 \cdot 45 + 0{,}01 \cdot 4{,}19 \cdot 0 = 45 \text{ kJ/kg.}$$

c. Wprowadzona do powietrza woda w postaci mgły wodnej zamieni się w parę pobierając ciepło parowania co spowoduje obniżenie temperatury powietrza. Korzystając z zasady termodynamiki możemy zapisać:

$$m_p \cdot r_o = \Delta t \cdot m_{ps} \cdot c \text{ gdzie } \Delta t = t_1 - t_2,$$

$$\text{stąd: } t_2 = t_1 - \frac{m_p \cdot r_o}{m_{ps} \cdot c} = 45 - \frac{0{,}01 \cdot 2500}{1 \cdot 1} = 20 \ ^{o}\text{C}$$

d. Z tabeli IV na końcu skryptu, odczytujemy wartość ciśnienia pary wodnej dla temperatury t_2=20°C: $p_2^{"}$=23,37 hPa. Ostatecznie wyliczamy końcową wilgotność względną powietrza:

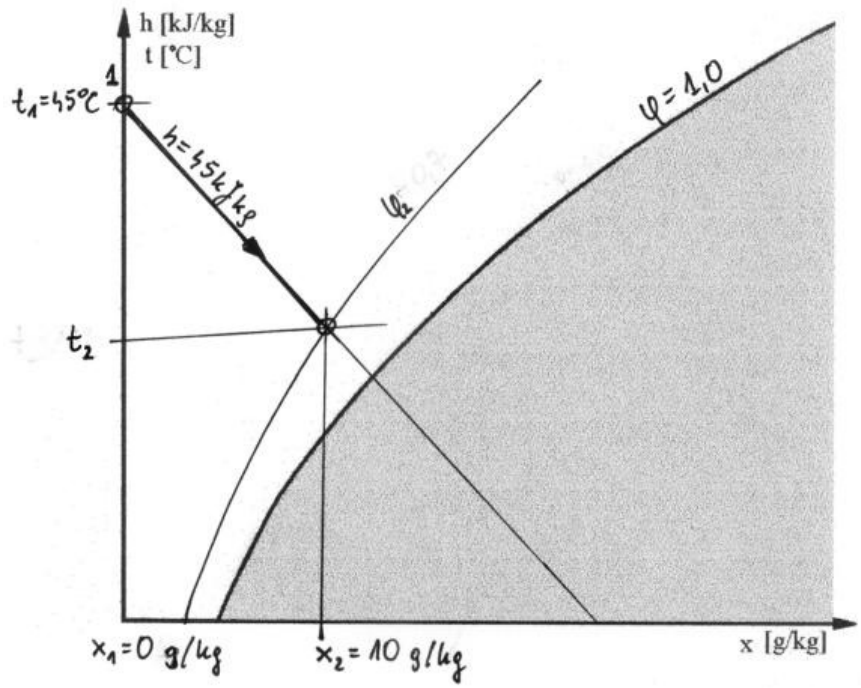
$$\varphi_2 = \frac{p_b}{p^{"}} \cdot \frac{x}{x + 602} = \frac{1000}{23{,}37} \cdot \frac{10}{10 + 622} \approx 0{,}68 = 68 \ \%$$

2) wyznaczamy szukane wielkości posługując się wykresem h-x

a. Na wykresie h-x odnajdujemy punkt 1 reprezentujący parametry początkowe powietrza. Jest to miejsce przecięcia się osi odciętych (x=0) z prostą stałej temperatury t=45°C.

b. Do powietrza została wtryśnięta mgła wodna o temperaturze bliskiej 0°C, a więc przemiana będzie przebiegała po izoentalpie (h=45 kJ/kg). Odnajdujemy punkt (2) będący przecięciem tej izoentalpy z pionową linią stałej zawartości wilgoci (x=10 g/kg). Punkt 2 reprezentuje parametry powietrza po nawilżeniu.

c. Dla punktu 2 odczytujemy szukaną wartość końcową temperatury i wilgotności względnej powietrza: $t_2 \approx 20^0$C, $\varphi_2 \approx 0{,}7$.



Rysunek do zadania VII.1.1

Zadanie VIII.1.1

Obliczyć jak zmieni się objętość właściwa i gęstość powietrza po jego ogrzaniu o 30°C. Parametry początkowe powietrza były następujące: temperatura 5°C a wilgotność względna 90%.

Rozwiązanie:

Dane:

$t_1 = 5°C$

$\varphi_1 = 0,9 = 90\%$

Szukane:

$\Delta v = v_2 - v_1$

Wzory:

$$x = 622 \cdot \frac{p^{"} \cdot \varphi}{p_b - p^{"} \cdot \varphi}$$

$$v = 22,4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{x}{18} \right) \cdot \frac{t + 273}{273}$$

$$g = \frac{1}{v}$$

a. Na podstawie danych podanych w treści zadania obliczamy temperaturę końcową powietrza (po ogrzaniu):

$$t_2 = t_1 + 30 = 5 + 30 = 35\,^{o}\mathrm{C}$$

a. Odczytujemy wartość ciśnienia pary nasyconej z tabeli IV na końcu skryptu: dla $t_1 = 5^{o}C$ $p^{"} = 8,711$, a na tej podstawie obliczamy zawartość wilgoci w powietrzu przed i po ogrzaniu:

$$x_1 = x_2 = 622 \cdot \frac{p^{"} \cdot \varphi}{p_b - p^{"} \cdot \varphi} = 622 \frac{8,711 \cdot 0,9}{1000 - 8,711 \cdot 0,9} \approx 4,9 \text{ g/kg}$$

b. Obliczamy objętości właściwe powietrza przed i po ogrzaniu z poniższych zależności:

$$v_1 = 22,4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{X_1}{18} \right) \cdot \frac{t_1 + 273}{273} = 22,4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{0,0049}{18} \right) \cdot \frac{5 + 273}{273} = 0,793 \text{ m}^3\text{/kg}$$

$$v_2 = 22,4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{X_2}{18} \right) \cdot \frac{t_2 + 273}{273} = 22,4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{0,0049}{18} \right) \cdot \frac{35 + 273}{273} = 0,878 \text{ m}^3\text{/kg}$$

c. Ostatecznie obliczamy jak zmieni się objętość właściwa powietrza po jego ogrzaniu:

$$\Delta v = v_2 - v_1 = 0,878 - 0,793 = 0,085 \text{ m}^3\text{/kg}$$

d. Na podstawie znajomości objętości właściwych wyznaczamy gęstości powietrza:

$$g_1 = \frac{1}{v_1} = \frac{1}{0,793} = 1,26 \text{ kg/m}^3$$

$$g_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{1}{0,878} = 1,14 \text{ kg/m}^3$$

e. Na koniec wyliczamy jak zmieniła się gęstość powietrza po jego ogrzaniu:

$$\Delta g = g_2 - g_1 = 1,14 - 1,26 = -0,12 \text{ kg/m}^3$$

ZADANIE IX.1.1

Powietrze o temperaturze 25°C i wilgotności względnej φ=30% zajmujące objętość 20 m^3 zostało dowilżone przez wtrysk pary wodnej o temperaturze 25°C w ilości 164,5g. Określić parametry końcowe powietrza na drodze obliczeń i za pomocą wykresu h-x.

Rozwiązanie:

Dane:
t_1= 25°C
φ_1 = 30%
V_1=20 m^3
m_p=164,5 g

Szukane:
t_2
φ_2
h_2
v_2

Wzory:

$$x = 622 \cdot \frac{p'' \cdot \varphi}{p_b - p'' \cdot \varphi}$$

$$v = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{X}{18}\right) \cdot \frac{t + 273}{273}$$

$$h = c \cdot t + \left(c_p \cdot t + r_0\right) \cdot X$$

$$m_{ps} = \frac{V}{v}$$

$$\varphi = \frac{p_b}{p''} \cdot \frac{x}{x + 622}$$

1) wyznaczamy szukane wielkości na drodze obliczeń

a. Na podstawie znajomości temperatury i wilgotności względnej powietrza obliczamy pozostałe parametry powietrza tj. zawartość wilgoci, entalpię i objętość właściwą. Brakujące dane odczytujemy z tabel na końcu skryptu:
   - z tabeli IV lub z tabeli VI dla t=25°C ciśnienie pary nasyconej p"=31,67 hPa
   - z tabeli VI lub VII dla t=25°C ciepło parowania r_o=2442 kJ/kg

$$x_1 = 622 \cdot \frac{p'' \cdot \varphi_1}{p_b - p'' \cdot \varphi_1} = 622 \cdot \frac{31{,}67 \cdot 0{,}3}{1000 - 31{,}67 \cdot 0{,}3} \approx 6{,}0 \text{ g/kg}$$

$$h_1 = c \cdot t_1 + \left(c_p \cdot t_1 + r_0\right) \cdot X_1 = 1{,}0 \cdot 25 + \left(1{,}86 \cdot 25 + 2442\right) \cdot 0{,}006 = 39{,}9 \approx 40 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{X_1}{18}\right) \cdot \frac{t_1 + 273}{273} = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{0{,}006}{18}\right) \cdot \frac{25 + 273}{273} = 0{,}851 \text{ m}^3\text{/kg}$$

b. Obliczamy ile kilogramów powietrza znajdowało się w pomieszczeniu:

$$m_{ps1} = \frac{V_1}{v_1} = \frac{20}{0{,}851} = 23{,}5 \text{ kg}$$

c. Dysponując ta daną możemy określić jak zmieni się zawartość wilgoci i entalpia powietrza po wprowadzeniu 164,5g pary wodnej o temperaturze t=25°C:

$$\Delta x = \frac{m_p}{m_{ps1}} = \frac{164{,}5}{23{,}5} = 7 \text{ g/kg}$$

$$\Delta h = \left(c_p \cdot t + r_o\right) \cdot \Delta X = \left(1{,}86 \cdot 25 + 2442\right) \cdot 0{,}007 = 17{,}4 \text{ kJ/kg}$$

d. Bazując na uzyskanych wynikach obliczamy parametry powietrza po nawilżeniu:

$$x_2 = x_1 + \Delta x = 6 + 7 = 13 \text{ g/kg}$$

$$h_2 = h_1 + \Delta h = 40 + 17{,}4 = 57{,}4 \text{ kJ/kg}$$

$$\varphi_2 = \frac{p_b}{p''} \cdot \frac{x_2}{x_2 + 622} = \frac{1000}{31{,}67} \cdot \frac{13}{13 + 622} \approx 0{,}65 = 65 \text{ \%}$$

$$h_2 = c \cdot t_2 + \left(c_p \cdot t_2 + r_0\right) \cdot X_2 \;\Rightarrow\; t_2 = \frac{h_2 - r_o \cdot X_2}{c + c_p \cdot X_2} = \frac{57{,}4 - 2442 \cdot 0{,}013}{1{,}0 + 1{,}86 \cdot 0{,}013} \approx 25 \text{ °C}$$

$$v_2 = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{X_2}{18} \right) \cdot \frac{t_2 + 273}{273} = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{0{,}013}{18} \right) \cdot \frac{25 + 273}{273} = 0{,}883 \text{ m}^3/\text{kg}$$

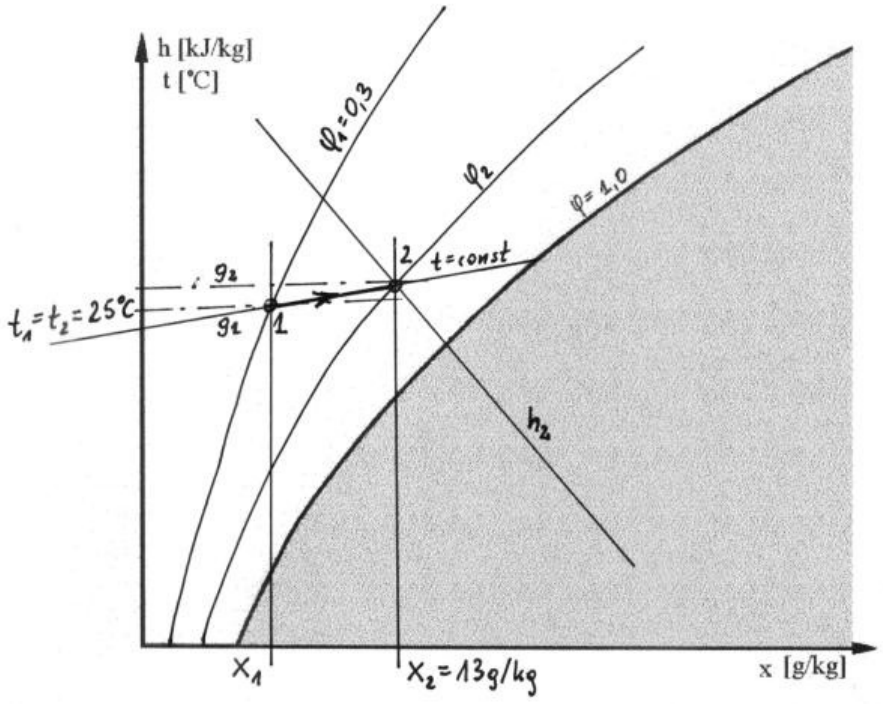
2) wyznaczamy szukane wielkości posługując się wykresem h-x

a. Znając początkową temperaturę i wilgotność względną powietrza odnajdujemy na wykresie h-x punkt (1) reprezentujący parametry tego powietrza. Leży on na przecięciu izotermy t=25°C i krzywej stałej wilgotności względnej φ=30%.
b. Prowadząc linię pionową z punktu 1 odczytujemy początkową zawartość wilgoci w powietrzu: x_1=6 g/kg. Do dalszych rozważań będzie również potrzebna znajomość gęstości powietrza, którą odczytujemy z osi odciętych: g_1=1,18 kg/m^3.
c. Do powietrza została wtryśnięta para wodna o temperaturze równej temperaturze tego powietrza wobec tego nawilżanie będzie przebiegało po izotermie t=25°C. Szukany punkt (2) reprezentujący parametry powietrza po nawilżeniu będzie znajdował się na tej linii. Aby go odnaleźć musimy określić o ile wzrosła zawartość wilgoci w nawilżanym powietrzu (Δx). W tym celu najpierw obliczamy ile kilogramów powietrza znajdowało się w pomieszczeniu a następnie szukane x_2:

$$m_{ps1} = g_1 \cdot V_1 = 1{,}18 \cdot 20 = 23{,}6 \text{ kg}$$

$$x_2 = x_1 + \Delta x = x_1 + \frac{m_p}{m_{ps1}} = 6 + \frac{164{,}5}{23{,}6} \approx 13 \text{ g/kg}$$

d. Odnajdujemy punkt (2) leżący na przecięciu linii stałej temperatury t=25°C i linii stałej zawartości wilgoci x=13 g/kg.
e. Dla odnalezionego punktu odczytujemy pozostałe parametry powietrza po nawilżeniu: $h_2 \approx$58 kJ/kg , $\varphi_2 \approx$ 65% , $g_2 \approx$1,175 kg/m^3.



Rysunek do zadania IX.1.1

ZADANIE X.1.1

Wyznaczyć parametry końcowe mieszaniny (x, φ, t) powstałej w wyniku zmieszania dwóch objętości powietrza o następujących parametrach: a) V_1=2m^3, t_1=40^{o}C, φ_1=40%, b) V_2=4m^3, t_2=5^{o}C, φ_2=80% przy założeniu stałego ciśnienia barometrycznego p_b=0,1MPa. Zadanie należy rozwiązać w sposób analityczny i graficznie (za pomocą wykresu h-x).

Rozwiązanie:

Dane:
V_1=2m^3, t_1=40^{o}C, φ_1=40%
V_2=4m^3, t_2=5^{o}C, φ_2=80%

Szukane:
x_3
φ_3
t_3

Wzory:

$$x = 602 \cdot \frac{p^{"} \cdot \varphi}{p_b - p^{"} \cdot \varphi}, \quad h = c \cdot t + \left(c_p \cdot t + r_0\right) \cdot X$$

$$v = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{X}{18}\right) \cdot \frac{t + 273}{273}, \quad m = \frac{V}{v}$$

$$x_3 = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2}, \quad h_3 = \frac{m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2}{m_1 + m_2}$$

1) wyznaczamy szukane wielkości na drodze obliczeń

a. Po odczytaniu z tabeli VI ciśnień par nasyconych w mieszanych objętościach powietrza (dla t_1=40^{o}C p_1"=73,75 hPa i dla t_2=5^{o}C p_2"=8,718 hPa, dla) obliczamy zawartość wilgoci:

$$x_1 = 622 \cdot \frac{\varphi_1 \cdot p_1^{"}}{p - \varphi_1 \cdot p_1^{"}} = 622 \cdot \frac{0{,}4 \cdot 73{,}75}{1000 - 0{,}4 \cdot 73{,}75} = 18{,}9 \text{ g/kg}$$

$$x_2 = 622 \cdot \frac{\varphi_2 \cdot p_2^{"}}{p - \varphi_2 \cdot p_2^{"}} = 622 \cdot \frac{0{,}8 \cdot 8{,}718}{1000 - 0{,}8 \cdot 8{,}718} = 4{,}4 \text{ g/kg}$$

b. Korzystając z podanych wzorów obliczamy entalpie mieszanych objętości powietrza (po odczytaniu wartości ciepła parowania dla temperatury t_1=40^{o}C i t_2=5^{o}C z tabeli VI lub VII):

$$h_1 = c \cdot t_1 + \left(c_p \cdot t_1 + r_0\right) \cdot X_1 = 1{,}0 \cdot 40 + \left(1{,}86 \cdot 40 + 2406\right) \cdot 0{,}0189 = 86{,}9 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = c \cdot t_2 + \left(c_p \cdot t_2 + r_0\right) \cdot X_2 = 1{,}0 \cdot 5 + \left(1{,}86 \cdot 5 + 2488\right) \cdot 0{,}0044 = 16{,}0 \text{ kJ/kg}$$

c. Do wyznaczenia mas mieszanych składników niezbędna jest znajomość ich objętości właściwych:

$$v_1 = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{X_1}{18}\right) \cdot \frac{t_1 + 273}{273} = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{0{,}0189}{18}\right) \cdot \frac{40 + 273}{273} = 0{,}927 \text{ m}^3\text{/kg}$$

$$v_2 = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{X_2}{18}\right) \cdot \frac{t_2 + 273}{273} = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{0{,}0044}{18}\right) \cdot \frac{5 + 273}{273} = 0{,}792 \text{ m}^3\text{/kg}$$

$$m_1 = \frac{V_1}{v_1} = \frac{2}{0{,}927} = 2{,}157 \text{ kg}, \qquad m_2 = \frac{V_2}{v_2} = \frac{4}{0{,}792} = 5{,}051 \text{ kg}$$

d. Ostatecznie liczymy entalpię i zawartość wilgoci w otrzymanej mieszaninie:

$$x_3 = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2} = \frac{2{,}157 \cdot 18{,}9 + 5{,}051 \cdot 4{,}4}{2{,}157 + 5{,}051} = 8{,}7 \text{ g/kg}$$

$$h_3 = \frac{m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2}{m_1 + m_2} = \frac{2{,}157 \cdot 86{,}9 + 5{,}051 \cdot 16{,}0}{2{,}157 + 5{,}051} = 37{,}2 \text{ kJ/kg}$$

e. Na koniec obliczamy temperaturę i wilgotność względną powstałej mieszaniny:

$$h_3 = \left(c + c_p \cdot X_3\right) \cdot t_3 + r_0 \cdot x_3 \;\Rightarrow\; t_3 = \frac{h_3 - r_0 \cdot X_3}{c + c_p \cdot X_3} = \frac{37{,}2 - 2500 \cdot 0{,}0087}{1{,}0 + 1{,}86 \cdot 0{,}0087} \approx 15{,}2 \text{ }^o\text{C}$$

Odczytane z tabeli IV ciśnienie party nasyconej dla temperatury mieszaniny 15°C wynosi p"=17,040 hPa, stąd:

$$\varphi_3 = \frac{p_b}{p''} \cdot \frac{x_3}{x_3 + 622} = \frac{1000}{17{,}040} \cdot \frac{8{,}7}{8{,}7 + 622} = 0{,}81 = 81\,\%$$

2) wyznaczamy szukane wielkości posługując się wykresem h-x

a. Na wykresie h-x odnajdujemy punkty 1 i 2 odpowiadające parametrom powietrza a i powietrza b. Punkt 1 leży na przecięciu izotermy t_1=40°C i krzywej wilgotności względnej φ=0,4, a punkt 2 na przecięciu izotermy t_2=5°C i wilgotności względnej φ=0,8.

b. Dla odnalezionych punktów 1 i 2 możemy odczytać pozostałe parametry: $h_1 \approx 90$kJ/kg, $x_1 \approx 19{,}5$g/kg, $h_2 \approx 16$ kJ/kg, $x_2 \approx 4{,}5$ g/kg oraz g_1 i g_2 lub v_1 i v_2 (niektóre z wykresów h-x zamiast stałych linii gęstości powietrza posiadają naniesione linie stałych objętości właściwych powietrza). Na podstawie odczytanych gęstości powietrza z wykresu h-x zamieszczonego na końcu skryptu ($g_1 \approx 1{,}11$kg/m^3 i $g_2 \approx 1{,}27$kg/m^3) obliczamy masy powietrza:

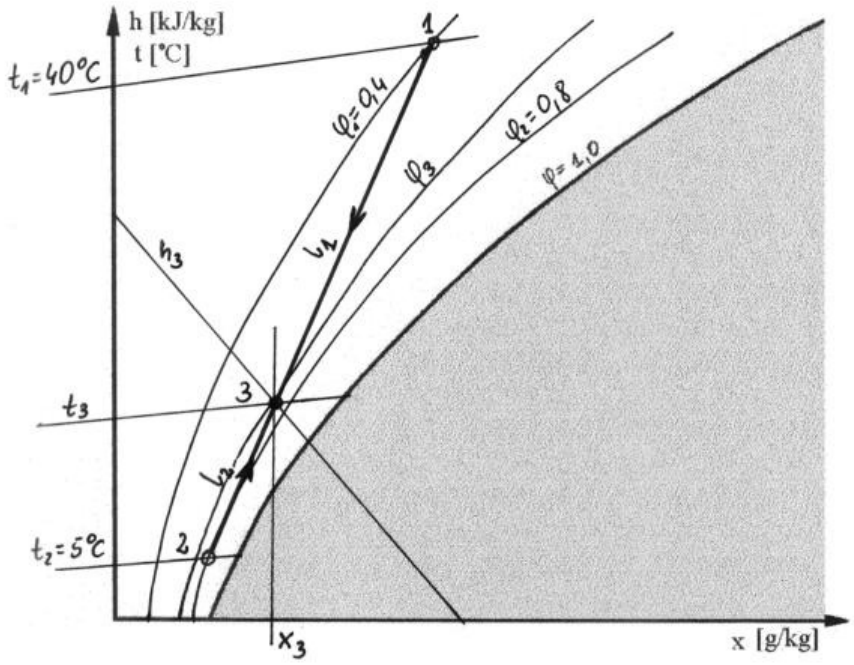
$$m_1 = g_1 \cdot V_1 = 1{,}11 \cdot 2 = 2{,}22 \text{ kg}, \quad m_2 = g_2 \cdot V_2 = 1{,}27 \cdot 4 = 5{,}08 \text{ kg}$$

c. Punkt charakteryzujący parametry uzyskanej mieszaniny leży na odcinku łączącym punkty 1 i 2. W celu dokładnego wyznaczenia punktu 3 wskazującego parametry mieszaniny należy uzyskany na wykresie odcinek podzielić proporcjonalnie do obliczonych udziałów:

$$l_1 = 1 - \frac{m_1}{m_1 + m_2} = 1 - \frac{2{,}22}{2{,}22 + 5{,}08} \approx 0{,}7\,, \quad l_2 = 1 - \frac{m_2}{m_1 + m_2} = 1 - \frac{5{,}08}{2{,}22 - 5{,}08} \approx 0{,}3$$

d. Przy wykreślaniu punktu 3 odpowiadającego parametrom mieszaniny należy odpowiednio odłożyć odległość l_1 lub l_2. Odległość l_1 to odcinek między punktem 1 a punktem 3 i analogicznie odległość l_2 to odcinek między punktem 2 a punktem 3.

e. Mając wyznaczony punkt 3 możemy odczytać wszystkie pozostałe parametry mieszaniny: $h_3 \approx 38$ kJ/kg , $x_3 \approx 9$ g/kg, $\varphi_3 \approx 80$ %, t_3=15,5 °C.



Rysunek do zadania X.1.1

1.2 Wilgotność równoważna drewna

Właściwości higroskopijne drewna oraz zjawiska sorpcji opisane są w książce pt. Klimat a drewno zabytkowe (Kozakiewicz, Matejak 2002). Tematyka ta zawarta jest również w innych opracowaniach (np. Krzysik 1978, Kozakiewicz 2000, Kozakiewicz 2003). Sposoby określania wilgotności drewna a także innych właściwości drewna podane są w skrypcie pt. „Materiały pomocnicze do ćwiczeń z fizyki drewna" – Kozakiewicz (2001) i Kozakiewicz (2005).

ZADANIE I.1.2
Przy pomocy wzorów, tabel i wykresów wyznaczyć wilgotność równoważną drewna znajdującego się na poddaszu krytym blachą w upalny letni dzień, w którym termometr suchy wskazuje temperaturę 60°C, a termometr wilgotny temperaturę 50°C.

Rozwiązanie:

Dane:
t_s= 60°C
t_m= 50°C

Szukane:
W_r

Wzory:

$$W_r = \frac{120}{t_s - t_m + 5}$$

$$W_r = \frac{115}{t_s - t_m + 4}$$

1) wyznaczamy szukaną wilgotność równoważną drewna za pomocą wzorów:
Do wyznaczenia wilgotności równoważnej przy znajomości temperatury termometru suchego i wilgotnego najwygodniej posłużyć się jednym ze wzorów empirycznych podanych na stronie 94 w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002. Temperaturę do poniższych wzorów wstawiamy w °C, a wyniki wilgotności równoważnej otrzymujemy bezpośrednio w %.

$$W_r = \frac{120}{t_s - t_m + 5} = \frac{120}{60 - 50 + 5} = 8{,}0\ \%$$

lub

$$W_r = \frac{115}{t_s - t_m + 4} = \frac{115}{60 - 50 + 4} = 8{,}6\ \%$$

2) wyznaczamy szukaną wilgotność równoważną drewna za pomocą tabel:
Z tabeli IX zamieszczonej na końcu skryptu odczytujemy szukane wartości wilgotności równoważnej drewna. Według tabeli IX, dla temperatury termometru suchego t_s= 60°C i różnicy psychrometrycznej $\Delta t = t_s - t_m = 60 - 50 = 10\ ^{o}\mathrm{C}$ wilgotność równoważna drewna przyjmuje wartość W_r=8,7 %.

3) wyznaczamy szukaną wilgotność równoważną drewna za pomocą wykresów:
Do wyznaczenia wilgotności równoważnej drewna możemy wykorzystać wykresy przedstawione w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002 (rys.55 na str.97 lub rys.58 na str.99). Odczytana z wykresu na rys.58 wilgotność równoważna drewna wynosi $W_r \approx 8{,}7\%$.

ZADANIE II.1.2

Określ zmianę wilgotności równoważnej drewna przeniesionego w okresie zimowym z pomieszczenia zamkniętego z centralnym ogrzewaniem (t_1=25°C i φ_1=30%) do pomieszczenia klimatyzowanego, w którym został zapewniony właściwy klimat dla przechowywania eksponatów drewnianych (t_2=18°C i φ=60 %). Do określenia szukanych wilgotności równoważnych drewna wykorzystaj wzory, tabele i wykresy.

Rozwiązanie:

Dane:	*Szukane:*	*Wzory:*
t_1= 25°C, φ_1=30%	W_{r1}	$W_r = e^{a_o} + a_1 \cdot \varphi + a_2 \cdot \varphi^2 + a_3 \cdot \varphi^3 - a_4 \cdot t$
t_2= 18°C, φ_2=60%	W_{r2}	

1) wyznaczamy szukane wilgotności równoważne drewna za pomocą wzorów:

Wilgotności równoważne drewna dla podanych parametrów powietrza (temperatury i wilgotności) możemy obliczyć posługując się jednym ze wzorów empirycznych np. wzorem podanym na stronie 102 w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002:

$$W_r = e^{a_o} + a_1 \cdot \varphi + a_2 \cdot \varphi^2 + a_3 \cdot \varphi^3 - a_4 \cdot t$$

Do powyższego równania wstawimy wartości współczynników podane w tabeli 6 na str.102 w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002 (najlepiej dla drewna świerkowego, bowiem właściwości higroskopijne drewna świerkowego są zbliżone do średniej właściwości higroskopijnych różnych rodzajów drewna ze strefy umiarkowanej): a_o=1,3996, a_1=0,04123, a_2=-0,6485·10^{-3}, a_3 =4,500·10^{-6}, a_4=-0,00363), stąd:

$$W_{r1} = e^{1,3996} + 0{,}04123 \cdot 30 + 0{,}6485 \cdot 10^{-3} \cdot 30^2 + 4{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 30^3 - 0{,}00363 \cdot 25 \approx 5{,}9\ \%$$

$$W_{r2} = e^{1,3996} + 0{,}04123 \cdot 60 + 0{,}6485 \cdot 10^{-3} \cdot 60^2 + 4{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 60^3 - 0{,}00363 \cdot 18 \approx 9{,}7\ \%$$

2) wyznaczamy szukane wilgotności równoważne drewna za pomocą tabel:

Na podstawie danych zestawionych w tabeli 5 (str.95) w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002, odczytujemy szukane wartości wilgotności:

- dla t_1= 25°C i φ_1=30% $\Rightarrow$ $W_{r1}\approx$5,8 %
- dla t_2= 18°C i φ_2=60% $\Rightarrow$ $W_{r2}\approx$10,5 %

3) wyznaczamy szukane wilgotności równoważne drewna za pomocą wykresów:

Do wyznaczenia wilgotności równoważnych drewna na podstawie znajomości temperatury i wilgotności względnej powietrza możemy wykorzystać jeden z wykresów przedstawionych na rys.54,55,56,57 (str.96,97 i 98) w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002. Wartości wilgotności równoważnych odczytane z wykresu 56 są następujące:

- dla t_1= 25°C i φ_1=30% $\Rightarrow$ $W_{r1}\approx$ 6 %
- dla t_2= 18°C i φ_2=60% $\Rightarrow$ $W_{r2}\approx$ 11 %

ZADANIE III.1.2

Posługując się wzorem empirycznym Keylwertha obliczyć wilgotność równoważną drewna modrzewia, topoli i dębu czerwonego znajdującego się w pomieszczeniu zamkniętym, w którym psychrometr wskazywał następujące temperatury: t_s=21^{o}C, t_m=17^{o}C.

Rozwiązanie:

Dane:	*Szukane:*	*Wzory:*
t_s= 23°C	$W_{r\,mod}$	$W_r = A - B \log (t_s - t_m)$
t_m= 17°C	$W_{r\,top}$	
	$W_{r\,dąb}$	

a. Z tabeli VIII zamieszczonej na końcu skryptu odczytujemy współczynniki A i B dla wymienionych w zadaniu rodzajów drewna:
   - modrzew: A=21,1%, B=14,2%
   - topola: A=21,0%, B=15,5%
   - dąb: A=20,2%, B=14,7%

   gdzie: współczynnik A to wilgotność równoważna drewna osiągana w procesie adsorpcji przy wilgotności względnej powietrza φ=83%, a współczynnik B to wilgotność równoważna osiągana w procesie desorpcji przy wilgotności względnej powietrza φ=37%.
b. Wstawiając do równania wartości powyższych współczynników oraz podane temperatury termometru suchego i mokrego obliczamy szukane wilgotności drewna:
   - modrzew: $W_{r.\mathrm{mod}} = 21{,}1 - 14{,}2 \cdot \log(21-17) = 12{,}6\,\%$
   - topola $W_{r.top} = 21{,}0 - 15{,}5 \cdot \log(21-17) = 11{,}7\,\%$
   - dąb: $W_{r.dąą} = 20{,}2 - 14{,}7 \cdot \log(21-17) = 11{,}3\,\%$

ZADANIE IV.1.2

Dowolnym sposobem określić wilgotność równoważną drewna składowanego na wolnym powietrzu, pod zadaszeniem w okresie zimowym i letnim. Drewno to jest składowane w okolicach Warszawy.

Rozwiązanie:

a. Aby poprawnie rozwiązać niniejsze zadanie należy przyjąć zbliżone do rzeczywistości warunki składowania drewna tj. średnią temperaturę i wilgotność względną powietrza w okresie letnim i zimowym. W tym celu najlepiej posłużyć się wykresami przedstawionymi na rys.11 (str.27) i na rys.13 (str.28) w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002.
b. Z wykresu na rysunku 11 odczytujemy, że średnia temperatura dla okolic Warszawy w zimie wynosi t_1=–4°C a w lecie t_2=17°C, natomiast z wykresu na rysunku 13 odczytujemy średnie wilgotności względne powietrza w zimie φ_1=92% i w lecie φ_2 =74%.
c. Na podstawie uzyskanych danych określamy szukane wilgotności równoważne drewna np. posługując się wykresem na rys.57 (str.96) z książki pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002:
   - dla okresu zimowego (t_1=–4°C, φ_1=92%) $W_{r1}\approx$27%
   - dla okresu letniego (t_2=17°C, φ_2 =74%) $W_{r1}\approx$14%

ZADANIE V.1.2

Obliczyć końcową wilgotność boazerii drewnianej jeżeli wiadomo że w wyniku obniżenia się wilgotności powietrza w pomieszczeniu odparowało z niej około 20 kg wody. Wilgotność początkowa boazerii wynosiła 12%, a jej masa 448kg.

Rozwiązanie:

Dane:
$W_1 = 12\%$
m_{w1}=4448kg
m_{H_2O}=20kg

Szukane:
$W_{r\,2}$

Wzory:

$$W = W_o = \frac{m_{H_2O}}{m_o} = \frac{m_w - m_o}{m_o} = \frac{m_w}{m_o} - 1$$

a. Wychodząc z zależności opisującej wilgotność obliczamy masę drewna w stanie absolutnie suchym:

$$W_1 = \frac{m_{w1} - m_0}{m_0} \Rightarrow m_o = \frac{m_{w1}}{1 + W_1} = \frac{448}{1 + 0{,}12} = 400 \text{ kg}$$

b. Wykorzystując związek między masą drewna wilgotnego i suchego a zawartą w drewnie masą wody obliczamy ile będzie ważyła boazeria po odparowaniu 20 kg wody:

$$m_{1H_2O} = m_{w1} - m_o \quad \text{i} \quad m_{2H_2O} = m_{w2} - m_o\,,\ \Delta m_{H_2O} = m_{1H_2O} - m_{2H_2O} = m_{w1} - m_{w2}$$

$$m_{w2} = m_{w1} - \Delta m_{H_2O} = 448 - 20 = 428 \text{ kg}$$

c. Ostatecznie obliczamy końcową wilgotność boazerii:

$$W_2 = \frac{m_{w2} - m_0}{m_0} = \frac{428 - 400}{400} = 0{,}07 = 7\ \%$$

ZADANIE VI.1.2

Posługując się wzorem empirycznym stosowanym w USA (Praca zbiorowa 1999) obliczyć jak zmieni się wilgotność równoważna drewna w powietrzu o temperaturze 15 ^oC przy skokowej zmianie wilgotności względnej powietrza z 55% na 80%.

Rozwiązanie:

Dane:
$t_1 = t_2 = 15\ ^oC$
φ_1=55%
φ_2=80%

Szukane:
$W_{r\,1}$
$W_{r\,2}$

Wzory:

$$W_r = \frac{1800}{M} \cdot \left(\frac{K \cdot \varphi}{100 - K \cdot \varphi} + \frac{K_1 \cdot K \cdot \varphi + 2K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2}{100 + K_1 \cdot K \cdot \varphi + K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2} \right) [\%]$$

$M = 349 + 1{,}29 \cdot t + 0{,}0135 \cdot t^2$
$K = 0{,}805 + 0{,}000736 \cdot t - 0{,}00000273 \cdot t^2$
$K_1 = 6{,}27 - 0{,}00938 \cdot t - 0{,}000303 \cdot t^2$
$K_2 = 1{,}91 + 0{,}0407 \cdot t - 0{,}000293 \cdot t^2$

a. wyliczamy poszczególne współczynniki równania dla zadanej temperatury powietrza równej 15 ^oC, a następnie szukane wilgotności równoważne drewna:

$M = 349 + 1{,}29 \cdot 15 + 0{,}0135 \cdot 15^2 = 371{,}3875$
$K = 0{,}805 + 0{,}000736 \cdot 15 - 0{,}00000273 \cdot 15^2 = 0{,}815426$
$K_1 = 6{,}27 - 0{,}00938 \cdot 15 - 0{,}000303 \cdot 15^2 = 6{,}061125$
$K_2 = 1{,}91 + 0{,}0407 \cdot 15 - 0{,}000293 \cdot 15^2 = 2{,}454575$

$$W_{r1} = \frac{1800}{371{,}3875} \cdot \left(\frac{0{,}815426 \cdot 55}{100 - 0{,}814526 \cdot 55} + \frac{6{,}061125 \cdot 0{,}815426 \cdot 55 + 2 \cdot 6{,}061125 \cdot 2{,}454575 \cdot 0{,}815426^2 \cdot 55^2}{100 + 6{,}061125 \cdot 0{,}815426 \cdot 55 + 6{,}061125 \cdot 2{,}454575 \cdot 0{,}815426^2 \cdot 55^2} \right) = 13{,}6\ \%$$

$$W_{r2} = \frac{1800}{371{,}3875} \cdot \left(\frac{0{,}815426 \cdot 80}{100 - 0{,}814526 \cdot 80} + \frac{6{,}061125 \cdot 0{,}815426 \cdot 80 + 2 \cdot 6{,}061125 \cdot 2{,}454575 \cdot 0{,}815426^2 \cdot 80^2}{100 + 6{,}061125 \cdot 0{,}815426 \cdot 80 + 6{,}061125 \cdot 2{,}454575 \cdot 0{,}815426^2 \cdot 80^2} \right) = 18{,}7\ \%$$

1.3 Sterowanie klimatem

Dane dotyczące klimatu zewnętrznego i klimatu panującego w różnego typu pomieszczeniach podane są w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" (Kozakiewicz, Matejak 2002). Więcej informacji o klimacie i sterowaniu parametrami klimatu można odnaleźć w literaturze specjalistycznej (np.: Okołowicz 1969, Recknagel-Sprenger 1976), w tym obcojęzycznej (np. Bekhta, Kozakiewicz 2001).

ZADANIE I.1.3

W pomieszczeniu ekspozycyjnym o objętości 200 m^3 utrzymywana jest temperatura 20°C i wilgotność względna powietrza 60 %. Pomieszczenie to zostało wywietrzone poprzez krótkotrwałe otwarcie okna. W trakcie wietrzenia około 80 % powietrza znajdującego się w pomieszczeniu zostało wymienione przez powietrze zewnętrzne o temperaturze –5°C i wilgotności względnej 90%. Wyznaczyć parametry powstałej mieszaniny. Obliczyć ile wody musi odparować z nawilżaczy, aby uzyskać początkową wilgotność powietrza (65%). Przemiany powietrza przedstawić na wykresie h-x.

Rozwiązanie:

Dane:	*Szukane:*	*Wzory:*
t_1= 20°C, φ_1 = 60 %	m_{H_2O}	$m = V \cdot g$
t_2= - 5°C, φ_2 = 90%		
V = 100 m^3		
$\frac{m_{ps1}}{m_{ps2}} = \frac{2}{8}$		

a. Na podstawie danych z treści zadania odnajdujemy na wykresie h-x punkty 1 i 2 reprezentujące parametry powietrza w pomieszczeniu (punkt 1) i na zewnątrz (punkt 2).
b. Dla zaznaczonych punktów odczytujemy zawartość wilgoci i entalpię: x_1=9g/kg, h_1=43kJ/kg, x_2=2,2g/kg, h_2=1 kJ/kg.
c. Na podstawie uzyskanych odczytów i danych z treści zadania obliczamy zawartość wilgoci i entalpię w mieszaninie powstałej bezpośrednio po wywietrzeniu pomieszczenia :

$$x_3 = \frac{x_1 \cdot 80 + x_2 \cdot 20}{100} = \frac{9 \cdot 80 + 2{,}2 \cdot 20}{100} \approx 7{,}6 \text{ g/kg}$$

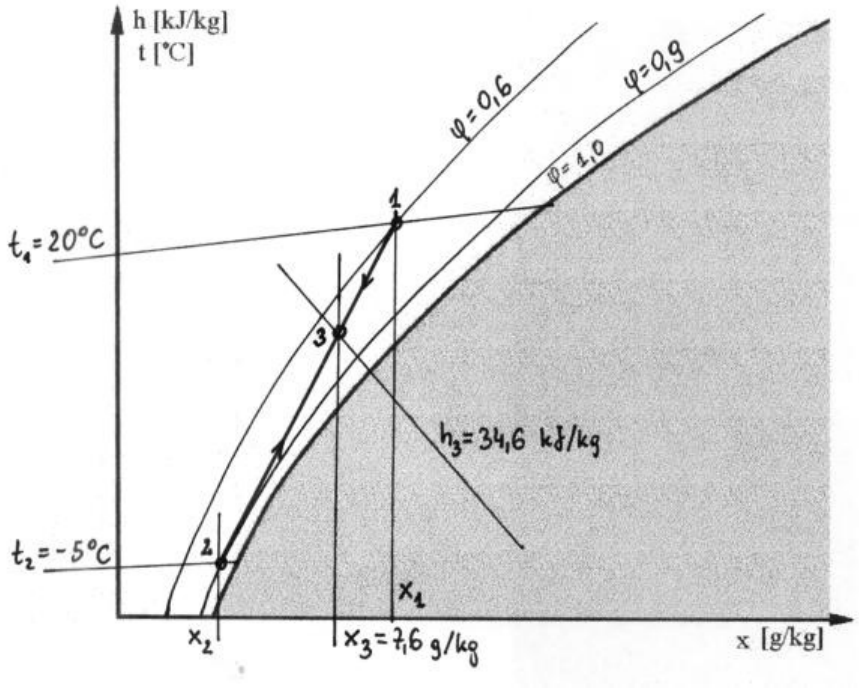
$$h_3 = \frac{80 \cdot h_1 + 20 \cdot h_2}{100} = \frac{43 \cdot 80 + 1 \cdot 20}{100} = 34{,}6 \text{ kJ/kg}$$

d. Znając entalpię i zawartość wilgoci w mieszaninie powietrza odnajdujemy na wykresie h-x punkt 3. Dla punktu 3 odczytujemy pozostałe wielkości: φ_3=70%, t_3=15°C, g_3=1,22kg/m^3.
e. Obliczamy ile kg powietrza znajduje się w pomieszczeniu po jego wywietrzeniu:

$$m_{ps3} = V \cdot g_3 = 200 \cdot 1{,}22 = 244 \text{ kg}$$

f. Ostatecznie obliczamy ilość wody jaka musi odparować z nawilżaczy, aby cała masa powietrza zawarta w pomieszczeniu przyjęła wilgotność wyjściową φ =65 %.

$$m_{H_2O} = m_{ps3} \cdot (x_1 - x_3) = 244 \cdot (9 - 7{,}6) \approx 342 \text{ g}$$



Rysunek do zadania I.1.3

ZADANIE II.I.3

W budynku muzeum o objętości 20000 m^3 w wyniku wentylacji, następuje w ciągu godziny całkowita wymiana powietrza. W budynku utrzymywana jest stała temperatura 20^{o}C. Obliczyć ile wilgoci w ciągu każdej doby należy dostarczać do budynku muzeum, aby w okresie zimowym utrzymać stałą wilgotność względną powietrza właściwą dla przechowywania eksponatów drewnianych i malarstwa.

Rozwiązanie:

Dane:	*Szukane:*	*Wzory:*
t_1= 20°C	m_{H_2O}	$m = V \cdot g$
V = 20000 m^3		
Założenia:		
φ_1 = 60 %		
t_2= 0°C, φ_2 = 90%		

a. Korzystając z informacji zawartych w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002, określamy wilgotność względną powietrza właściwą dla przechowywania eksponatów drewnianych i malarstwa np. na podstawie wykresu na rys.76 (str.126). Wilgotność ta wynosi około 60%.
b. Na podstawie wykresów przedstawionych na rys.11 (str.27) i rys.13 (str.28) przyjmujemy średnie temperaturę i wilgotność powietrza panującą na zewnątrz w okresie grzewczym: t_2= 0°C, φ_2 = 90%.
c. Korzystając z wykresu h-x wyznaczamy punkty 1 i 2 prezentujące parametry powietrza zewnętrznego i powietrza znajdującego się w budynku muzeum. Dla odnalezionych punktów odczytujemy zawartości wilgoci: x_1=8,8g/kg, x_2=3,2g/kg oraz gęstość powietrza suchego wypełniającego budynek muzeum: g_1=1,195 kg/m^3.

d. Na podstawie odczytów z wykresu h-x obliczamy masę powietrza znajdującego się w budynku muzeum według poniższej zależności:

$$m_{ps} = V \cdot g_1 = 20000 \cdot 1{,}195 = 23900\,\text{kg}$$

e. Dysponując kompletem danych możemy obliczyć jaką ilość wilgoci należy wprowadzać w ciągu każdej doby do budynku muzeum aby utrzymać stałą wilgotność względną powietrza równą 60% (jeśli w ciągu godziny następuje jedna wymiana powietrza to wciągu doby jest ich 24):

$$m^{\bullet}_{H_2O} = m^{\bullet}_{ps} \cdot (x_1 - x_2) = 23900 \cdot (8{,}8 - 3{,}2) = 133840\,\text{g/kg}$$

$$m_{H_2O} = 24 \cdot m^{\bullet}_{H_2O} = 24 \cdot 133{,}84 = 3212{,}16\,\text{kg} \;\Rightarrow\; m_{H_2O} = 3{,}2\,\text{tony}$$

ZADANIE III.I.3

W kościele drewnianym o objętości ok. 5000m^3 panuje w zimie temperatura około 5^{o}C i wilgotność względna powietrza ok. 80%. Określić jak będą zmieniały się parametry powietrza w trakcie niedzielnych nabożeństw w których uczestniczy ok. 200 osób, jeśli wiadomo że przed ich rozpoczęciem kościół jest ogrzewany do temperatury 15^{o}C.

Rozwiązanie:

Dane:	*Szukane:*	*Wzór:*
t_1= 5°C, φ_1 = 80 %	φ_3, x_3 , h_3 , t_3	$m = V \cdot g$
t_2= 15°C		
V = 5000 m^3		

a. Zaniedbując naturalną wentylację i straty cieplne możemy, posługując się wykresem h-x, odczytać wilgotność względną powietrza znajdującego się w kościele, po ogrzaniu z 5°C do 15°C. Wilgotność ta będzie miała wartość φ_2 = 40 % (punkt 2), przy czym zawartość wilgoci nie ulegnie zmianie: $x_1 = x_2$ = 4,2 g/kg, a entalpia wzrośnie z h_1= 16 kJ/kg do h_2 = 26kJ/kg

Po wypełnieniu się kościoła ludźmi stopniowo będzie wzrastała wilgotność względna powietrza bowiem każdy człowiek w ciągu godziny oddaje około 50 g wilgoci. Organizm wydziela także ciepło: podczas odpoczynku w pozycji siedzącej jest to ilość ok. 300 kJ/h (str.39 w książce „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002). Zaniedbując straty cieple przez okna i ściany kościoła możemy obliczyć końcową temperaturę i wilgotność powietrza (po godzinnym nabożeństwie).

b. Określamy ile wilgoci i ciepła w ciągu godziny wytwarza 200 osób:

$$\Delta m_{H_2O} = 200 \cdot 50 = 10000\,\text{g}$$

$$\Delta Q = 200 \cdot 300 = 60000\,\text{kJ}$$

c. Po odczytaniu z wykresu h-x gęstości powietrza w kościele (dla punktu 2 g_2=1,225 kg/m^3) obliczamy masę znajdującego się tam powietrza:

$$m_{ps} = V \cdot g_2 = 5000 \cdot 1{,}225 = 6125\,\text{kg}$$

d. Obliczamy ile wilgoci wytworzonej przez ludzi przypadnie na jeden kilogram powietrza suchego znajdującego się w kościele (obliczamy przyrost zawartości wilgoci):

$$\Delta x = x_3 - x_2 = \frac{\Delta m_{H_2O}}{m_{ps}} = \frac{10000}{6125} = 1{,}6\,\text{g/kg}$$

d. Obliczamy ile ciepła wytworzonego przez ludzi przypada na jeden kilogram powierza suchego znajdującego się w kościele (obliczamy przyrost entalpii):

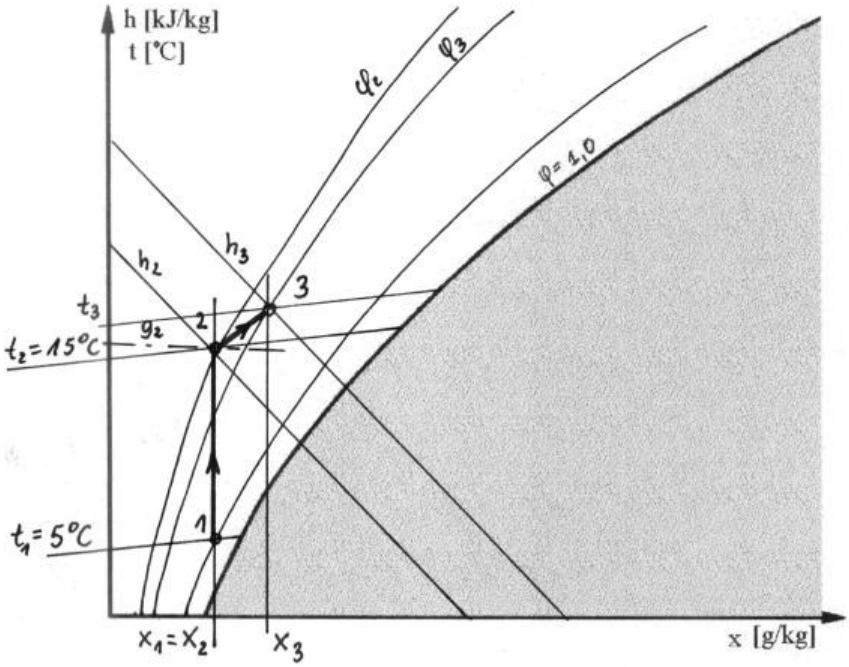
$$\Delta h = h_3 - h_2 = \frac{\Delta Q}{m_{ps}} = \frac{60000}{6125} \approx 10\,\text{kJ/kg}$$

e. Obliczamy końcową zawartość wilgoci i entalpię (punkt 3):

$$x_3 = x_2 + \Delta x = 4{,}2 + 1{,}6 = 5{,}8\ \text{g/kg}$$

$$h_3 = h_2 + \Delta h = 26 + 10 = 36\ \text{kJ/kg}$$

f. Dysponując końcową wartością entalpii i zawartości wilgoci w powietrzu (punkt 3), z wykresu h-x, odczytujemy końcową wilgotność względną i temperaturę: $\varphi_3 \approx 50\%$, $t_3 \approx 16^oC$.



Rysunek do zadania III.1.3

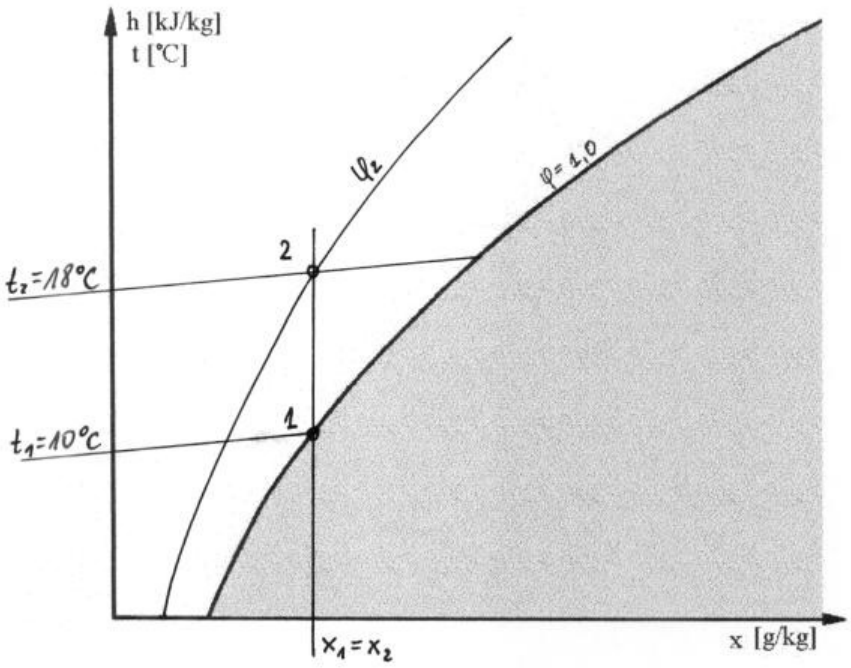
ZADANIE IV.1.3

W sali ekspozycyjnej znajdują się stare okna, których powierzchnia wewnętrzna ma temperaturę ok. 10 ^oC. Temperatura w sali utrzymywana jest na stałym poziomie ok. 18^oC. Przy jakiej wilgotności względnej powietrza znajdującego się w sali może dojść do skraplania się pary wodnej na powierzchniach szyb.

Rozwiązanie:

Dane:	*Szukane:*
t_1= 10°C	φ_2
t_2= 18°C	

a. Powyższe zadanie można szybko rozwiązać posługując się wykresem h-x. Poruszając się po linii stałej temperatury równej 10^oC odnajdujemy punkt (1) przecięcia się jej z krzywą nasycenia (φ_1=100%) i odczytujemy zawartość wilgoci x_1=7,8 g/kg.
b. Odczytana zawartość wilgoci to wartość graniczna. Aby nie doszło do kondensacji pary wodnej na powierzchni szyb na każdy kilogram powietrza suchego znajdującego się w sali nie może przypadać więcej 7,8 grama wilgoci. Aby odczytać szukaną wilgotność względną powietrza z punktu 1 prowadzimy linię pionową stałej zawartości wilgoci aż do przecięcia się z izotermą t_2= 18°C (punkt 2). Dla uzyskanego w ten sposób punktu wilgotność względna powietrza wynosi: $\varphi_2 \approx 60\%$.



Rysunek do zadania IV.1.3.

ZADANIE V.1.3

Obraz portretowy namalowany na desce lipowej o masie 300g i wymiarach 300 mm na 200 mm i grubości 10 mm został umieszczony w szczelnym opakowaniu transportowym o objętości 0,016m^3. W chwili pakowania obraz miał wilgotność równoważną dla klimatu optymalnego do przechowywania dzieł sztuki tj. dla temperatury 20°C i wilgotności względnej powietrza 55%. Obraz ten po zabezpieczeniu został przetransportowany do innego muzeum. Podczas transportu opakowanie wraz z obrazem przez pewien czas przebywało na słońcu i wówczas jego temperatura osiągnęła wartość 40°C. Określić, jaka była wówczas wilgotność względna powietrza w opakowaniu i wilgotność podobrazia.

Rozwiązanie:

Dane:	*Szukane:*	*Wzory:*
t_1= 20°C, φ_1 = 55 %	φ_2	$m = V \cdot g$
t_2= 40°C	W_2	
V = 0,016 m^3		
s = 10 mm		
a = 300 mm		
b = 200 mm		
m_{w1}= 300g		

a. Obliczamy objętość obrazu portretowego:
$$V_d = s \cdot a \cdot b = 0{,}01 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}3 = 0{,}0006 \text{ m}^3$$
b. Biorąc pod uwagę porowatą strukturę drewna z niewielkim błędem przyjmujemy, że objętość powietrza zawartego w opakowaniu równa jest objętości opakowania (V=0,016m^3). Masę powietrza (t_1= 20°C, φ_1=55 %) znajdującego się w opakowaniu, po odczytaniu gęstości z wykresu h-x (g_1=1,20 kg/m^3) obliczamy ze wzoru:
$$m_{ps} = g_1 \cdot V = 1{,}20 \cdot 0{,}016 = 0{,}0192 \text{ kg}$$

c. Wilgotność równoważną podobrazia dla optymalnych warunków przechowywania eksponatów drewnianych, czyli wilgotność początkową drewna odczytujemy np. z tabeli 5 (str.95) z książki pt. „Klimat a drewno zabytkowe – Kozakiewicz, Matejak 2002:
dla t_1= 20°C i φ_1=55 % wilgotność równoważna W_{r1}=9,8 %

d. Znając masę drewna wilgotnego i jego wilgotność możemy obliczyć ile zwiera wody:

$$W_{r1} = \frac{m_{w1} - m_0}{m_o} \Rightarrow m_o = \frac{m_{w1}}{1+W_1} = \frac{300}{1+0{,}098} = 273{,}2 \text{ g}$$

$$m_{H_2O} = m_{w1} - m_o = 300 - 273{,}2 = 26{,}8 g$$

e. Znając temperaturę i wilgotność względną powietrza można obliczyć lub wyznaczyć z wykresu h-x zawartość wilgoci w powietrzu tuż po zapakowaniu obrazu a następnie obliczyć masę pary wodnej zwartej w tym powietrzu. Wyznaczona z wykresu h-x zawartość wilgoci wynosi x_1=8 g/kg , stąd: $m_p = x_1 \cdot m_{ps} = 8 \cdot 0{,}0192 = 0{,}154$ g

f. Dla uproszczenia zakładamy że opakowanie transportowe jest szczelne (zazwyczaj wykonuje się niewielki otwór służący do wyrównywania ciśnień) i nie następuje istotna wymiana wilgoci między wnętrzem pudła a otoczeniem. Po wzroście temperatury do 40°C spadnie wilgotność względna powietrza w opakowaniu do wartości około 18% (wartość odczytana z wykresu h-x). Drewno będzie dążyło do osiągnięcia nowej, niższej wilgotności równoważnej wynoszącej około 3,5% (wartość odczytana z tabeli 5). Jednak nie zdoła jej osiągnąć bowiem w miarę odparowywania wody z drewna będzie stopniowo wzrastała wilgotność względna powietrza w opakowaniu.

g. Aby powietrze to osiągnęło wyjściową wilgotność 55% przy temperaturze 40°C wystarczy aby odparowała do niego obliczona poniżej ilość wilgoci:

$$\Delta m_p = (x_2 - x_1)_1 \cdot m_{ps} = (20{,}3 - 8{,}0) \cdot 0{,}0192 = 0{,}236 \text{ g}$$

gdzie x_2 to zawartość wilgoci odczytana z wykresu h-x dla punktu leżącego na przecięciu izotermy 40°C z linią stałej wilgotności względnej powietrza równej 55%.

h. Obliczamy jak zmieni się wilgotność podobrazia po odparowaniu obliczonej wyżej ilość wilgoci:

$$m_{w2} = m_{w1} - \Delta m_{H_2O} = 300 - 0{,}236 = 299{,}8 \text{ g}$$

$$W_2 = \frac{m_{w2} - m_o}{m_o} = \frac{299{,}8 - 273{,}2}{273{,}2} \approx 9{,}7 \%$$

Podsumowując powyższe rozważania wilgotność drewna podobrazia znajdującego się w opakowaniu praktycznie nie ulegnie zmianie podobnie jak wilgotność względna powietrza wypełniającego jego wnętrze.

2. Zadania do samodzielnego rozwiązania

Zadania ułożone są tematycznie w układzie identycznym jak zadania w pierwszej części skryptu. Zadania 1-10 dotyczą podstawowych parametrów i przemian powietrza analizowanych przy wykorzystaniu wykresu h-x (Molliera). Zadania 11-15 dotyczą wyznaczania a także przewidywania wilgotności drewna przechowywanego w określonych warunkach. Zadania 16-20 to zadania przekrojowe z elementami sterowania klimatem. We wszystkich zadaniach należy założyć stałą wartość ciśnienia powietrza (p_b=0,1MPa).

2.1. Treść zadań

ZADANIE **1**
Wyznaczyć pozostałe parametry powietrza (h, φ, g) o zawartości wilgoci x=15 g/kg i temperaturze 24^{o}C.

ZADANIE **2**
Wyznaczyć pozostałe parametry powietrza (h, x, v) o temperaturze t=30°C i wilgotności względnej φ=80%.

ZADANIE **3**
Ile kilogramów powietrza znajduje się w pomieszczeniu o objętości 1200 m^3 o temperaturze 22°C. Wilgotność względna tego powietrza wynosi 55%.

ZADANIE **4**
Jakie parametry (h, x, φ, g) osiągnie powietrze zewnętrzne o temperaturze 0°C i wilgotności względnej 100% po ogrzaniu do temperatury 40^{o}C.

ZADANIE **5**
Obliczyć ile pary wodnej skropli się podczas oziębiania objętościowego powietrza o wilgotności względnej 70 % i temperaturze 25°C do temperatury 5°C. Zaznaczyć przebieg procesu na wykresie h-x.

ZADANIE **6**
Do 40 kg powietrza o temperaturze 30°C i wilgotności względnej 30 % wtryśnięto 200g ciekłej wody o temperaturze 35°C. Określić parametry końcowe powietrza (t, φ, h, x). Zaznaczyć przebieg procesu na wykresie h-x.

ZADANIE **7**
Do 60 kg powietrza o temperaturze 20°C i wilgotności względnej 40 % wtryśnięto 300g pary wodnej o temperaturze 80^{o}C. Określić parametry końcowe tego powietrza. Zaznaczyć przebieg procesu na wykresie h-x.

ZADANIE **8**
Powietrze o temperaturze 20°C i wilgotności względnej 70 % zmieszano w stosunku 1 : 5 z powietrzem o temperaturze 40°C i wilgotności względnej 70 %. Wyznaczyć parametry powstałej mieszaniny (h, x, t, φ, g). Zaznaczyć proces na wykresie h-x.

ZADANIE **9**
Korzystając z wykresu przedstawionego na rys.29 (str.52) w książce pt. "Klimat a drewno zabytkowe - Kozakiewicz, Matejak 2002, określić wilgotność względną powietrza w pomieszczeniu ogrzewanym o temperaturze 25^{o}C jeżeli wiadomo, że na zewnątrz temperatura powietrza wynosi 0^{o}C a wilgotność względna 80%. Uzyskany wynik porównaj z obliczeniami teoretycznymi czyli wartością wilgotności względnej powietrza zewnętrznego po jego ogrzaniu do temp 25 ^{o}C.

ZADANIE **10**
Za pomocą wykresu h-x lub obliczeń określić średnie parametry powietrza (h, x, g) w nieogrzewanym kościele w okresie letnim (3 kwartał) i zimowym (1 kwartał). Dane dotyczące wilgotności względnej i temperatury w kościele należy odczytać z rys.27a na str.48 w książce pt. „Klimat a drewno zabytkowe"- Kozakiewicz, Matejak, 2002.

ZADANIE **11**
Na podstawie wykresu przedstawiającego roczne zmiany temperatury i wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach muzeum w Paryżu (rys.30, str.54 „Klimat a drewno zabytkowe" – Kozakiewicz, Matejak 2002) wyznacz ekstremalne wilgotności równoważne jakie mogło osiągać przechowywane tam drewno.

ZADANIE **12**
Drewno, które znajdowało się poza budynkiem w temperaturze 8°C i wilgotności względnej 80% zostało przeniesione do pomieszczenia o temp. 18°C i wilgotności 45%. Obliczyć jak i o ile zmieni się wilgotność tego drewna po dojściu do równowagi higroskopijnej w nowym klimacie.

ZADANIE **13**
Korzystając z wykresów na rys.20 (str.34) z książki pt. "Klimat a drewno zabytkowe" - Kozakiewicz, Matejak 2002, wyznaczyć ekstremalne wilgotności równoważne drewna przyjmowane w ciągu jednej doby (w dniu 3 maja 2000 roku).

ZADANIE **14**
Na podstawie wykresu na rys.28 (str.50) z książki pt. "Klimat a drewno zabytkowe" - Kozakiewicz, Matejak 2002, określić średnie wilgotności równoważne drewna w miesiącu kwietniu i czerwcu. Drewno to było przechowywane w laboratorium na Wydziale Technologii Drewna w Warszawie.

ZADANIE **15**
Ile wilgoci wchłonie rzeźba drewniana przeniesiona z pokoju do piwnicy. Rzeźba ta przechowywana w pokoju o średniej temperaturze 20^{o}C i wilgotności względnej powietrza 50% miała masę 3,2 kg. W piwnicy średnia temperatura powietrza wynosiła 5^{o}C a wilgotność względna powietrza 95%.

ZADANIE **16**
Obliczyć ile ciepła należy zużyć do ogrzania powietrza zimowego o temperaturze –10°C i wilgotności względnej 80 %, do temperatury pokojowej t = 20°C. Jak zmienią się pozostałe parametry ogrzewanego powietrza (x, φ, h). Ocenić czy będą one właściwe dla przechowywania eksponatów drewnianych. Zaznaczyć przemianę na wykresie h-x .

ZADANIE **17**
Do budynku wpływa powietrze nasycone z zewnątrz o temp. – 5 °C. Które jest następnie ogrzewane we wnętrzu do temp. 20°C. Jaką ilość wilgoci na godzinę należy dostarczyć do pomieszczeń muzealnych (o objętości 50000 m^3), aby zapewnić φ = 55 % przy założeniu, że następują tam dwie wymiany powietrza na godzinę. Ocenić czy zawieszone na kaloryferach kamionkowe nawilżacze będą stanowiły wystarczająco wydajne źródło wilgoci.

ZADANIE **18**
W ciepłe, letnie popołudnie w urządzaniu klimatyzacyjnym mieszane jest powietrze zewnętrzne z powietrzem znajdującym się w pomieszczeniach przyziemia budynku uczelni, w stosunku 3:2. Wyznaczyć parametry powstającej mieszaniny jeśli wiadomo, że powietrze zewnętrzne ma temperaturę 30^{o}C i wilgotność względną 70%, a powietrze wewnątrz budynku ma temperaturę 20^{o}C i wilgotność względną 75%. Ocenić czy temperatura i wilgotność powstającej mieszaniny będą odpowiadały warunkom komfortowym.

ZADANIE **19**
Przez magazyn dzieł sztuki zlokalizowany w podziemiach budynku muzealnego przebiega rura ciepłownicza. Magazyn ten zajmuje objętość ok. 2500 m^3, a znajdujące się w nim powietrze ma temperaturę 18 ^{o}C i wilgotność względną 65%. Obliczyć po jakim czasie nastąpiłoby pełne nasycenie wilgocią powietrza znajdującego się w magazynie w przypadku awarii (pęknięcia) rury ciepłowniczej, którą przesyłana jest woda o ciśnieniu 1atm i temperaturze 95 ^{o}C. Założyć że w ciągu każdej minuty z pękniętej rury wydostanie się ok. 60 litrów wody, która niemal natychmiast odparuje.

ZADANIE **20**
W szczelnej gablocie znajdują się niewielkie rzeźby drewniane (nie pokryte polichromią figurki ludzkie). W wyniku awarii centralnego ogrzewania temperatura w pomieszczeniu i gablocie spadła do wartości 15^{o}C. Oceń jak zmieni się wilgotność względna w gablocie jeśli wiadomo że ma ona objętość 0,5 m^3 i wyłożona jest drobnymi patyczkami wierzbowymi o masie 2,5 kg (masa oznaczona przy początkowej temperaturze 22 ^{o}C i wilgotności względnej powietrza 65%).

2.2. Odpowiedzi

Zadanie **1**
Odp.: h≈62 kJ/kg, φ≈80 %, g≈1,175 kg/m^3

Zadanie **2**
Odp.: h≈86 kJ/kg, x≈21,6 g/kg,
v≈0,873 m^3/kg

Zadanie **3**
Odp.: m_{ps}≈1420 kg

Zadanie **4**
Odp.: h≈50 kJ/kg, x≈3,8 g/kg, φ≈8%,
g≈1,125 kg/m^3

Zadanie **5**
Odp.: Δx≈8,6 g/kg,

Zadanie **6**
Odp.: t≈18^{o}C, h≈51 kJ/kg, x≈13 g/kg,
φ≈100%

Zadanie **7**
Odp.: t≈20,5^{o}C, h≈48 kJ/kg, x≈11 g/kg,
φ≈75%

Zadanie **8**
Odp.: t≈37^{o}C, h≈115 kJ/kg, x≈30 g/kg,
φ≈74%, g≈1,13 kg/m^3

Zadanie **9**
Odp.: $\varphi_{emp.}$≈25%, $\varphi_{oblicz.}$≈15%,

Zadanie **10**
Odp.:
- zima: h_1≈5,8 kJ/kg, x_1≈3,0 g/kg,
g_1≈1,285 kg/m^3
- lato: h_2≈41,0 kJ/kg, x_2≈9,4 g/kg,
g_2≈1,210 kg/m^3

Zadanie **11**
Odp.: $W_{r\,min.}$ ≈2,5 %, $W_{r\,max.}$ ≈12 %

Zadanie **12**
Odp.: $W_{r\,1}$ ≈17,1 %, W_{r2} ≈8,4 %

Zadanie **13**
Odp.: $W_{r\,min.}$ ≈ 4,8 %, $W_{r\,max.}$ ≈17,3 %

Zadanie **14**
Odp.:
- kwiecień: W_r ≈ 7,6 %,
- czerwiec: W_r ≈ 11,6 %

Zadanie 1**5**
Odp.: $\Delta m_{H_2O} \approx 450g$

Zadanie 1**6**
Odp.: h_2≈23 kJ/kg, x_2≈1,1 g/kg, φ_2≈10 %,
Δq=Δh=30 kJ/kg

Zadanie 1**7**
Odp.: $\dot{m}_{H_2O} \approx 625$ kg/h

Zadanie 1**8**
Odp.: h≈66 kJ/kg, x≈25,8 g/kg, t≈26^{o}C,
φ≈80%

Zadanie 1**9**
Odp.: $\tau_{oblicz.}$ ≈13 sek.
(czas rzeczywisty będzie nieco dłuższy)

Zadanie **20**
Odp.: φ≈65%,
(wilgotność praktycznie nie ulegnie zmianie)

Spis najważniejszych wzorów

wilgoć w powietrzu:

- zawartość wilgoci

$$x = \frac{m_p}{m_{ps}} \left[\frac{g}{kg}\right]$$ (na kg gazu suchego)

m_p - masa wilgoci [g]

m_{ps} - masa suchego powietrza [g]

- wilgotność względna

$$\varphi = \frac{p}{p''} \text{ [-]} \quad \text{lub} \quad \varphi = \frac{p}{p''} \cdot 100\%$$

$$\varphi = \frac{g}{g''} \text{ [-]} \quad \text{lub} \quad \varphi = \frac{g}{g''} \cdot 100\%$$

p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej zawartej w powietrzu [MPa]

p'' – ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej (zależne od temperatury powietrza); dla temperatury wrzenia: $p'' = p_b$ [MPa]

g – gęstość pary wodnej zawartej w powietrzu [kg/m^3]

g'' – gęstość pary wodnej nasyconej (zależna od temperatury) [kg/m^3]

przeliczanie:

$$x = 622 \cdot \frac{p'' \cdot \varphi}{p_b - p'' \cdot \varphi} \quad \left[\frac{g}{kg}\right]$$

$$\varphi = \frac{p_b}{p''} \cdot \frac{x}{x + 622} \quad \text{[-]}$$

$$p = p_b \cdot \frac{x}{622 + x} \text{ [MPa]}$$

p_b - ciśnienie barometryczne (0,1 MPa);

φ - wilgotność względna powietrza w [-]

gęstość i objętość powietrza:

- objętość właściwa

$$v = 22{,}4 \cdot \left(\frac{1}{M_{ps}} + \frac{x}{M_p}\right) \cdot \frac{t + 273}{273} \left[\frac{m^3}{(1+X) kg_{gs}}\right]$$

t – temperatura w °C

M_{ps} – masa cząsteczkowa powietrza suchego (M_{ps} = 29)

M_p – masa cząsteczkowa pary wodnej (M_p = 18)

X – zawartość wilgoci w kg/kg suchego powietrza

- gęstość powietrza wilgotnego

$$g = \frac{1 + X}{v} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

- objętość

$V = m_{ps} \cdot v$ [m^3]

m_{ps} - masa powietrza suchego [kg gs]

v – objętość właściwa [m^3/kg]

- gęstość powietrza

$$g = \frac{1}{v} = \frac{m_{ps}}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

entalpia i temperatura:

$$h = c \cdot t + X \cdot (c_p \cdot t + r_0) + X_w \cdot c_w \cdot t + X_l \cdot (c_l \cdot t + r_l) \quad \left[\frac{kJ}{(1+x) kg_{gs}}\right]$$

$$t = \frac{h + r_o \cdot X + r_l \cdot X_l}{c + c_p \cdot X + c_w \cdot X_w + c_l \cdot X_l} \text{ [°C]}$$

c – ciepło właściwe powietrza c=1,0 [kJ/kg·K]

t – temperatura w °C

X – zawartość wilgoci (pary wodnej) w kg/kg suchego powietrza

c_p – ciepło właściwe pary wodnej, c_p=1,92 [kJ/kg·K]

r_o – ciepło parowania, wynoszą, r_o = 2500 [kJ/kg]

X_w- zawartość ciekłej wody w kg/kg suchego powietrza

c_w – ciepło właściwe wody, c_w =4,19 [kJ/kg·K]

X_l – zawartość lodu w kg/kg suchego powietrza

c_l - ciepło właściwe lodu, c_l =2,08 [kJ/kg·K]

r_l - ciepło topnienia lodu, r_l = - 333 [kJ/kg]

parametry mieszaniny:

- zawartość wilgoci w mieszaninie

$$x_3 = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2} \text{ [g/kg]}$$

- entalpia mieszaniny

$$h_3 = \frac{m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2}{m_1 + m_2} \text{ [kJ/kg]}$$

m_1 – masa pierwszego składnika mieszaniny (powietrza) [kg]
m_2 – masa drugiego składnika mieszaniny (powietrza) [kg]
x_1 – zawartość wilgoci pierwszego składnika mieszaniny [g/kg]
x_2 – zawartość wilgoci drugiego składnika mieszaniny [g/kg]
h_1 – entalpia pierwszego składnika mieszaniny [kJ/kg]
h_2 – entalpia drugiego składnika mieszaniny [kJ/kg]

wilgotność drewna:

- wilgotność równoważna

a) $W_r = A - B \log (t_s - t_m)$ [%]

W_r –wilgotność równoważna [%],
t_s – temperatura suchego termometru [°C],
t_m – temperatura termometru mokrego [°C],
A i B – stałe równania logarytmicznego (podane w tabeli VIII) [%]

b) $$W_r = \frac{120}{t_s - t_m + 5} \text{ [\%]}$$

c) $$W_r = \frac{115}{t_s - t_m + 4} \text{ [\%]}$$

d) $$W_r = e^{1,3996} + 0,04123 \cdot \varphi + 0,6485 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi^2 + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^3 - 0,00363 \cdot t \text{ [\%]}$$

e - podstawa logarytmu naturalnego (e=2,7183)
φ – wilgotność względna powietrza [%]
t – temperatura powietrza [°C]

e) $$W_r = \frac{1800}{M} \cdot \left(\frac{K \cdot \varphi}{100 - K \cdot \varphi} + \frac{K_1 \cdot K \cdot \varphi + 2K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2}{100 + K_1 \cdot K \cdot \varphi + K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2} \right) \text{ [\%]}$$

gdzie: $M = 349 + 1,29 \cdot t + 0,0135 \cdot t^2$
$K = 0,805 + 0,000736 \cdot t - 0,00000273 \cdot t^2$
$K_1 = 6,27 - 0,00938 \cdot t - 0,000303 \cdot t^2$
$K_2 = 1,91 + 0,0407 \cdot t - 0,000293 \cdot t^2$

- wilgotność bezwzględna (wilgotność)

$$W = W_o = \frac{m_{H_2O}}{m_o} = \frac{m_w - m_o}{m_o} = \frac{m_w}{m_o} - 1 \text{ [-]lub[\%]}$$

m_{H_2O} - masa wody [g] lub [kg]

m_o - masa drewna absolutnie suchego [g] lub [kg]
m_w – masa drewna wilgotnego [g] lub [kg]

entalpia, ciepło, masa i czas:

- przyrost entalpii (ciepła)

$$\Delta q = \Delta h = h_1 - h_2 \text{ [kJ/kg]}$$

- ilość ciepła

$$Q = m_{ps} \cdot q = m_{ps} \cdot h \text{ [kJ]}$$

- strumień ciepła

$$Q^{\bullet} = \frac{Q}{\tau} \text{ [kJ/h]}$$

- strumień masy

$$m^{\bullet} = \frac{m}{\tau} \text{ [kg/h]}$$

h – entalpia [kJ/kg]
dla przemiany izobarycznej (p=const.) entalpia jest równoważna z energią wewnętrzną układu czyli energią cieplną (q)
τ – czas [h] lub [doba]

Tabele i wykresy

Tabela I

Wybrane przedrostki dziesiętnych wielokrotności i podwielokrotności jednostek miary

Przedrostek (nazwa)	Oznaczenie	Mnożnik
tetra	T	$10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000$
giga	G	$10^{9} = 1\ 000\ 000\ 000$
mega	M	$10^{6} = 1\ 000\ 000$
kilo	k	$10^{3} = 1\ 000$
hekto	h	$10^{2} = 100$
deka	da	$10^{1} = 10$
- (jednostka podstawowa)	-	$10^{o} = 1$
decy	d	$10^{-1} = 0,1$
centy	c	$10^{-2} = 0,01$
mili	m	$10^{-3} = 0,001$
mikro	μ	$10^{-6} = 0,000\ 001$
nano	n	$10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$
piko	p	$10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$

Tabela II

Wybrane wielkości i odpowiadające im jednostki miar w przeliczeniu na jednostki w układzie SI

Lp	Nazwa wielkości mierzonej	Oznaczenie wielkości mierzonej	Oznaczenie jednostki miary w starych systemach	Oznaczenie jednostki miary w układzie SI	Związek między jednostkami miar
1	Ciepło	Q	cal	J	1 cal=4,1868 J
2	Ciepło właściwe	c	cal/(g·K)	J/(kg·K)	1 cal/(g·K)=0,419·10^4 J/(kg·K)
3	Ciśnienie	p	mmHg, T_r mmH_2O bar at Atm	Pa	1 mmHg=1 T_r=133,9224 Pa 1 mmH_2O = 9,81 Pa 1 bar=10^5 Pa 1 at=0,980655·10^5 Pa 1 Atm = 1,01325·10^5 Pa
4	Czas	τ	h doba	s	1 h=3600 s 1 doba = 86400 s
5	Entalpia	h	cal/g	J/kg	1 cal/g = 0,419·10^4 J/kg
6	Gęstość	g	g/cm^3	kg/m^3	1 g/cm^3=1000 kg/m^3
7	Masa	m	g t	kg	1 g = 0,001 kg 1 t = 1000 kg
8	Objętość	V	cm^3	m^3	1 cm^3=0,000001 m^3
9	Prędkość	ω	km/h	m/s	1 km/h=0,2777 m/s
10	Temperatura	T	^0C	K	1^oC = 1+273 K

Tabela III

Wybrane stałe fizyczne

Lp.	Nazwa stałej fizycznej	Oznaczenie	Wartość
1	Liczba (stała) Avogadra	N_A	6,022045·10^{23} mol^{-1}
2	Objętość molowa normalna gazu doskonałego (T_o=273,15 K, p_o=101,325 Pa)	V_m	22,41383·10^{-3} m^3/mol
3	Stała gazowa	R	8,31441 J/(mol·K)
4	Temperatura punktu potrójnego wody	T_t	273,16 K

Tabela IV

Zależność między temperaturą (t) a ciśnieniem cząstkowym pary nasyconej (p") zawartej w powietrzu przy ciśnieniu p_b= 0,1 MPa.

t [°C]	**p"** [hPa]	**t** [°C]	**p"** [hPa]	**t** [°C]	**p"** [hPa]	**t** [°C]	**p"** [hPa]
0	6,108	25	31,67	50	123,35	75	385,5
2	7,054	26	33,60	52	136,13	76	401,9
4	8,129	28	37,78	54	150,02	78	436,5
5	8,718	30	42,41	55	157,41	80	473,6
6	9,346	32	47,53	56	165,09	82	513,3
8	10,721	34	53,18	58	181,46	84	555,7
10	12,271	35	56,22	60	199,17	85	578
12	14,015	36	59,40	62	218,4	86	601,1
14	15,974	38	66,24	64	239,1	88	649,5
15	17,040	40	73,75	65	250,1	90	701,1
16	18,169	42	81,98	66	261,5	92	756,1
18	20,620	44	91,00	68	285,6	94	814,6
20	23,37	45	95,82	70	311,6	95	845,2
22	26,42	46	100,85	72	339,6	96	876,9
24	29,82	48	111,62	74	369,6	98	943,0

Tabela V

Właściwości powietrza wilgotnego przy stałym ciśnieniu p = 0,1 MPa (Gąsiorowski i in. 1969).

Temp. t [°C]	Gęstość pary nasyconej suchej g" [g / m^3]	Ciśnienie cząstkowe pary nasyconej suchej p_x [hPa]	Zawartość wilgoci powietrza nasyconego x" [g / kg gs]	Entalpia powietrza nasyconego parą i'$_{(1+x)}$ [kJ / kg gs]	Gęstość powietrza nasyconego g_{pw} [kg / m^3]	Gęstość powietrza suchego g_{gs} [kg / m^3]
- 10	2,14	2,59	1,62	- 6,0	1,322	1,324
- 5	3,24	4,01	2,50	1,21	1,297	1,300
0	4,85	6,11	3,82	9,6	1,272	1,275
5	6,79	8,72	5,47	10,8	1,248	1,252
10	9,39	12,27	7,73	29,5	1,224	1,231
12	10,66	14,02	8,84	34,4	1,215	1,222
14	12,06	15,97	10,10	39,6	1,206	1,213
16	13,63	18,17	11,51	45,2	1,196	1,204
18	15,36	20,62	13,10	51,3	1,187	1,195
20	17,27	23,37	14,88	57,9	1,178	1,188
22	19,42	26,43	16,88	65,6	1,168	1,176
24	21,77	29,82	19,12	72,8	1,159	1,172
26	24,37	33,60	21,63	81,3	1,150	1,163
28	27,23	37,79	24,42	90,5	1,140	1,156
30	30,32	42,42	27,55	100,6	1,131	1,149
35	39,53	52,22	37,05	130,3	1,106	1,130
40	51,04	73,75	49,52	167,8	1,081	1,112
45	65,26	95,82	65,91	215,6	1,055	1,094
50	82,72	123,35	87,72	273,3	1,028	1,076
55	103,94	157,4	116,19	357,8	0,998	1,050
60	129,56	199,1	154,71	464,6	0,967	1,045

Tabela VI

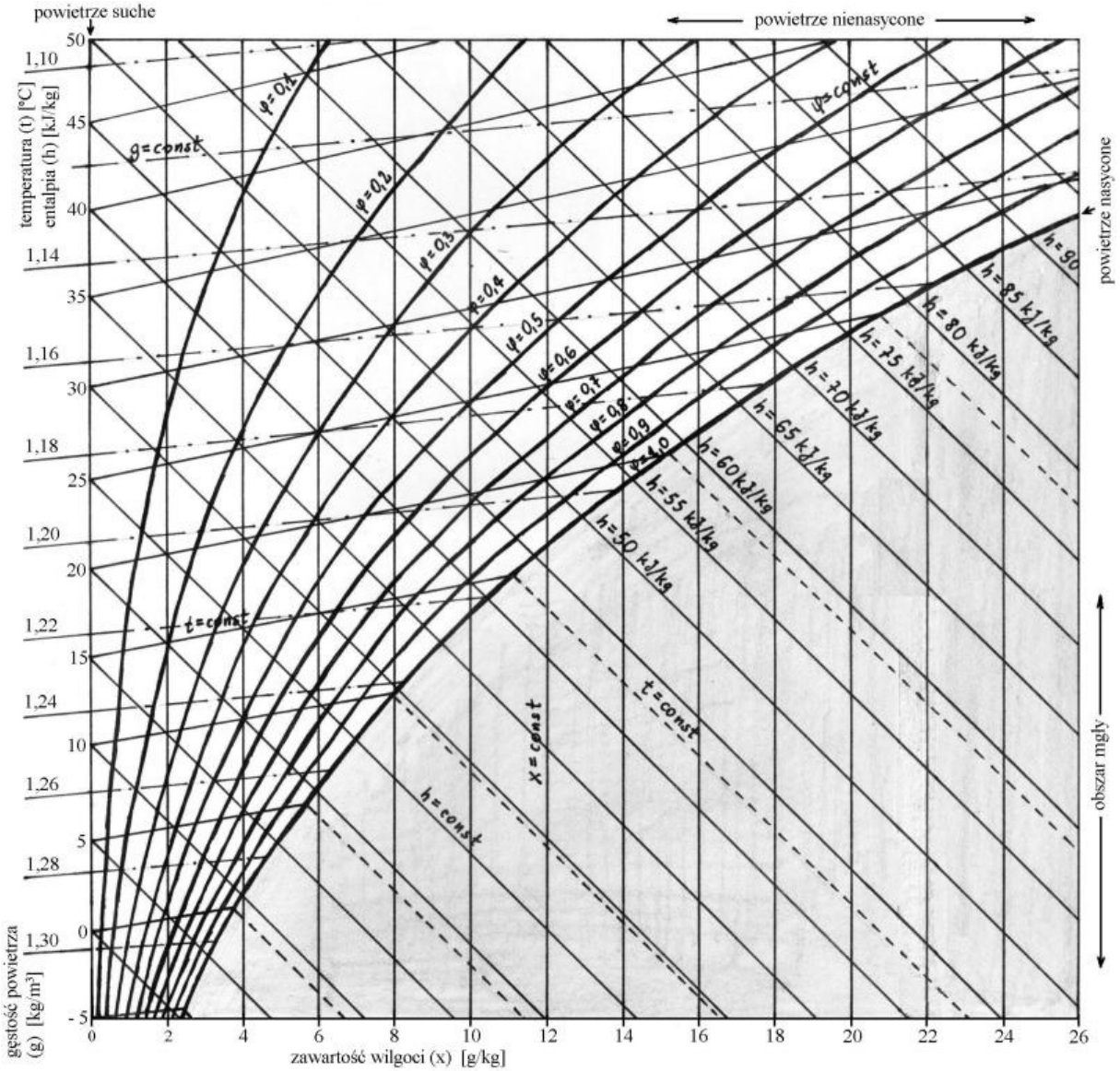
Właściwości powietrza wilgotnego przy ciśnieniu p=0,1 MPa (Krischer 1963)

Temperatura t [^oC]	Ciśnienie cząstkowe pary nasyconej p" [hPa]	Gęstość pary nasyconej g" [kg/m^3]	Ciepło parowania r_o [kJ/kg]	Zawartość wilgoci powietrza nasyconego x" [g/kg gs]	Entalpia powietrza nasyconego h" [kJ/kg gs]
-20	1,03	0,000879	2839,6*	0,641	-18,50
-15	1,65	0,001387	2838,4*	1,028	-12,52
-10	2,60	0,002140	2837,1*	1,618	-6,03
-5	4,01	0,003242	2835,9*	2,505	1,21
-4	4,37	0,003519	2835,4*	2,729	2,76
-3	4,76	0,003817	2835,0*	2,972	4,39
-2	5,17	0,004133	2835,4*	3,234	6,07
-1	5,62	0,004478	2835,0*	3,516	7,79
0	6,11	0,004846	2834,6*	3,821	9,55
0	6,11	0,004846	2500,5	3,821	9,55
1	6,57	0,005191	2498,0	4,116	11,30
2	7,06	0,005557	2495,5	4,418	13,07
3	7,58	0,005945	2493,4	4,754	14,91
4	8,13	0,006358	2491,3	5,100	16,80
5	8,72	0,006795	2488,8	5,472	18,76
6	9,35	0,007257	2486,2	5,868	20,77
7	10,02	0,007747	2483,7	6,291	22,87
8	10,72	0,008267	2481,6	6,749	24,99
9	11,48	0,008816	2479,1	7,223	27,22
10	12,28	0,006396	2477,0	7,733	29,52
11	13,12	0,01001	2474,5	8,269	31,90
12	14,02	0,01066	2472,4	8,849	34,38
13	14,97	0,01134	2469,9	9,455	36,93
14	15,98	0,01206	2505,5	10,105	39,57
15	17,05	0,01282	2465,3	10,791	42,58
16	18,17	0,01363	2463,3	11,513	45,17
17	19,37	0,01447	2460,7	12,288	48,19
18	20,63	0,01536	2458,2	13,108	51,29
19	21,96	0,01630	2456,1	13,974	54,51
20	23,38	0,01729	2453,6	14,865	57,86
21	24,86	0,01833	2451,5	15,861	61,38
22	26,43	0,01942	2449,0	16,892	65,02
23	28,09	0,02056	2446,5	17,959	68,83
24	29,83	0,02177	2444,4	19,131	72,60
25	31,68	0,02304	2441,9	20,349	76,91
26	33,61	0,02437	2439,3	21,635	81,23
27	35,65	0,02576	2437,3	22,996	85,75
28	37,80	0,02723	2434,7	24,435	90,48
29	40,05	0,02876	2432,6	25,953	95,42
30	42,43	0,03036	2430,1	27,558	100,57
35	56,24	0,03960	2418,0	37,066	130,22
40	73,77	0,05114	2406,3	49,532	167,65
45	95,85	0,06544	2394,1	65,931	215,50
50	123,4	0,08298	2382,4	87,516	277,05
100	1014,0	0,5977	2256,4	-	-
* poniżej 0^oC podane wartości stanowią sumę ciepła parowania wody (r_o) i ciepła krzepnięcia lodu (r_l)					

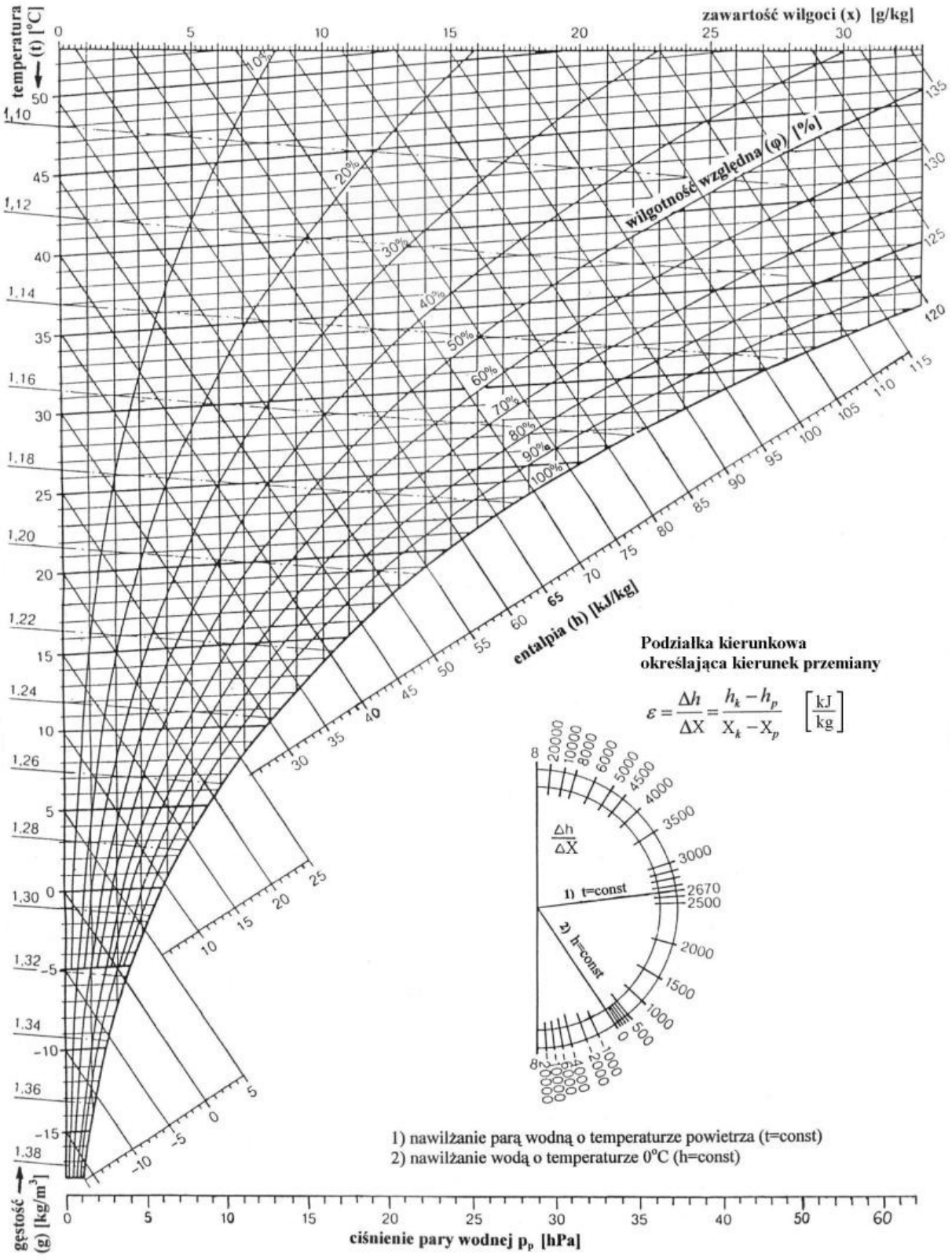
Tabela VII

Średnie ciepło właściwe powietrza suchego (c), pary wodnej (cp) oraz ciepło parowania w zależności od temperatury powietrza przy stałym ciśnieniu p_b=0,1 MPa

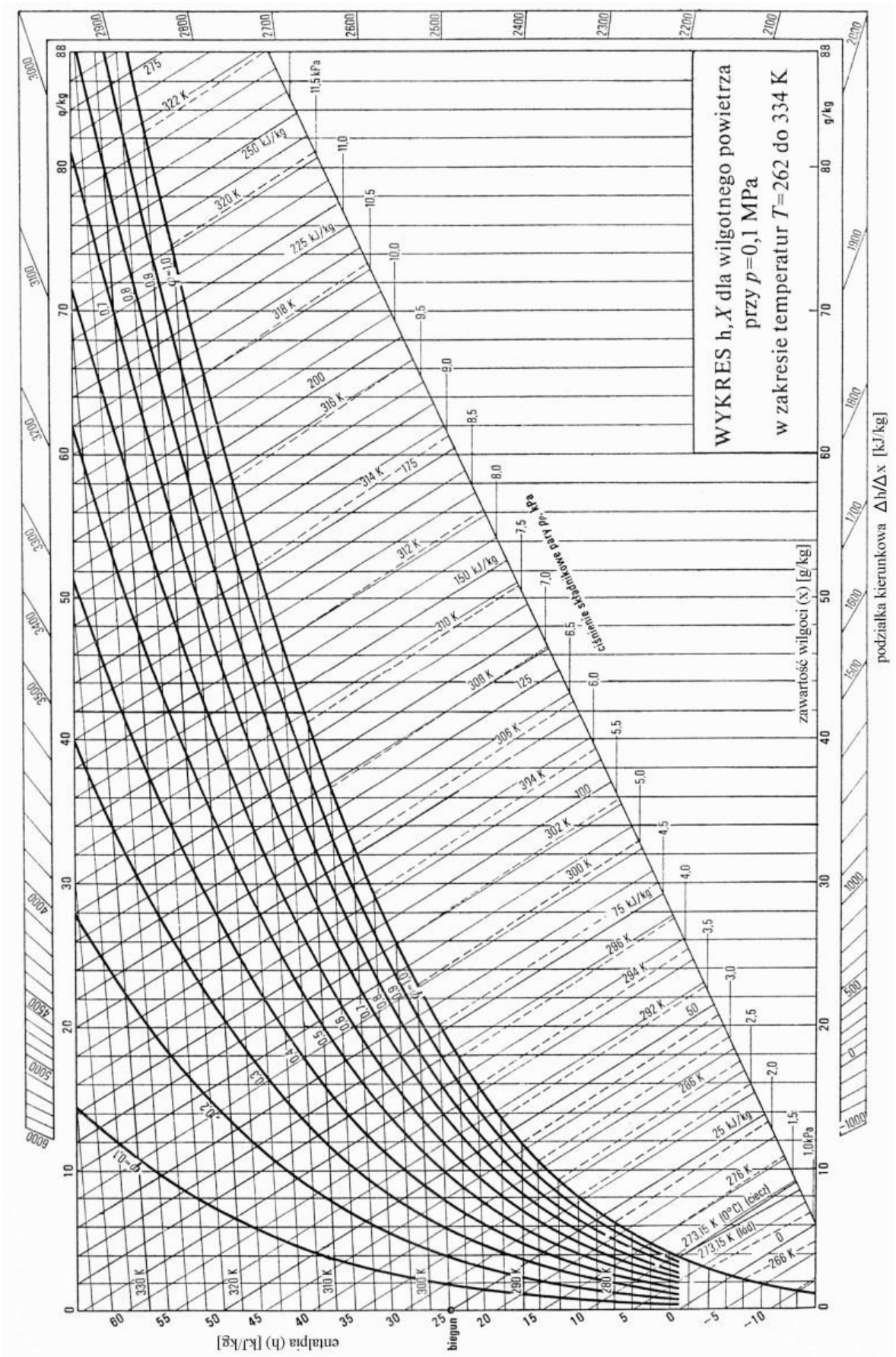
Temp. t [^{0}C]	Ciepło właściwe		Ciepło parowania r_o [kJ/kg]
	powietrza suchego c [kJ/kg·K]	pary wodnej c_p [kJ/kg·K]	
0	1,0056	1,858	2500,8
20	1,0058	1,860	2453,4
40	1,0062	1,863	2406,2
60	1,0065	1,865	2358,0
80	1,0071	1,868	2308,2
100	1,0077	1,872	2259,2



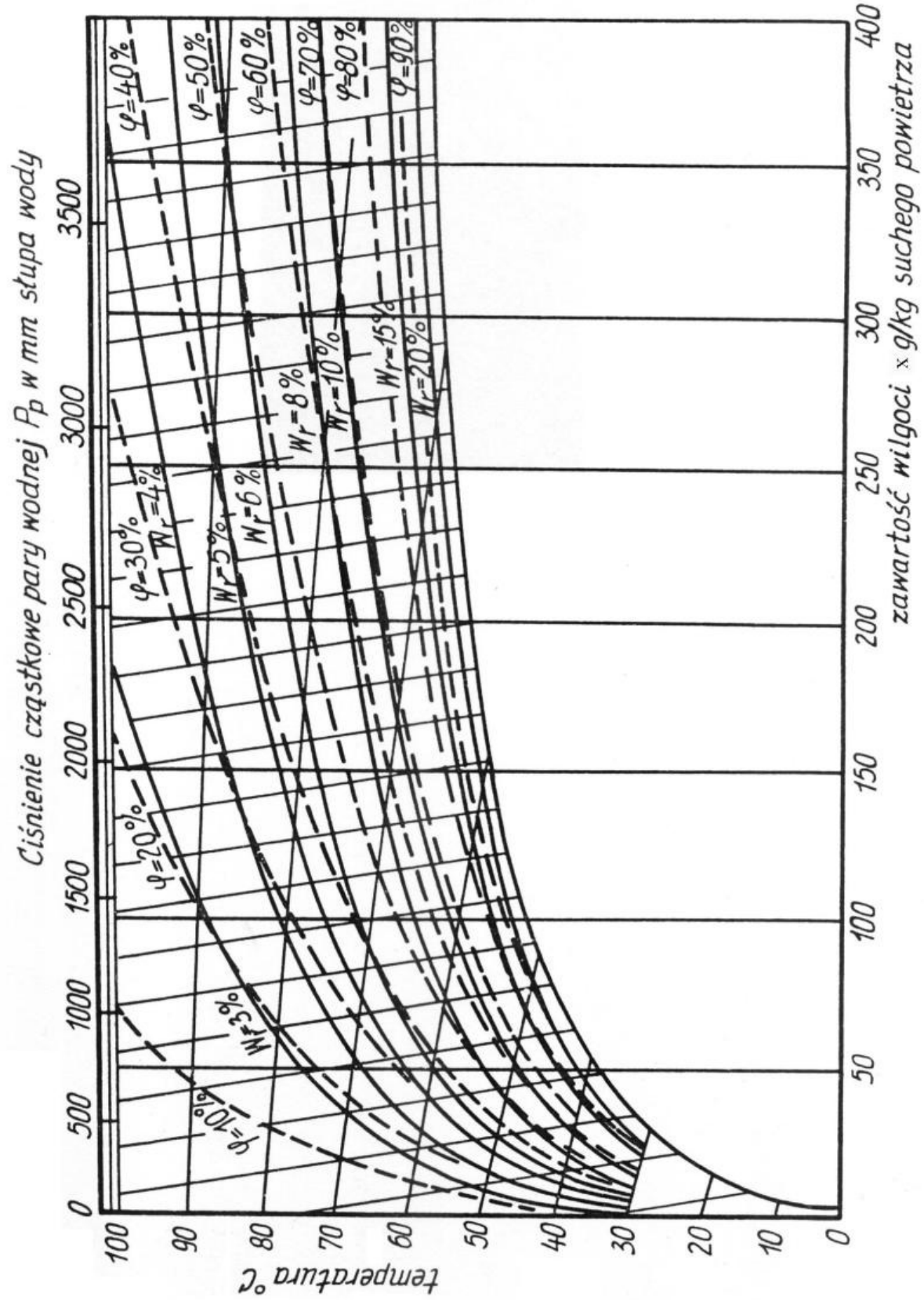
Rys. I. Wykres h-x (entalpia - zawartość wilgoci) dla powietrza wilgotnego przy ciśnieniu p_b=0,1MPa – opr. P. Kozakiewicz.



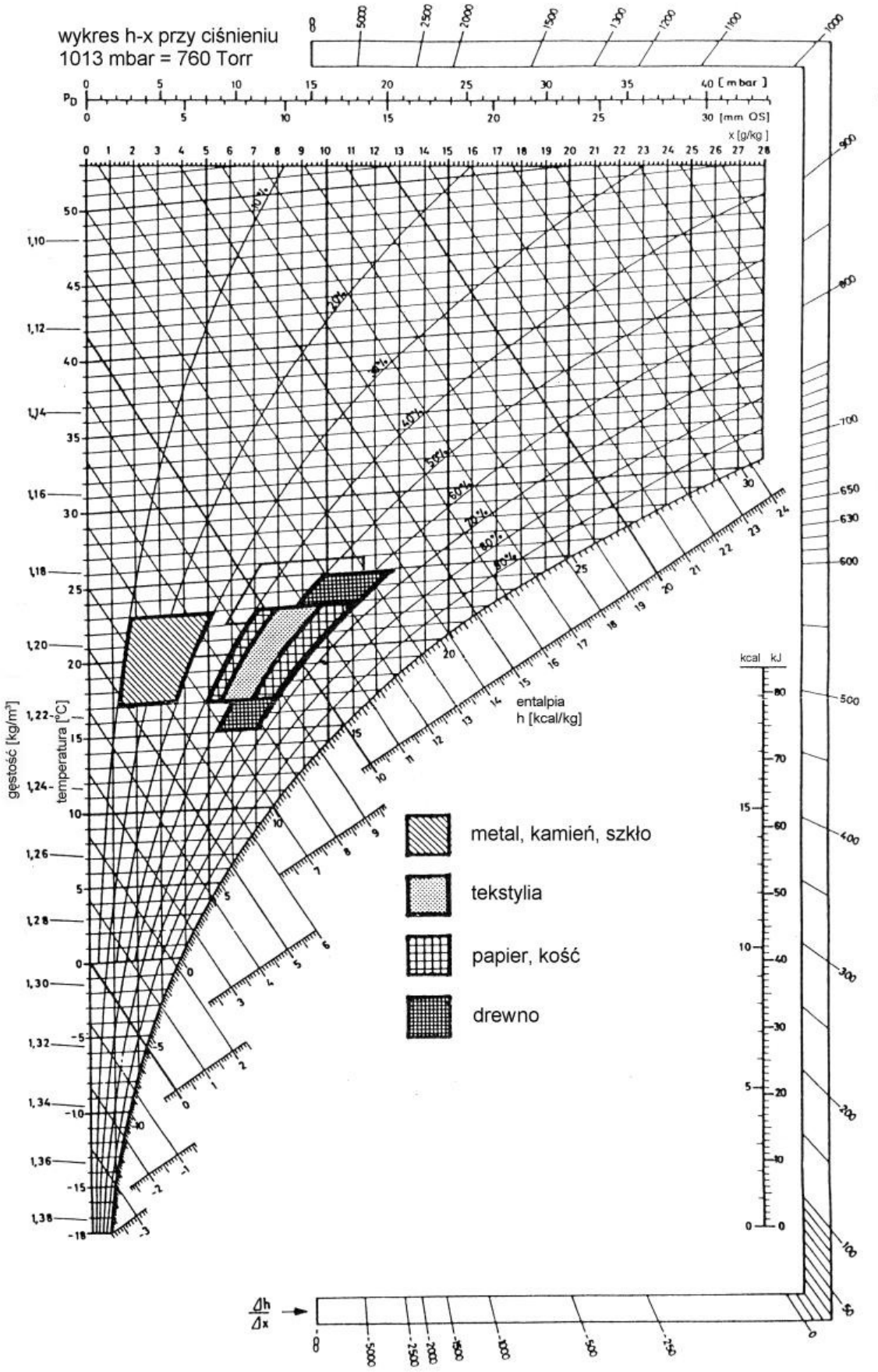
Rys.II. Wykres h-x (Molliera) dla powietrza wilgotnego przy ciśnieniu p_b=1013 hPa (opr. P Kozakiewicz w oparciu o Dobrowlska, Matejak 1997)



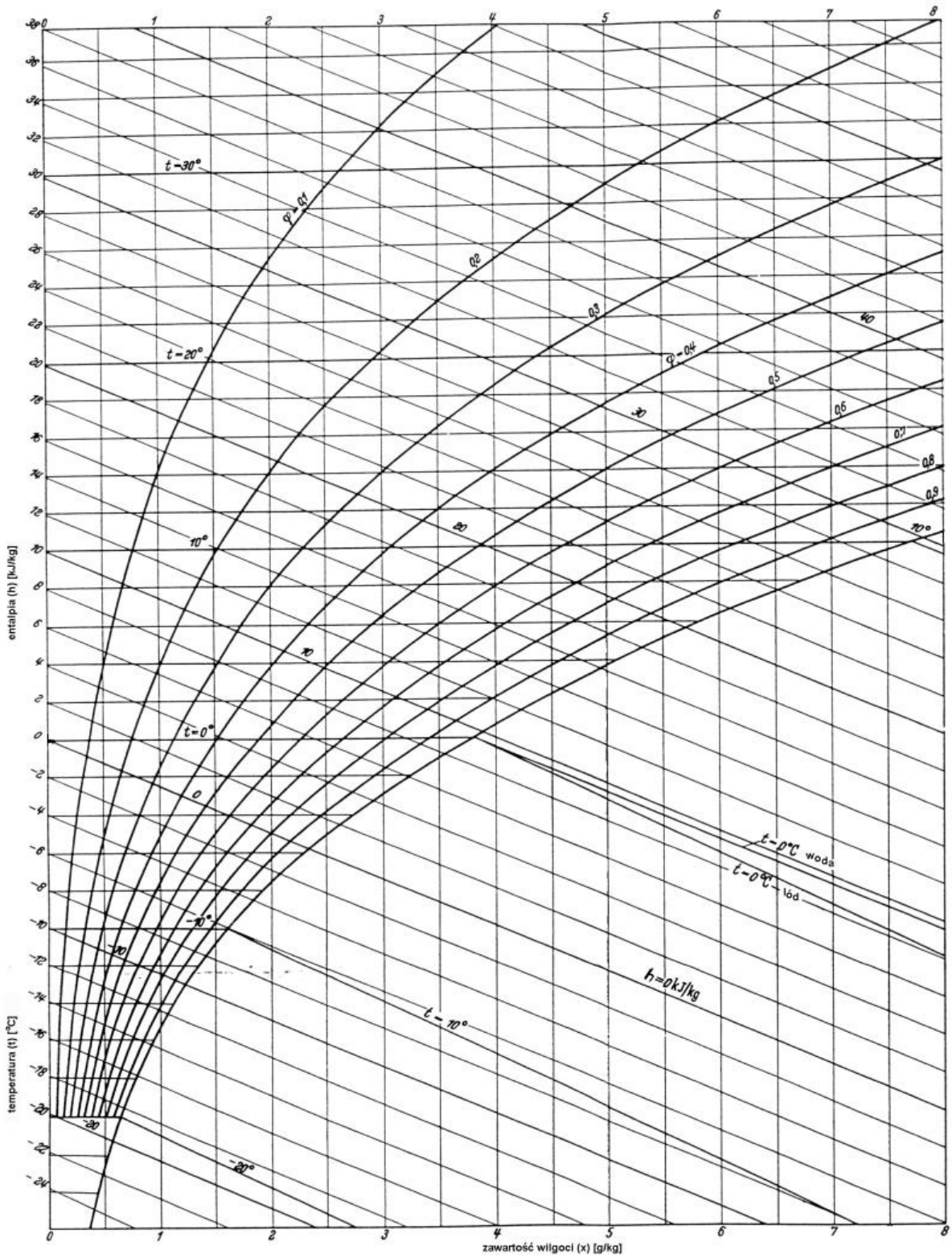
Rys.III. Wykres h-x z podziałką kierunkową na marginesach (zakres temperatur od ok. 0 do 60 ^{o}C)



Rys.IV. Wykres h-x z naniesionymi liniami stałej wilgotności równoważnej drewna (Krzysik, Sobczak 1970)



Rys.V. Właściwe temperatury i zakresy wilgotności względnej powietrza do przechowywania eksponatów muzealnych zaznaczone na wykresie h-x (Horn 1985 wg Mühlethaler'a)



Rys.VI. Wykres h-x (zakres temperatur od ok. –20 do 38 ^{o}C)

Tabela VIII

Właściwości sorpcyjne wybranych gatunków drewna według Keylwertha (1969)

Gatunek drewna		Gęstość w stanie absolutnie suchym [g] [kg/m^3]	Wilgotność równoważna W_r [%]		Współczynniki równania log. [%]		Współczynnik spęcznienia średni dla kierunku stycznego i promieniowego α [-]
Nazwa polska	nazwa łacińska		dla φ = 37% uzyskana w procesie desorpcji	dla φ = 83% uzyskana w procesie adsorpcji	A	B	
Jodła pospolita	*Abies alba*	410	7,1	16,9	21,3	15,8	0,27
	Abies alba	420	7,6	17,8	22,4	16,4	0,25
Akacja	*Acacia koa*	490	7,2	17,4	22,0	16,5	0,22
Araukaria	*Araucaria angustifolia*	480	7,3	15,1	18,6	12,6	0,26
Eukaliptus	*Eucalyptus diversicolor*	870	8,7	16,3	19,7	12,3	0,34
	Eucalyptus globulus	670	7,8	18,1	22,8	16,8	0,34
	Eucalyptus globulus	650	7,1	17,9	22,8	17,5	0,33
	Eucalyptus marginata	880	9,2	18,9	23,3	15,7	0,35
	Eucalyptus patens	890	9,5	19,0	23,3	15,4	0,34
	Eucalyptus redunca	1060	8,5	19,0	23,7	17,0	0,34
Buk pospolity	*Fagus sylvatica*	660	7,3	15,7	19,5	13,6	0,31
	Fagus sylvatica	680	7,0	16,7	21,1	15,7	0,34
	Fagus sylvatica	630	6,9	15,7	19,7	14,2	0,30
	Fagus sylvatica	670	7,3	16,8	21,1	15,4	0,31
Jesion	*Fraxinus* sp.	630	7,3	16,5	20,7	14,9	0,29
	Fraxinus sp.	590	6,1	13,8	17,3	12,4	0,24
Ketmia	*Hibiscus elatuus*	570	6,7	16,0	20,2	15,0	0,18
Orzech włoski	*Juglans regia*	570	6,6	14,5	18,5	13,1	0,21
	Juglans regia	620	6,7	14,8	18,1	12,8	0,24
	Juglans regia	640	6,6	14,5	17,3	12,0	0,21
Modrzew	*Larix* sp.	520	8,4	17,1	21,1	14,2	0,27
Świerk pospolity	*Picea abies*	420	7,5	16,4	20,4	14,4	0,24
Sosna pospolita	*Pinus sylvestris*	460	7,0	15,3	19,0	13,4	0,26
	Pinus sylvestris	460	7,2	16,6	20,8	15,2	0,20
Topola	*Populus* sp.	470	7,1	16,7	21,0	15,5	0,20
Daglezja zielona	*Pseudotsuga menziesti*	470	8,3	16,1	19,6	12,6	0,27
Dąb bezszypułkowy	*Quercus petrea*	640	8,9	17,2	20,9	13,4	0,26
Dąb szypułkowy	*Quercus robur*	640	8,0	16,8	20,7	14,1	0,25
	Quercus robur	630	8,0	17,3	21,5	15,0	0,25
	Quercus robur	660	7,8	15,4	18,8	12,3	0,23
Dąb czerwony	*Quercus rubra*	720	7,0	16,1	20,2	14,7	0,26
Lipa	*Tilia* sp.	510	5,3	13,7	17,5	13,6	0,24
Wiąz	*Ulmus* sp.	650	7,9	16,1	19,8	13,3	0,25
	Ulmus sp.	630	7,1	14,1	17,3	11,3	0,29
	Ulmus sp.	580	6,6	14,3	17,8	12,5	0,27
Średnia dla wszystkich próbek (n = 35)		615	7,4	16,3	20,3	14,3	0,27
Odchylenie standardowe		144	0,9	1,4	-	-	0,05
Współczynnik zmienności		23	11,8	8,7	-	-	17

Wilgotność równoważną drewna typową dla klimatów pomieszczeń można określić przybliżonym równaniem logarytmicznym: $W_r = A - B \log (t_s - t_m)$

gdzie: W_r –wilgotność równoważna [%],

t_s – temperatura suchego termometru [°C],

t_m – temperatura termometru mokrego [°C],

A i B – stałe równania (podane w tabeli) [%]

Tabela IX

Wilgotności równoważne drewna w zależności od temperatury termometru suchego i różnicy psychrometrycznej (Hildebrand 1964).

$\Delta t=t_s-t_m$ [^oC]	Temperatura termometru suchego (t_s) [^oC]									
	0	10	20	30	35	40	45	50	55	60
2	12,2	15,5	17,0	17,9	18,0	18,1	18,2	18,1	17,9	17,6
3	9,0	12,0	14,2	15,4	15,8	16,0	15,9	15,8	15,6	15,3
4	6,6	10,4	12,2	13,4	13,9	14,0	14,2	14,1	14,0	13,8
5	3,8	8,5	10,6	11,8	12,1	12,4	12,6	12,7	12,7	12,5
6		7,0	9,2	10,6	11,0	11,2	11,4	11,5	11,5	11,4
7		5,3	8,2	9,6	10,0	10,3	10,6	10,7	10,7	10,6
8		3,6	7,2	8,8	9,2	9,5	9,7	9,8	9,9	9,8
9		1,7	6,1	8,0	8,4	8,8	9,0	9,2	9,3	9,2
10			5,0	7,2	7,7	8,2	8,5	8,6	8,7	8,7
11			4,0	6,5	7,2	7,6	8,0	8,0	8,1	8,1
12			4,9	5,8	6,5	7,0	7,4	7,5	7,6	7,7
13			1,7	5,0	5,9	6,4	6,8	7,0	7,1	7,2
14				4,3	5,3	5,9	6,3	6,6	6,7	6,7
15				3,6	4,7	5,3	5,9	6,2	6,3	6,4
16				2,9	4,1	4,9	5,4	5,7	5,9	6,0
18				1,1	3,0	3,9	4,5	4,9	5,2	5,4
20						3,0	3,8	4,2	4,6	4,8
22						1,8	2,9	3,5	3,9	4,2
24								2,8	3,3	3,7
26								2,1	2,7	3,1
28								1,4	2,2	2,6
30									1,5	2,1

$\Delta t = t_s - t_m$ [^oC] - różnica psychrometryczna
t_s [^oC] – temperatura termometru suchego
t_m [^oC] – temperatura termometru mokrego

Literatura

Bekhta P., Kozakiewicz P., 2001: Klimat i derevina. *Wydanie I. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.*

Dobrowolska E., Matejak M., 1997: Suszarnictwo. Tabele i wykresy. *Wydanie II. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.*

Dobrowolska E, Kozakiewicz K., Matejak M., 1998: Hydrotermiczna i plastyczna obróbka drewna. *Wydawnictwo SGGW. Warszawa*

Gąsiorowski J., Radwański E., Zagórski J., Zgorzelski M., 1969: Zbiór zadań z teorii maszyn cieplnych. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.*

Glijer L., Matejak M., Osipiuk J., 1984: Teoria i technika suszenia drewna. *Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa.*

Hildebrand (Robert Hildebrand Maschinenbau GMBH Oberboiningen/Wuertt),**1964**: Die Kammertrocknung von Schnittholz. *Holz als Roh- und Werkstoff. Jahrg. 22 s.29-36.*

Horn W., 1985: Teilklimatisierung von Ausstellungsvitrinen. *W. Arbeitsblätter Heft 2. 1985. Gruppe 21, Ausstellungstechnik.*

Keylwerth R.,1969: Praktische Untersuchungen zum Holzfeuchtigkeits – Gleichgewicht. *Holz als Roh- und Werkstoff* 27: 285–290.

Kozakiewicz P., 2000: Fizyka drewna w teorii i zadaniach. *Wydanie I. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.*

Kozakiewicz P., 2003: Fizyka drewna w teorii i zadaniach. *Wydanie II poprawione i uzupełnione. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.*

Kozakiewicz P., Matejak M., 2000: Klimat a drewno zabytkowe. *Wydanie I. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.*

Kozakiewicz P., 2001: Materiały pomocnicze do ćwiczeń z fizyki drewna. *Wydanie I. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.*

Kozakiewicz P., 2005: Materiały pomocnicze do ćwiczeń z fizyki drewna. *Wydanie II poprawione i uzupełnione. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.*

Kozakiewicz P., Matejak M., 2002: Klimat a drewno zabytkowe. *Wydanie II poprawione i uzupełnione. Wydawnictwo SGGW. Warszawa.*

Krzysik F., Sobczak K., 1970: Suszenie drewna. *Wydanie III zmienione. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa.*

Krieczetow I., 1955: Suszenie drewna. *Wydanie II. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa.*

Krischer O., 1963: Die wissenschaftlichen Grundladen der Trocknungstechnik. Springer Verlag.

Okołowicz W., 1969: Klimatologia ogólna. *Państwowe Wydawnictwa Naukowe. Warszawa.*

Praca zbiorowa, 1999: Wood handbook. Wood as an engineering material. *General Technical Report FPL-GTR-113. Madison. USA.*

Recknagel-Sprenger 1976: Ogrzewanie i klimatyzacja – poradnik. *Wydawnictwo Arkady. Warszawa.*

Strumiłło Cz., 1983: Podstawy teorii i techniki suszenia. *Wydawnictwa Naukowo Techniczne. Warszawa.*