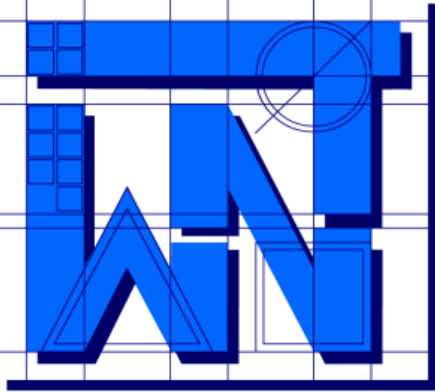


Wydział Nauk Technicznych



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN  
The Faculty of Technical Sciences  
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11  
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55  
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



# TERMODYNAMIKA

Powietrze wilgotne

wersja: 8 lipca 2022

Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2013-2022

# Mieszanina

---

**Mieszanina** – substancja złożona, nie stanowiąca jednego związku chemicznego (niejednorodna chemicznie), której skład może się zmieniać w sposób ciągły (przynajmniej w pewnym zakresie). Mieszaniny składają się z dwóch lub więcej składników w dowolnym stanie skupienia.

Mieszaniny mogą być:

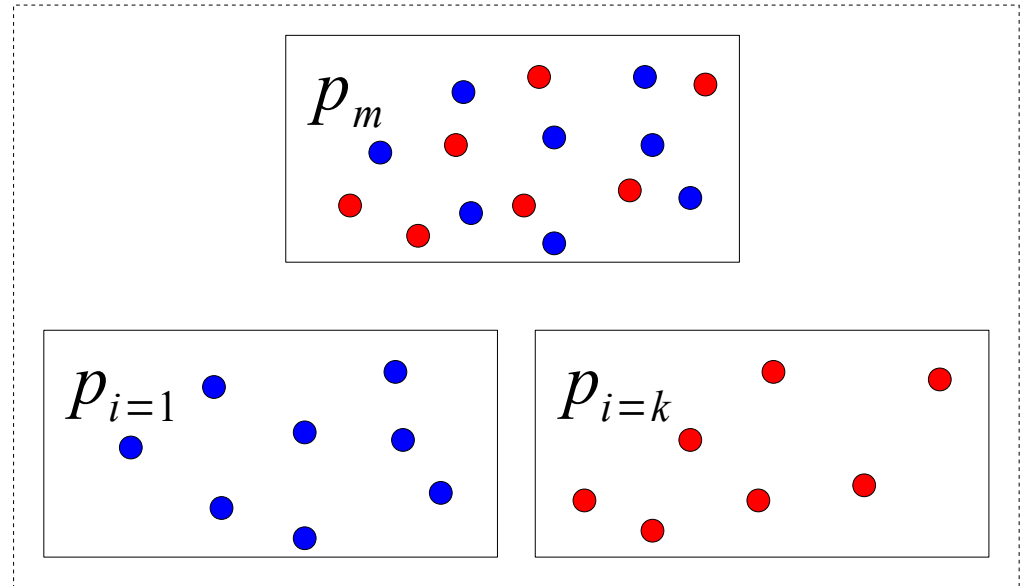
- jednorodne (homoogeniczne, roztwory) – gdy nie daje się rozróżnić poszczególnych składników (np. powietrze atmosferyczne),
- niejednorodne – gdy poszczególne składniki są łatwo odróżnialne (np. woda sodowa z pęcherzykami dwutlenku węgla).



# Prawo Daltona

**Prawo Daltona** – prawo stanowiące, że ciśnienie mieszaniny gazów równe jest sumie ciśnień cząstkowych jej składników (mierzonych w takich samych warunkach).

$$p_m = \sum_{i=1}^{n_s} p_i$$



te same warunki: V i T

$p_m$  - ciśnienie mieszaniny w objętości V i temperaturze T [Pa]

$p_i$  - ciśnienie cząstkowe i-tego składnika w tej samej objętości i temperaturze [Pa]

$n_s$  - liczba składników mieszaniny [-]

# Powietrze atmosferyczne

---

**Powietrze atmosferyczne** – w ujęciu termodynamicznym jest to mieszanina powietrza suchego oraz pary wodnej.

Skład powietrza suchego jest praktycznie niezmienny. Stwierdzono, że nawet w powietrzu zanieczyszczonym, w obszarach uprzemysłowionych, zmienia się tylko udział dwutlenku węgla, jednak i on rzadko przekracza 0.05%. Udział pary wodnej zmienia się za to w dość szerokich granicach, od około 0.08 do 2.5%. Ponadto para wodna występująca w powietrzu atmosferycznym ulega zmianom stanu skupienia.

## Skład powietrza suchego (w %):

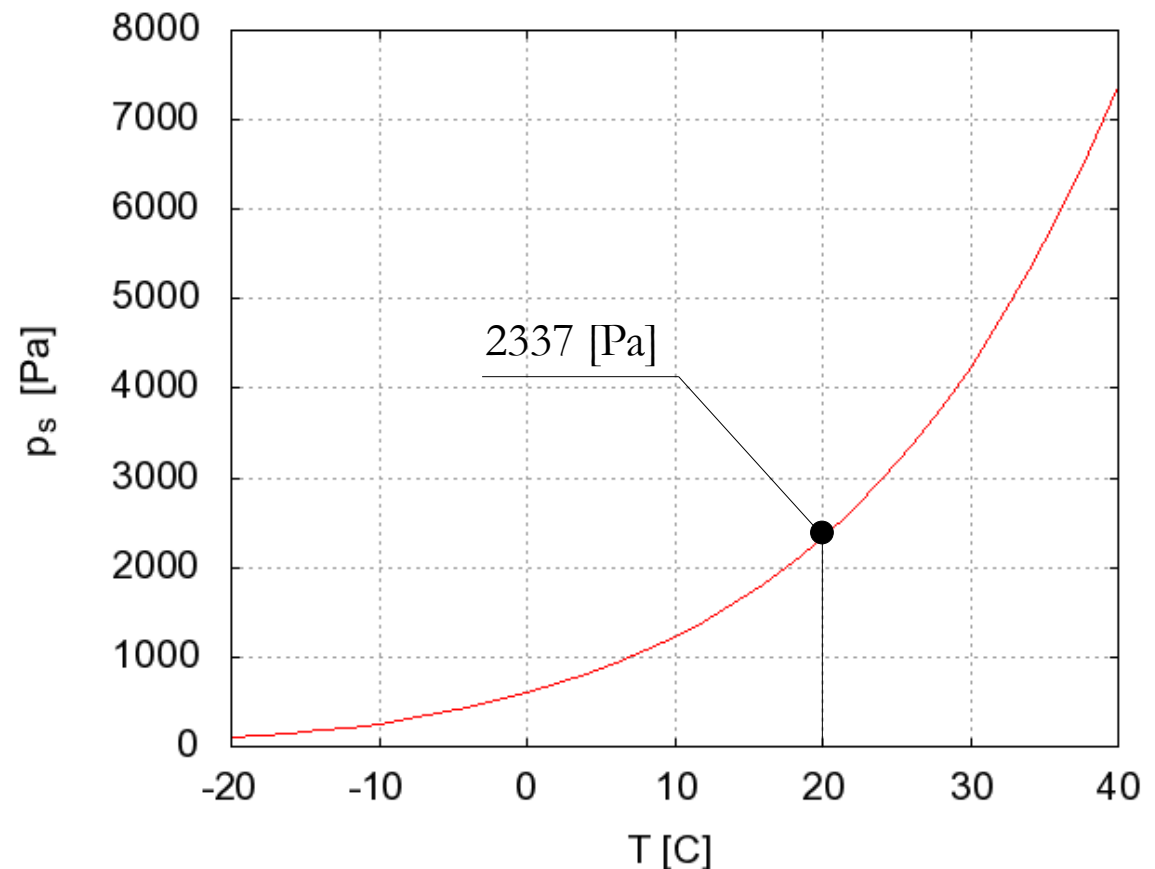
azot	78.084
tlen	20.946
argon	0.934
dwutlenek węgla	0.0360
neon	0.00181
hel	0.00052
metan	0.00017
krypton	0.00011
wodór	0.00005
ksenon	0.000008

# Powietrze nasycone i nienasycone

---

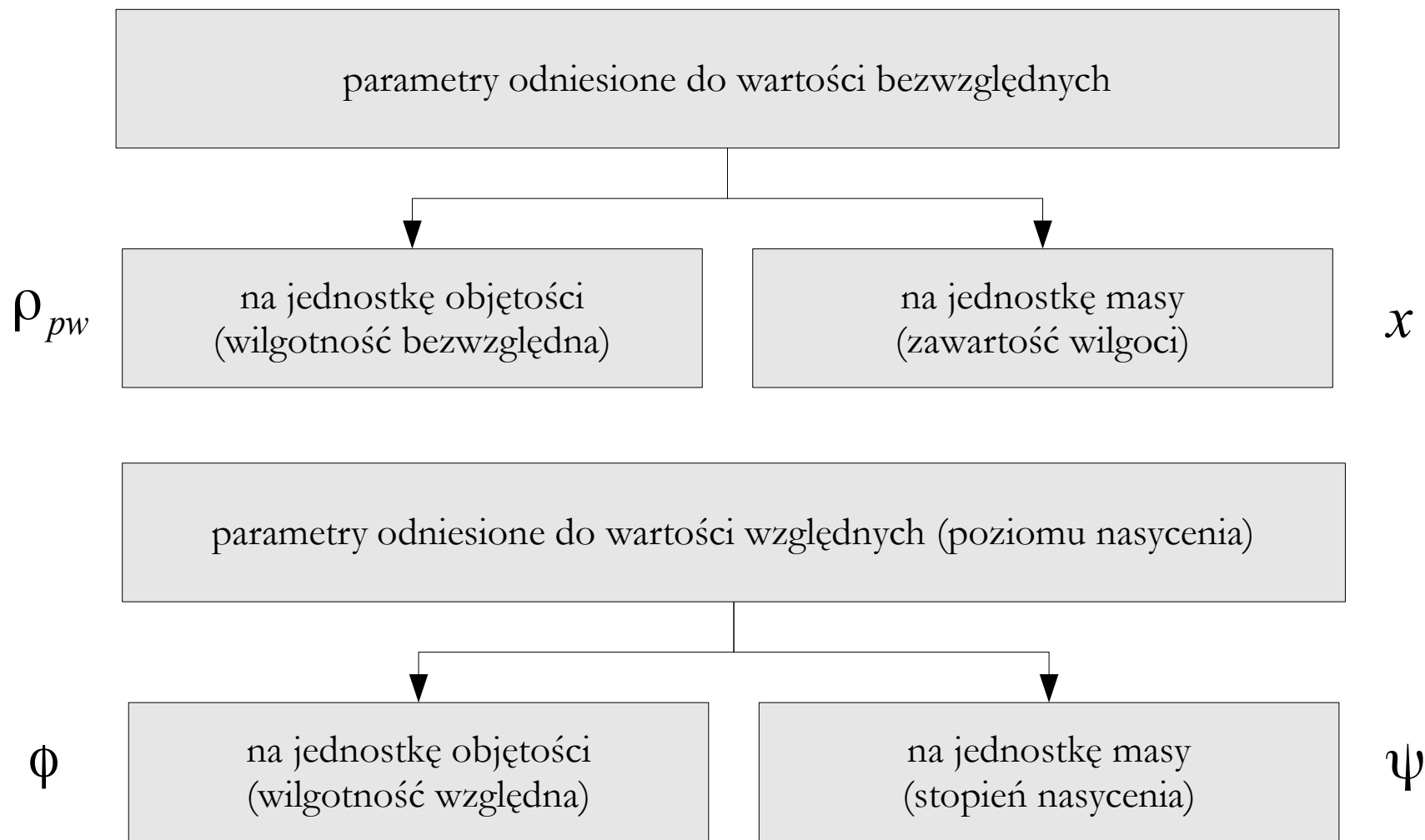
**Powietrze nasycone** – powietrze zawierające maksymalną w danej temperaturze ilość pary wodnej.

**Powietrze nienasycone** – powietrze, które może w danej temperaturze wchłonąć jeszcze pewną ilość pary wodnej.



# Koncepcje definiowania wilgotności powietrza

---



# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

**Wilgotność bezwzględna powietrza** (gęstość pary wodnej w powietrzu wilgotnym) – masowa zawartość pary wodnej w jednostce objętości powietrza wilgotnego.

$$\rho_{pw} = \frac{m_{pw}}{V}$$

$\rho_{pw}$  - wilgotność bezwzględna powietrza  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$   
 $m_{pw}$  - masa pary wodnej  $[kg]$   
 $V$  - jednostkowa objętość mieszaniny  $[m^3]$

Przy założeniu, że para wodna jest gazem idealnym można uzyskać inną formę wzoru:

$$p_{pw} \cdot V = m_{pw} \cdot R_{pw} \cdot T$$

$$\frac{p_{pw}}{R_{pw} \cdot T} = \frac{m_{pw}}{V} = \rho_{pw}$$

# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

**Wilgotność względna powietrza** – stosunek wilgotności bezwzględnej do wilgotności bezwzględnej w stanie nasycenia.

$$\rho_{pw\ max} = \frac{m_{pw\ max}}{V}$$

$$\rho_{pw\ max} = \frac{p_s}{R_{pw} \cdot T}$$

$$\phi = \frac{\rho_{pw}}{\rho_{pw\ max}}$$

$$\phi = \frac{p_{pw}}{p_s}$$

$$\phi = \frac{m_{pw}}{m_{pw\ max}}$$

$\rho_{pw}$

- wilgotność bezwzględna powietrza

$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$\rho_{pw\ max}$

- wilgotność bezwzględna w stanie nasycenia

$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$\phi$

- wilgotność względna

$[-]$

$p_{pw}$

- ciśnienie pary wodnej

$[Pa]$

$p_s$

- ciśnienie nasycenia

$[Pa]$



# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

**Zawartość wilgoci** – masa pary wodnej przypadająca na jednostkę masy powietrza suchego.

$$x = \frac{m_{pw}}{m_{ps}} = \frac{p_{pw}}{p_{ps}} \cdot \frac{R_{ps}}{R_{pw}}$$

zakładając, że gaz jest idealny

$$m_{pw} = \frac{p_{pw} \cdot V}{R_{pw} \cdot T}$$

$$m_{ps} = \frac{p_{ps} \cdot V}{R_{ps} \cdot T}$$

$$x = \frac{p_{pw}}{p - p_{pw}} \cdot \frac{R_{ps}}{R_{pw}}$$

prawo Daltona

$$x = \frac{\phi \cdot p_s}{p - \phi \cdot p_s} \cdot \frac{R_{ps}}{R_{pw}} \quad \leftarrow \quad \phi = \frac{p_{pw}}{p_s}$$

$m_{pw}$  - masa pary wodnej [kg]

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

$x$  - zawartość wilgoci [-]

$\phi$  - wilgotność względna [-]

$$x = 0.622 \cdot \frac{\phi \cdot p_s}{p - \phi \cdot p_s}$$

# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

**Stopień nasycenia** – stosunek zawartości wilgoci do zawartości wilgoci powietrza nasyconego w tej samej temperaturze.

$$\psi = \frac{x}{x_{max}}$$

$x$  - zawartość wilgoci

$x_{max}$  - zawartość wilgoci powietrza nasyconego

$\psi$  - stopień nasycenia  $[-]$

Uwaga na jednostkę zawartości wilgoci: zarówno w liczniku jak i w mianowniku są kilogramy, ale przeważnie się ich nie skraca podając dokładne znaczenie wyniku

$$\left[ \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg powietrza suchego}} \right]$$

# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

**Temperatura punktu rosy** (punkt rosy) – temperatura, w której, przy danym składzie gazu lub mieszaniny gazów i ustalonym ciśnieniu, może rozpocząć się proces skraplania gazu lub wybranego składnika mieszaniny gazu.

$$t_{pr} = \sqrt[8]{\frac{\Phi}{100}} \cdot (112 + 0.9 \cdot t) + 0.1 \cdot t - 112$$

$t_{pr}$  - temperatura punktu rosy  $[^{\circ}C]$

$t$  - temperatura powietrza wilgotnego  $[^{\circ}C]$

$\Phi$  - wilgotność bezwzględna  $[\%]$



# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

Zastępcza indywidualna stała gazowa powietrza wilgotnego.

$$R_z = \frac{m_{pw}}{m} \cdot R_{pw} + \frac{m_{ps}}{m} \cdot R_{ps}$$

$pw$  - para wodna

$ps$  - powietrze suche

po przekształceniach

$$R_z = \frac{R_{ps} + x \cdot R_{pw}}{1 + x}$$

$$R_{pw} = 461.5 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

$$R_{ps} = 287.1 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

Gęstość powietrza wilgotnego.

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

$p_w$  - para wodna

$$\frac{m}{V} = \rho = \frac{p}{R_i \cdot T} = \frac{p_{ps}}{R_{ps} \cdot T} + \frac{p_{pw}}{R_{pw} \cdot T}$$

$p_s$  - powietrze suche

$$\rho = \frac{1}{T} \cdot \left( \frac{p_{ps}}{R_{ps}} + \frac{p_{pw}}{R_{pw}} \right) = \frac{1}{T} \cdot \frac{p_{ps}}{R_{ps}} \cdot \left( 1 + \frac{p_{pw}}{R_{pw}} \cdot \frac{R_{ps}}{p_{ps}} \right)$$

$$\rho = \frac{1}{T} \cdot \frac{p_{ps}}{R_{ps}} \cdot (1 + x)$$

$$x = \frac{m_{pw}}{m_{ps}} = \frac{p_{pw}}{p_{ps}} \cdot \frac{R_{ps}}{R_{pw}}$$

# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

**Entalpia powietrza wilgotnego** – suma entalpii właściwych powietrza suchego oraz zawartej w nim wilgoci.

$$h = h_{ps} + x \cdot h_{pw}$$

suma energii potrzebnej do wytworzenia pary oraz (zależnie od sytuacji) do dalszego jej podgrzania

$h$  - entalpia powietrza wilgotnego

$h_{ps}$  - entalpia powietrza suchego

$h_{pw}$  - entalpia pary wodnej zawartej w powietrzu

$x$  - zawartość wilgoci w powietrzu

$$\left[ \frac{J}{kg} \right] \left[ \frac{J}{kg} \right] \left[ \frac{J}{kg} \right] \left[ - \right]$$

# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

$$h = c_{ps} \cdot t + x \cdot (r_{H_2O} + c_{pw} \cdot t)$$

wzór obowiązuje dla  $t > 0$

$$c_{ps} = 1.005 \quad [kJ/kg \cdot K]$$

$$c_{pw} = 1.84 \quad [kJ/kg \cdot K]$$

$$r_{H_2O} = 2501 \quad [kJ/kg]$$

$h$  - entalpia powietrza wilgotnego  $[J/kg]$

$t$  - temperatura powietrza wilgotnego  $[^{\circ}C]$

$c_{ps}$  - średnie ciepło właściwe powietrza suchego  $[J/kg \cdot K]$

$c_{pw}$  - średnie ciepło właściwe pary wodnej  $[J/kg \cdot K]$

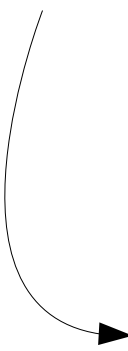
$x$  - zawartość wilgoci w powietrzu  $[-]$

$r_{H_2O}$  - ciepło parowania wody ( $\approx 2501\ 000$ )  $[J/kg]$

# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

$$h = c_{ps} \cdot t + x \cdot (r_{H_2O} + c_{pw} \cdot t)$$


$$h = (1.007 \cdot t - 0.026) + (2501 + 1.84 \cdot t) \cdot x \quad 0 < t [^{\circ}C] < 60$$

$$h = 1.005 \cdot t + (2501 + 1.84 \cdot t) \cdot x \quad -20 < t [^{\circ}C] < 0$$

Wzór pozwalający wyznaczyć entalpię powietrza wilgotnego na podstawie temperatury i zawartości wilgoci

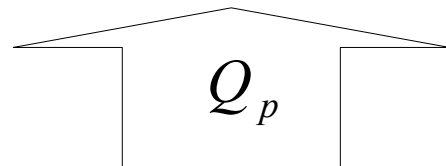
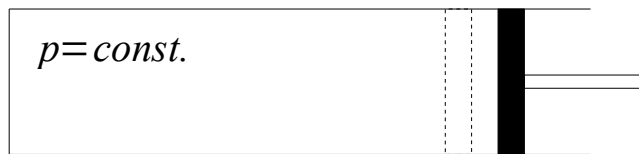


# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

$$h = c_{ps} \cdot t + x \cdot r_{H_2O} + x \cdot c_{pw} \cdot t$$

entalpia kilograma powietrza suchego  
(patrz wykład „Praca i ciepło”)

energia potrzebna do wytworzenia pary:  
masa  $\times$  ciepło parowania



$$h = c_p \cdot T$$

$$\Delta Q = m \cdot r_s$$

energia potrzebna do podgrzania pary:  
masa  $\times$  ciepło właściwe  $\times$  różnica temperatur  
(tu  $T_1 = 0$ )

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

# Parametry charakteryzujące powietrze wilgotne

---

Jeśli powietrze jest przesycone (jest mgła), to trzeba dodać entalpię wody w postaci kropelek:

$$h = c_{ps} \cdot t + x_{max} \cdot r_{H_2O} + x_{max} \cdot c_{pw} \cdot t + \underbrace{(x - x_{max}) \cdot c_{H_2O} \cdot t}_{\text{energia kropelek wody (tu } T_1 = 0)}$$

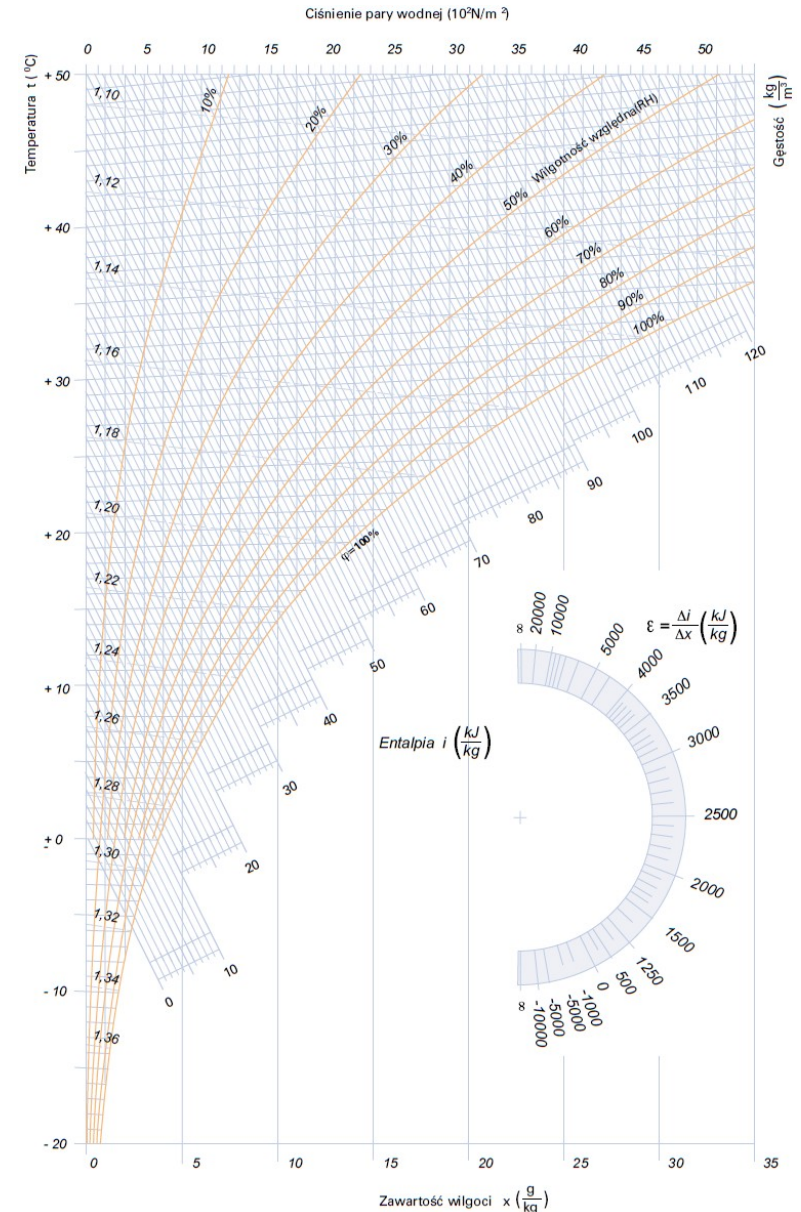
energia kropelek wody (tu  $T_1 = 0$ )

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

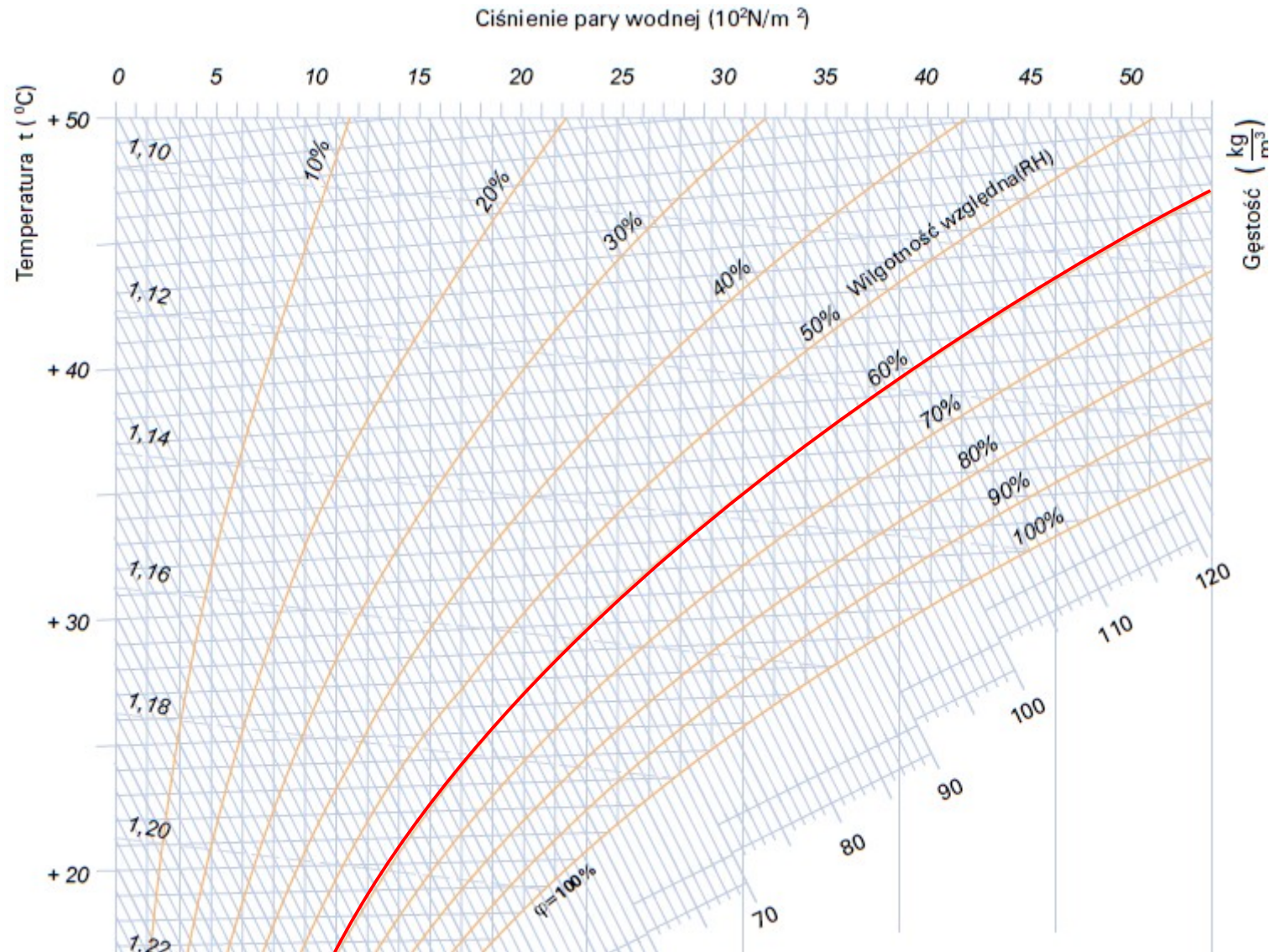


# Wykres Moliera

**Wykres Moliera** – wykres prezentujący zależności pomiędzy podstawowymi parametrami powietrza takimi jak: temperatura, wilgotność względna, zawartość wilgoci, entalpia powietrza i gęstość właściwa. Parametry te są podstawą obliczeń wszelkich przemian powietrza oraz procesów z tym związanych. Staje się podstawą doboru urządzeń w centralach wentylacyjnych oraz określeniu co się z powietrzem dzieje.

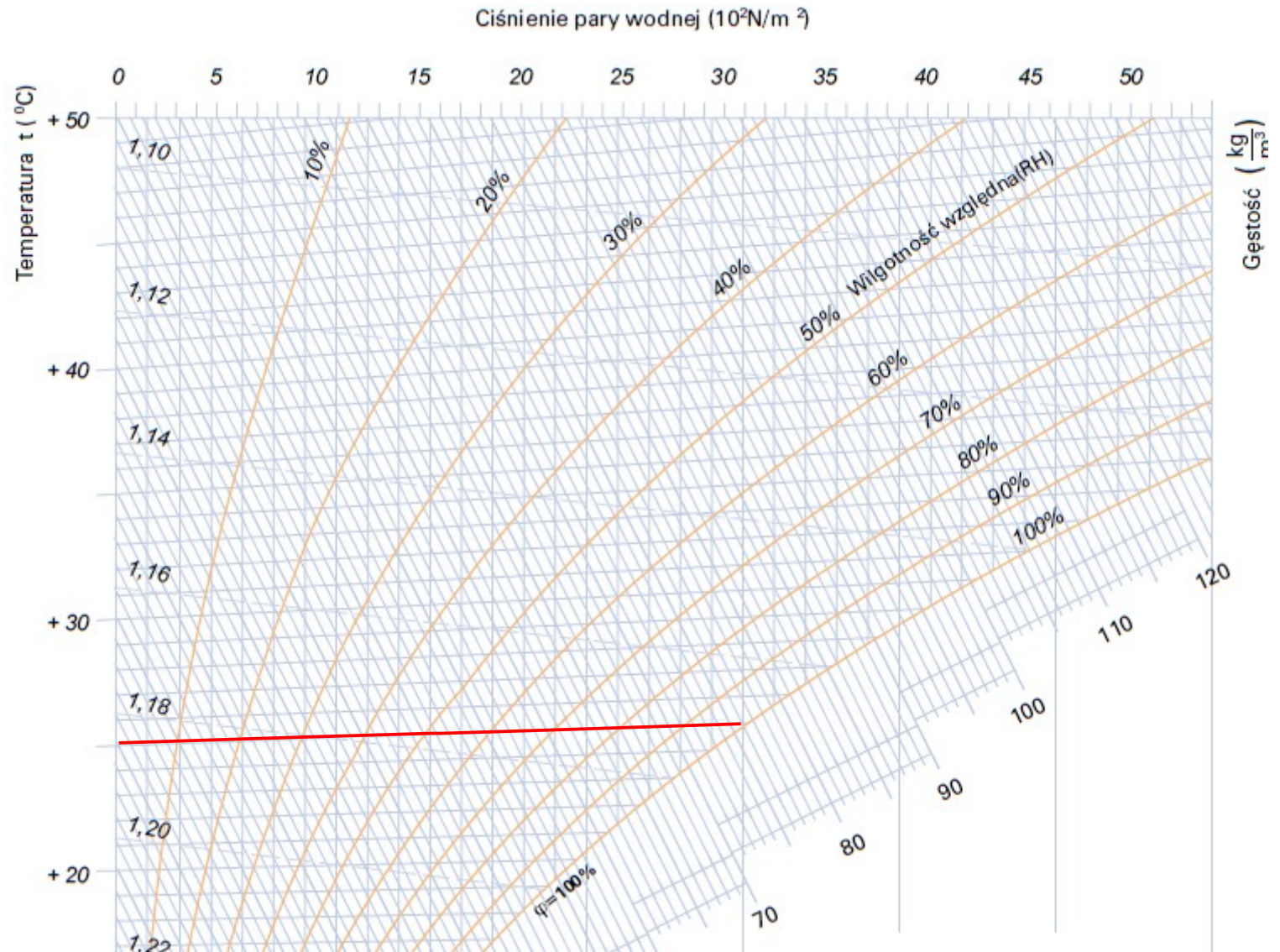


# Wykres Moliera



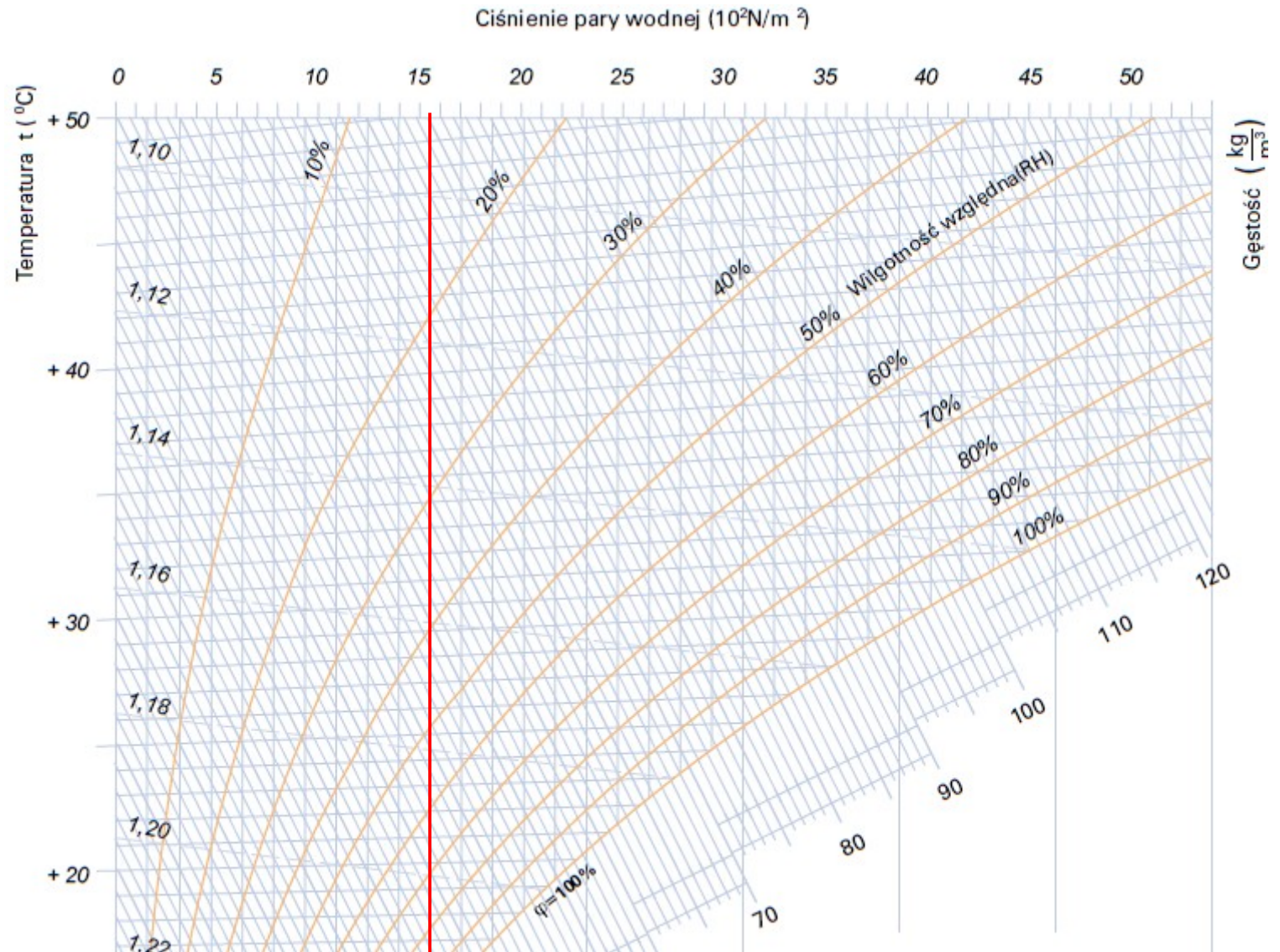
linie stałych  
wartości  
wilgotności

# Wykres Moliera



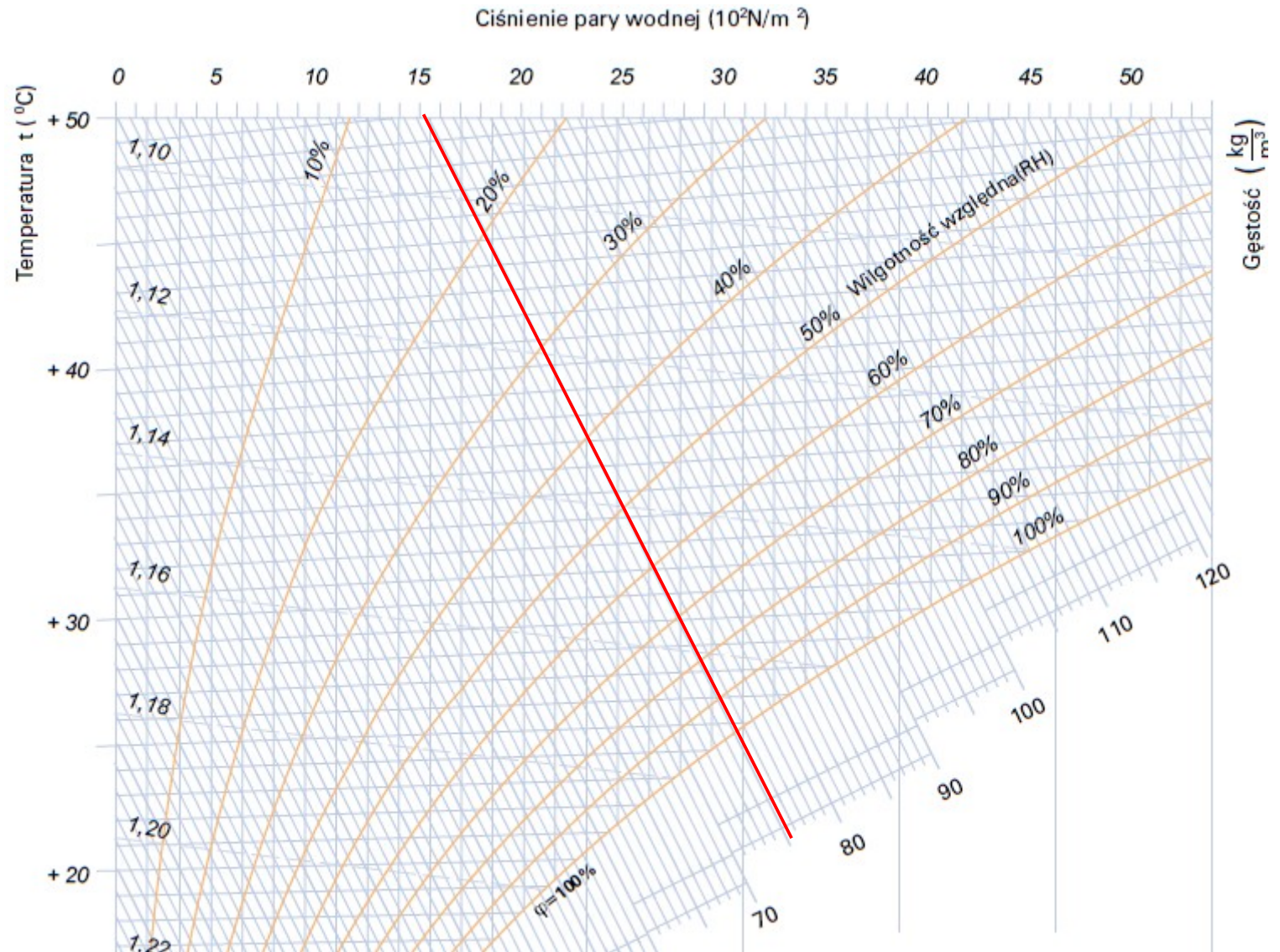
linie stałych  
wartości  
temperatur

# Wykres Moliera



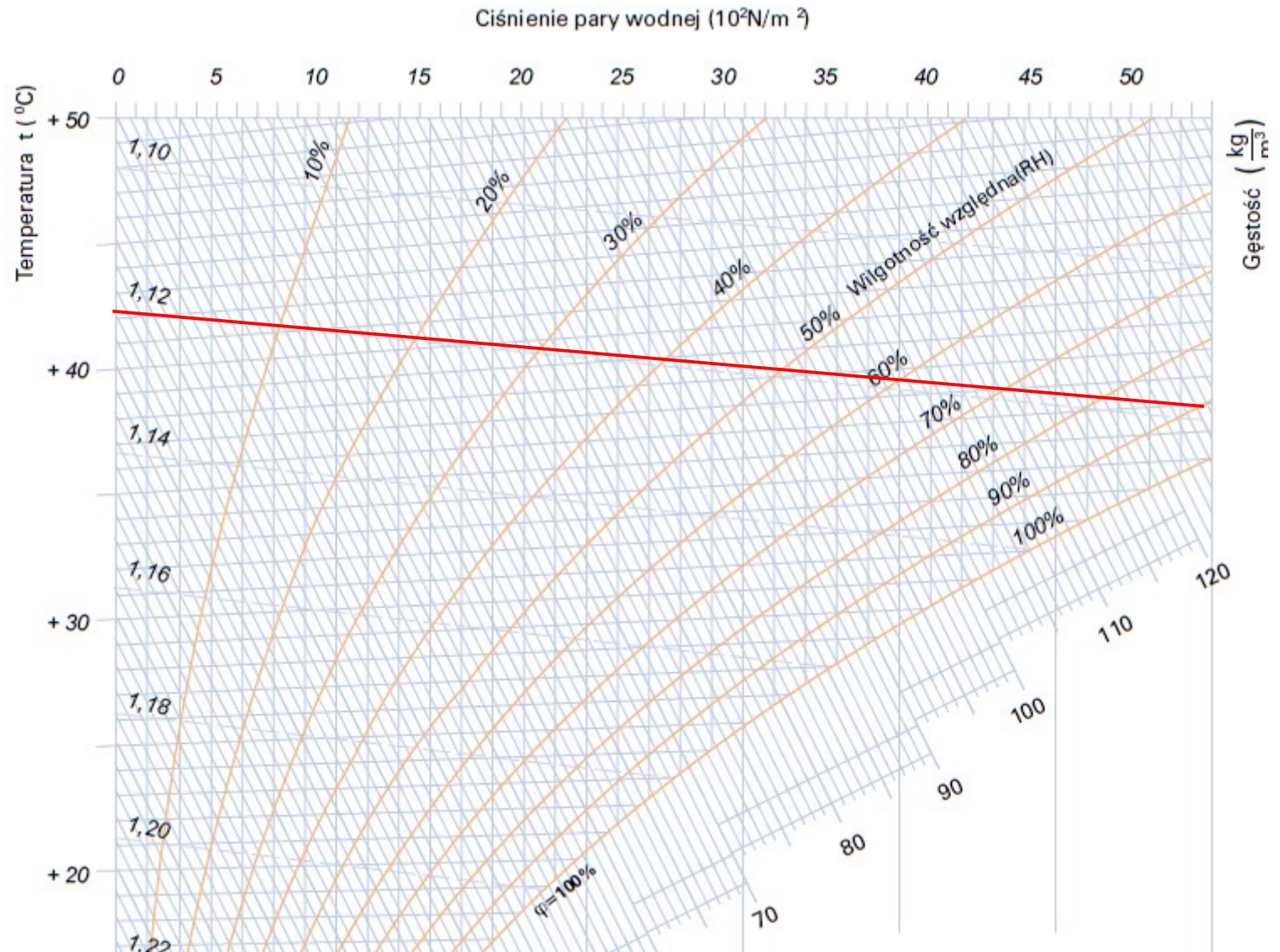
linie stałych  
wartości  
ciężnienia  
pary  
wodnej

# Wykres Moliera



linie stałych  
wartości  
entalpii

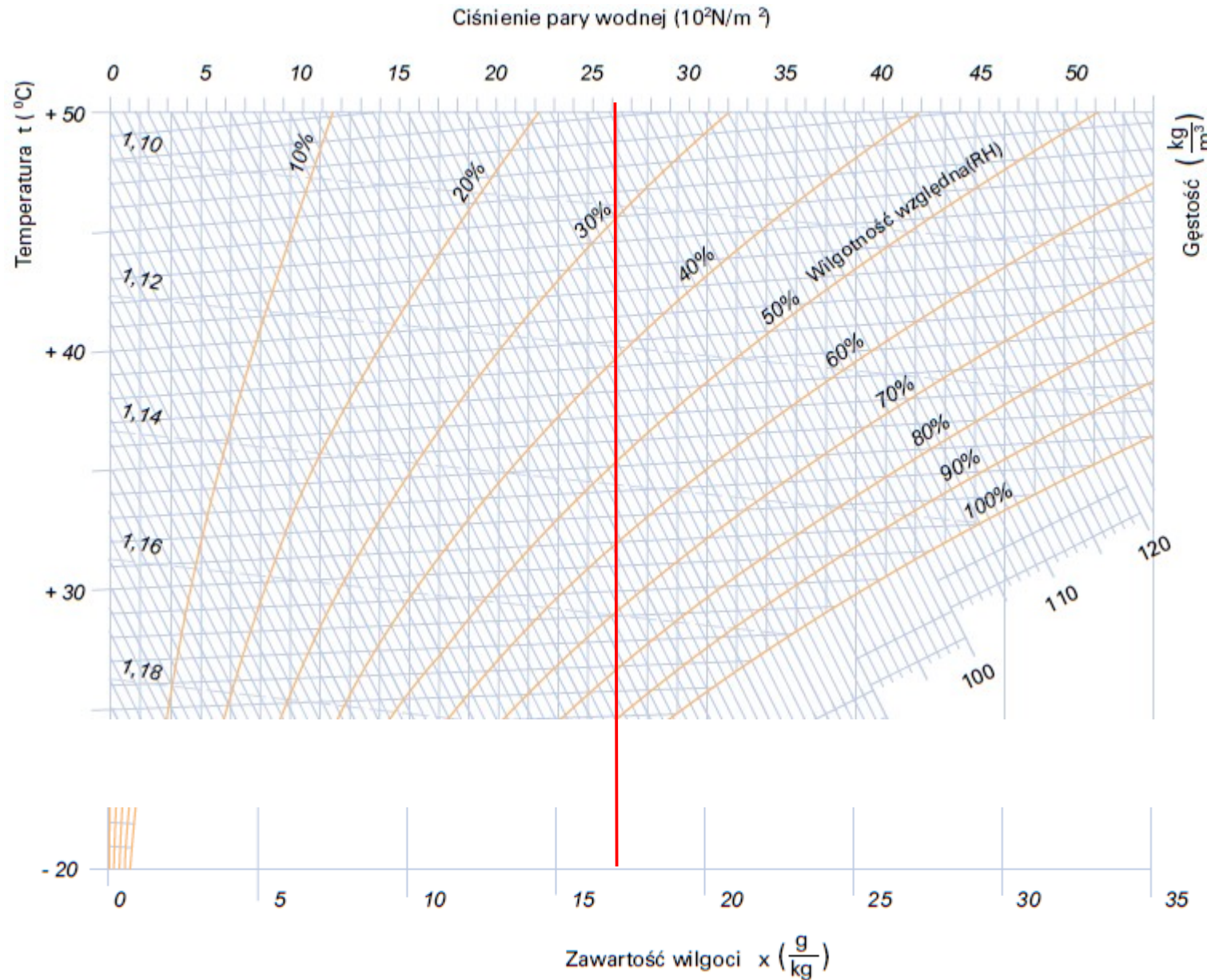
# Wykres Moliera



linie stałych  
wartości  
gęstości

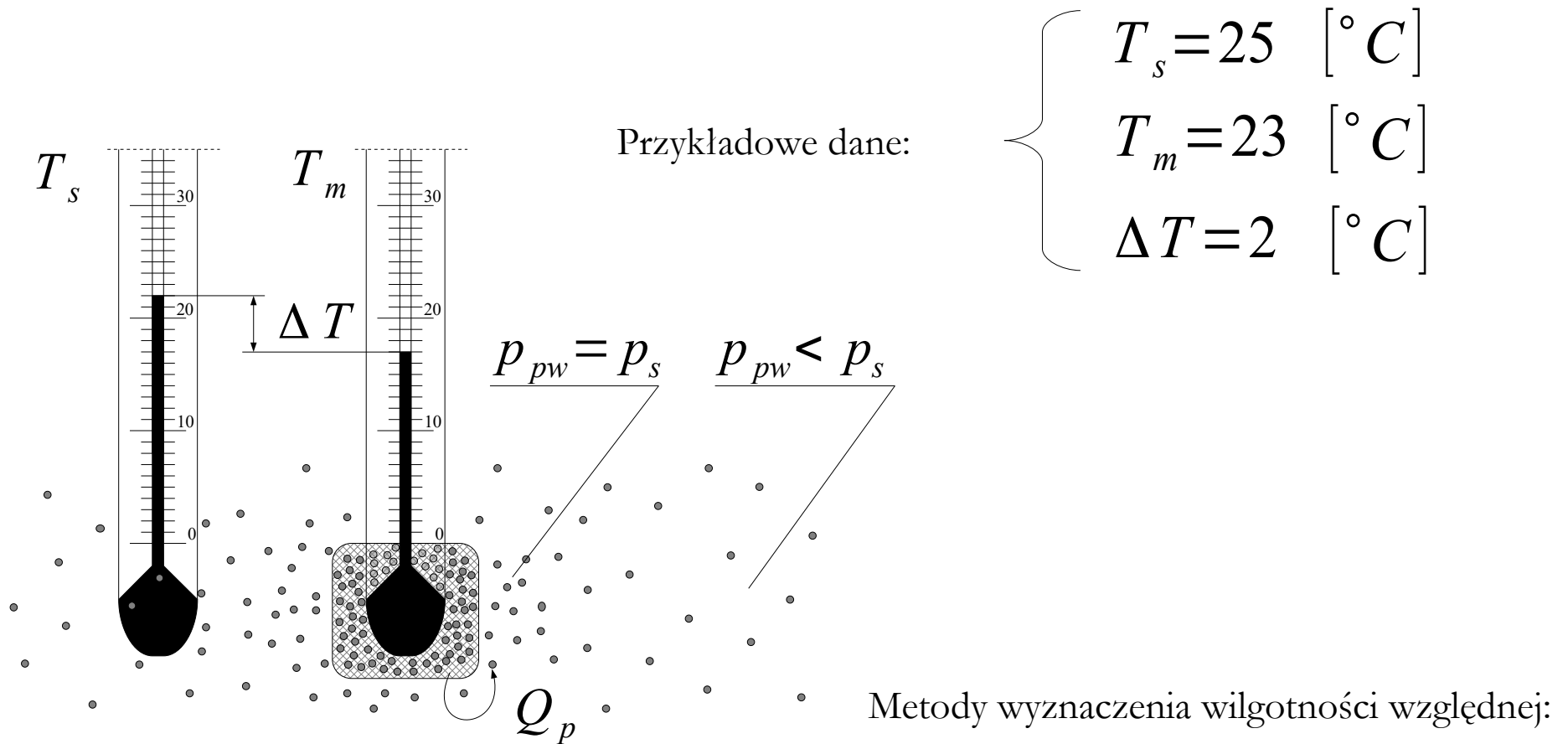


# Wykres Moliera



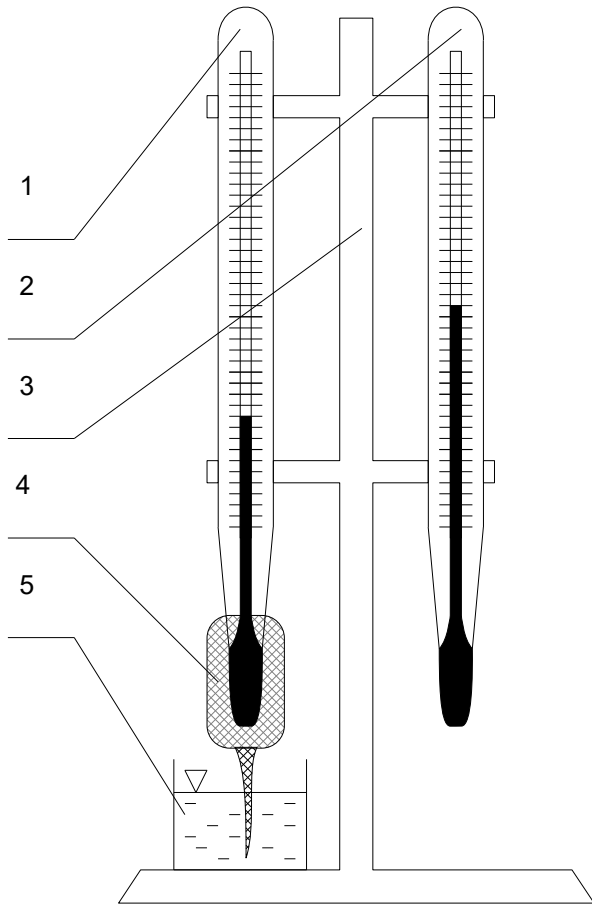
linie stałych  
wartości  
zawartości  
wilgoci

# Pomiar wilgotności metodą psychrometryczną

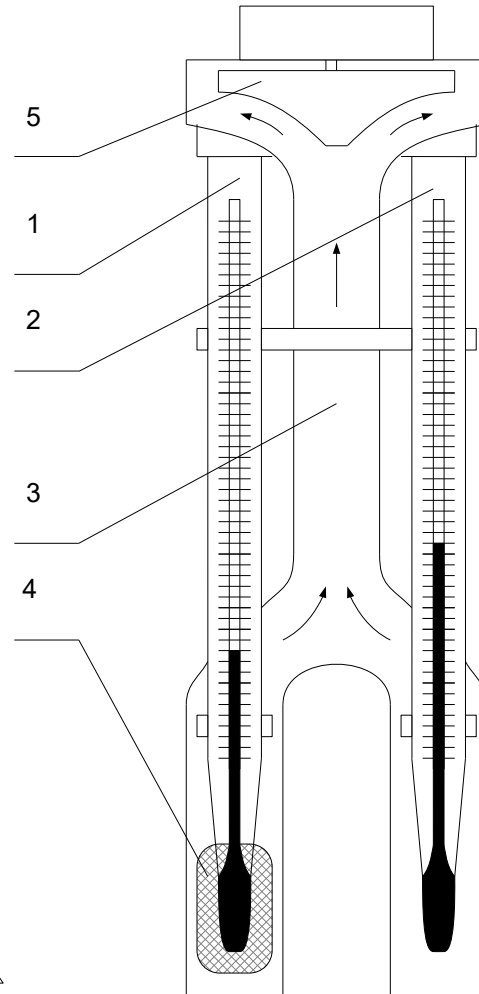


- 1) z wykresu psychrometrycznego
- 2) z wykresu Moliera
- 3) ze wzoru Sprunga

# Pomiar wilgotności metodą psychrometryczną

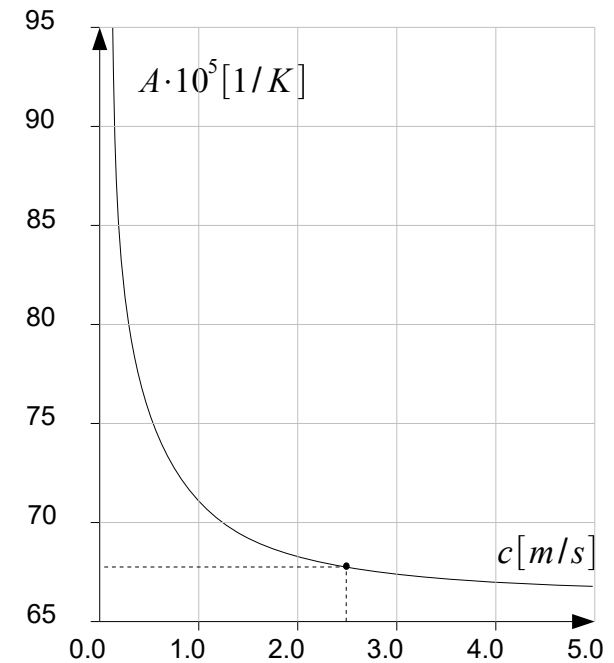


Psychrometr Augusta



Psychrometr Assmanna

$$A = \left( 65 + \frac{6.75}{c} \right) \cdot 10^{-5}$$

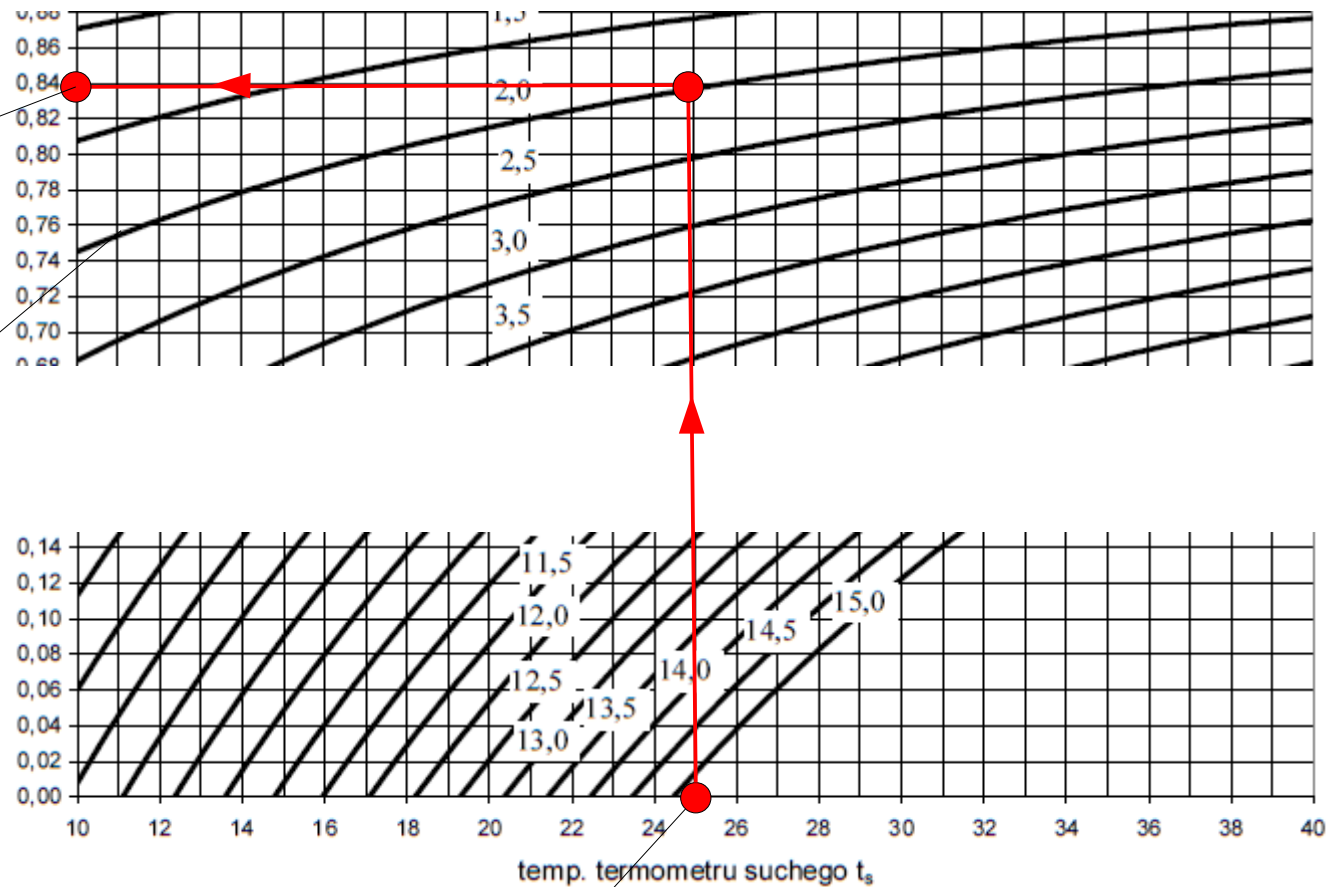


Stała psychrometru

# Pomiar wilgotności metodą psychrometryczną

$$\phi = 84\%$$

$$\Delta T = 2$$



$$T_s = 25$$

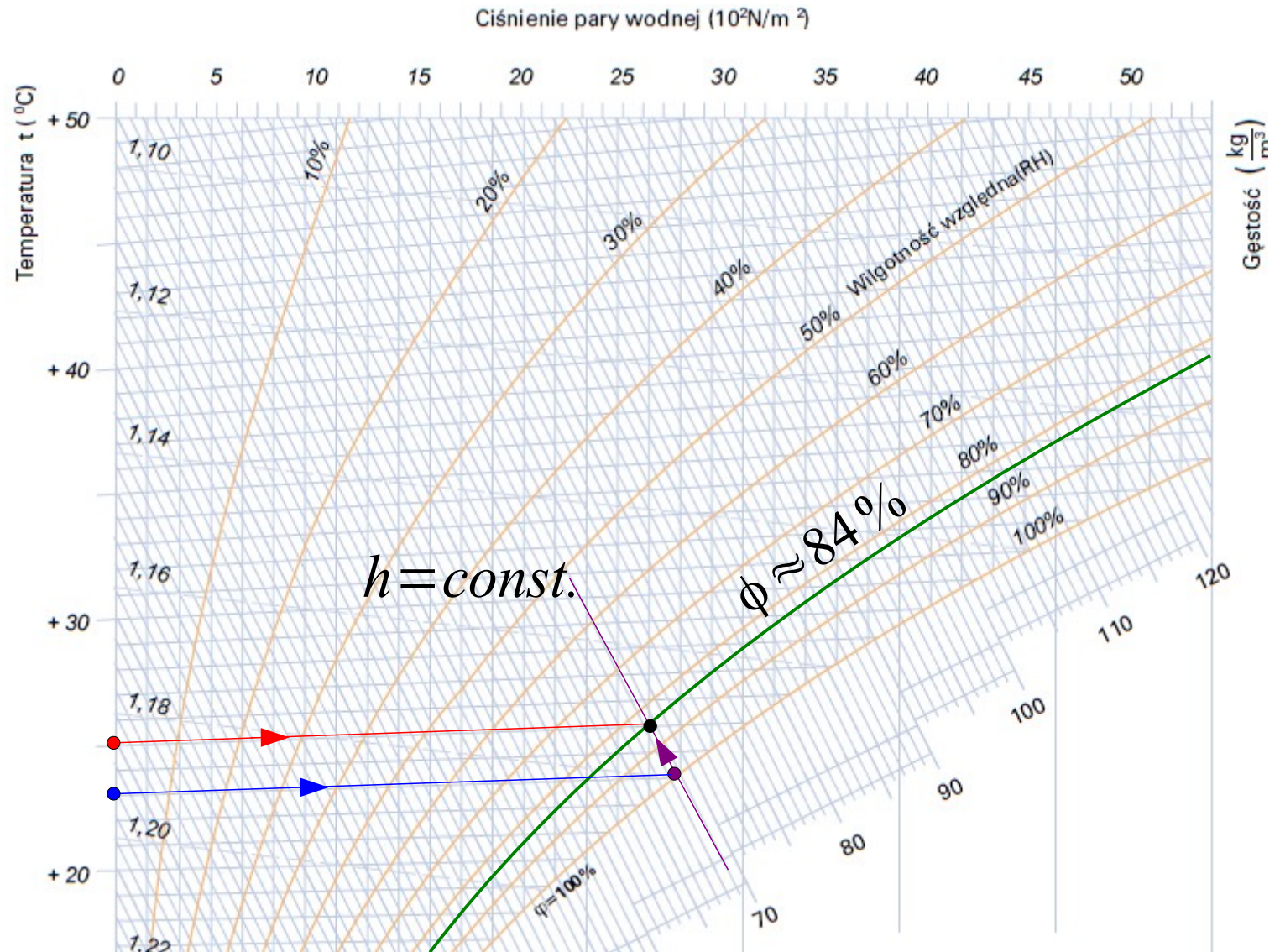
Wyznaczanie wilgotności względnej z wykresu psychrometrycznego

# Pomiar wilgotności metodą psychrometryczną

Wyznaczanie wilgotności względnej z wykresu Moliera

$$T_s = 25$$

$$T_m = 23$$



# Pomiar wilgotności metodą psychrometryczną

---

Wyznaczanie  
wilgotności  
względnej ze  
wzoru Sprunga

$$\phi = \frac{p_{sm} - A \cdot (T_s - T_m) \cdot p_b}{p_{ss}} 100$$

$$p_{sm} = 2750 \quad [Pa]$$

$$p_{ss} = 3100 \quad [Pa]$$

$$p_b = 101325 \quad [Pa]$$

$$\phi = 84.28\%$$

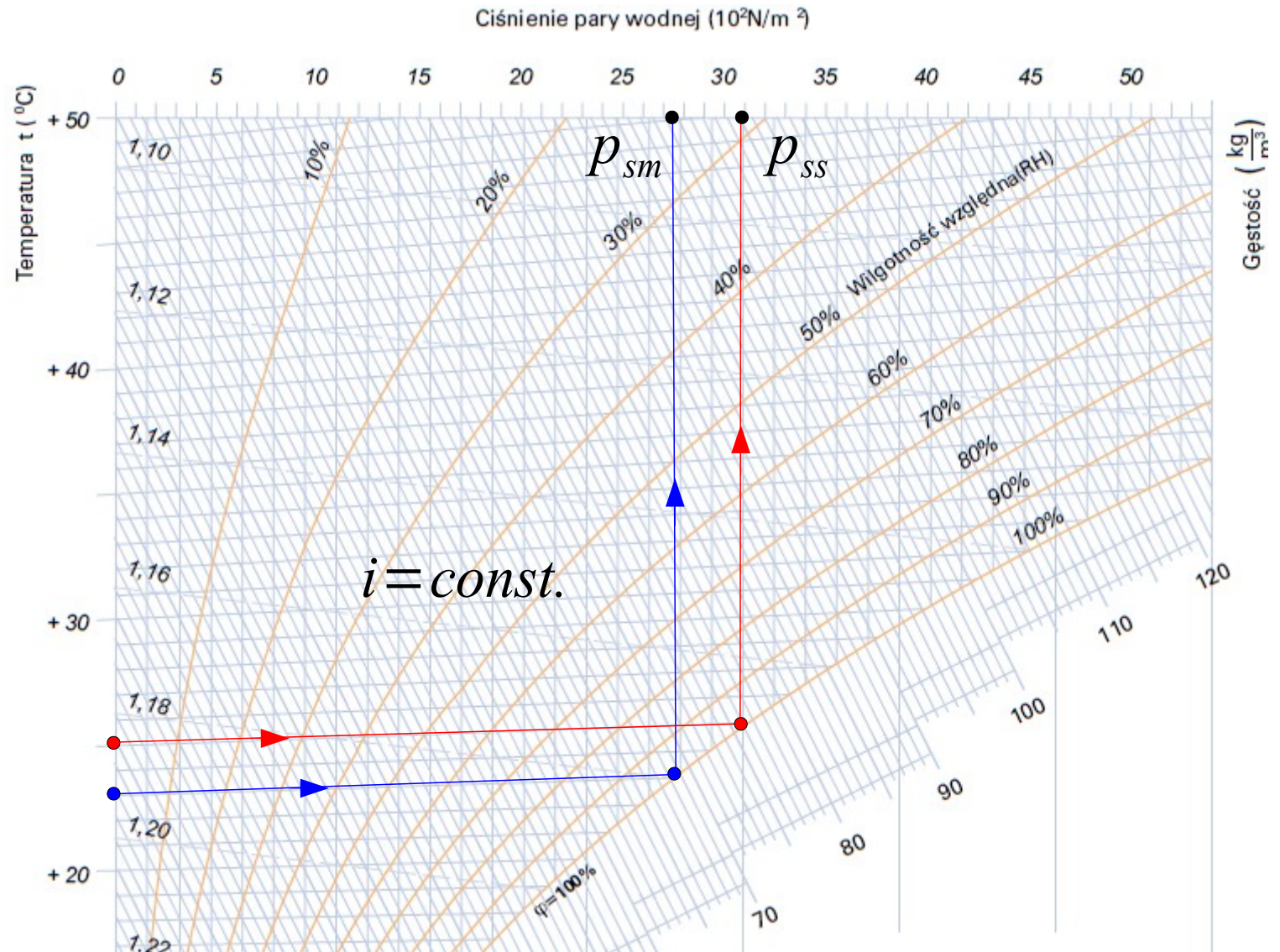
$$A = \left( 65 + \frac{6.75}{c} \right) \cdot 10^{-5} \xrightarrow{c=2.5} A = 0.000676$$

# Pomiar wilgotności metodą psychrometryczną

Wyznaczanie ciśnienia nasycenia z wykresu Moliera

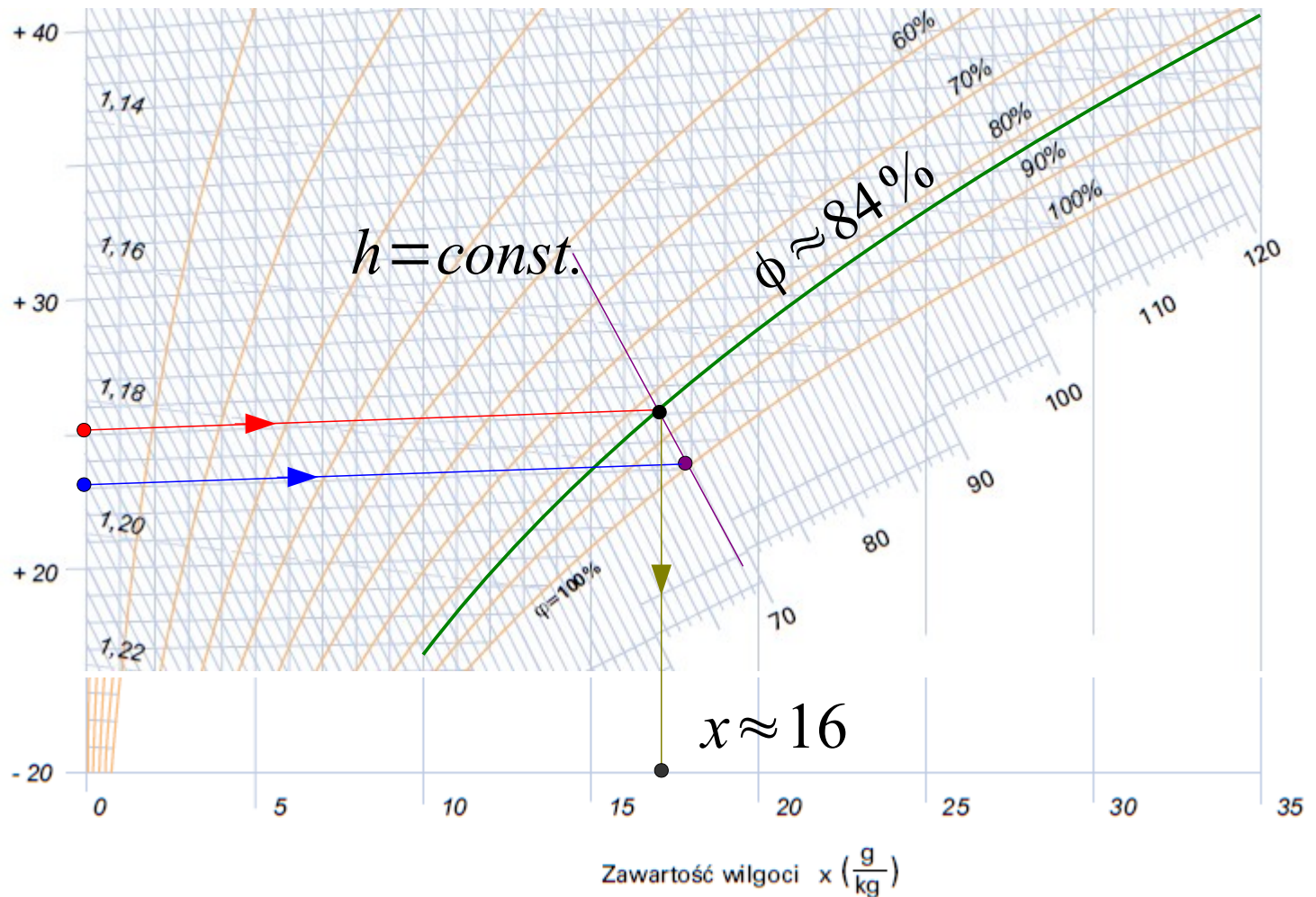
$$T_s = 25$$

$$T_m = 23$$



# Określanie zawartości wilgoci

Wyznaczanie  
zawartości wilgoci  
z wykresu Moliera



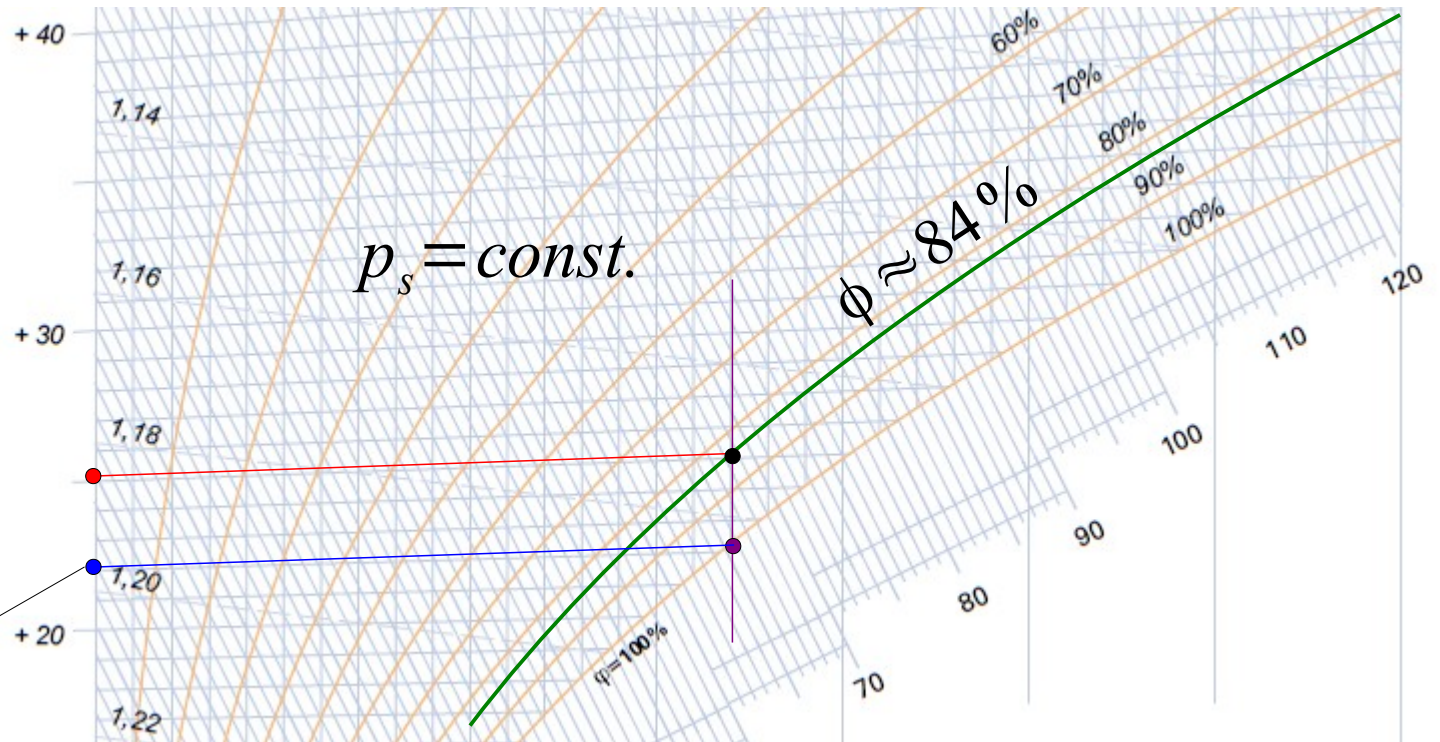
$$x = 0.622 \cdot \frac{\phi \cdot p_s}{p - \phi \cdot p_s} = 16.44$$

dla porównania:  
zawartość wilgoci wyliczona ze wzoru 32



# Określanie punktu rosy

Wyznaczanie temperatury punktu rosy z wykresu Moliera



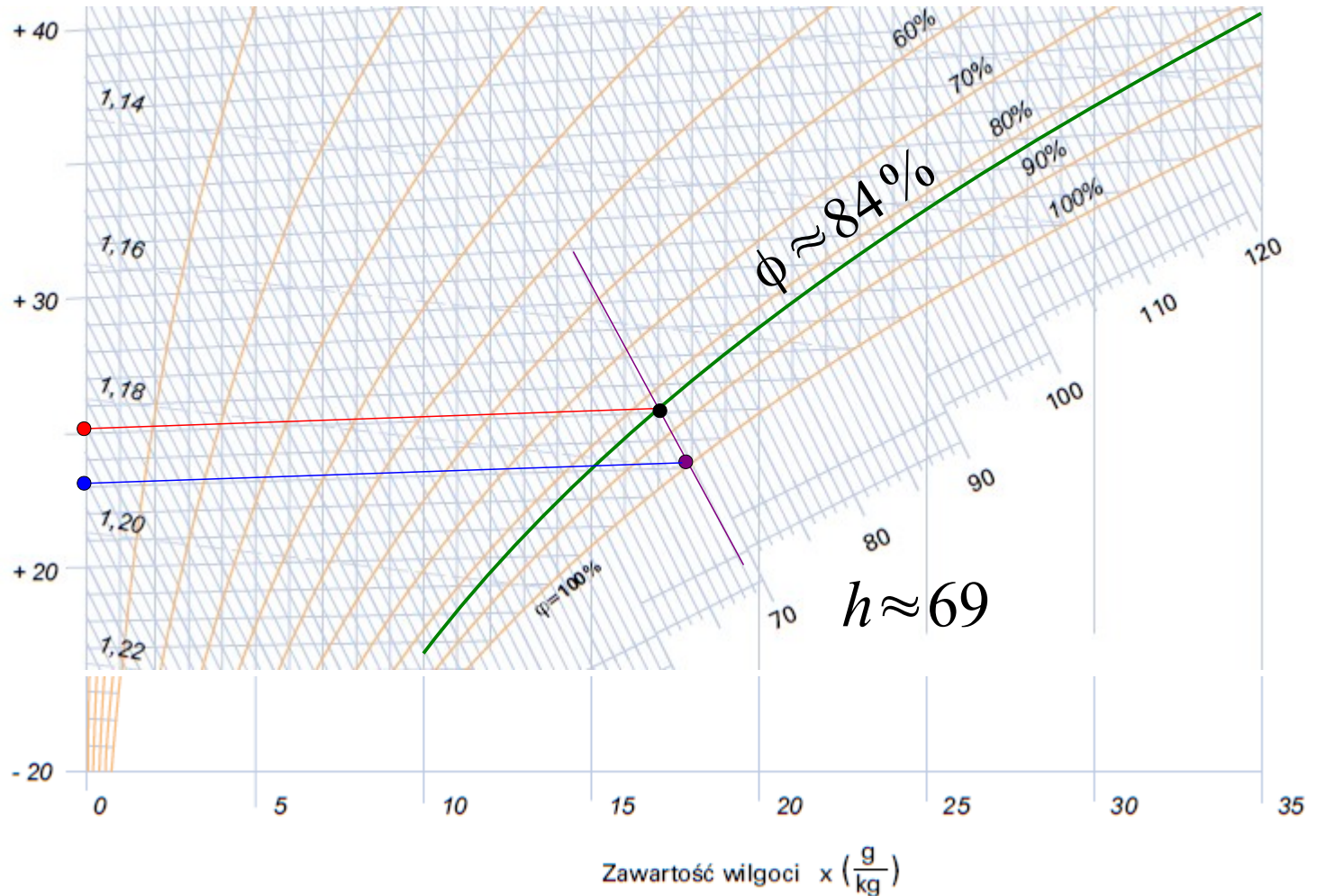
$$t_{pr} \approx 22$$

$$t_{pr} = \sqrt[8]{\frac{\phi}{100}} \cdot (112 + 0.9 \cdot t) + 0.1 \cdot t - 112 = 22.16$$

dla porównania:  
punkt rosy wyliczony  
ze wzoru

# Określanie entalpii powietrza wilgotnego

Wyznaczanie  
zawartości wilgoci  
z wykresu Moliera



$$h = (1.007 \cdot t - 0.026) + (2501 + 1.84 \cdot t) \cdot x = 67.11 \leftarrow \text{dla porównania: entalpia wyliczona ze wzoru}$$

# Pomiary wilgotności powietrza



Stanowisko do pomiaru wilgotności powietrza.

# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

## Wybrane zjawiska pogodowe:

- rosa
  - radiacyjna
  - adwekcyjna
- mgła
  - radiacyjna
  - adwekcyjna
  - radiacyjno-adwekcyjne
    - orograficzne
    - z wyparowania (w tym mgły deszczowe)
    - frontowe

# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

**Rosa radiacyjna** – rosa powstająca na przedmiotach w wyniku wypromieniowywania (radiacji) przez nie energii cieplnej. Ten typ rosy powstaje w warunkach bezchmurnej i bezwietrznej pogody, gdy następuje intensywne wypromieniowanie ciepła z powierzchni Ziemi. Jeżeli temperatura spadnie poniżej punktu rosy, to na przedmiotach będzie się kondensować para wodna tworząc krople rosy.

Ciała o dużej objętości wychładzają się wolniej w wyniku napływu energii cieplnej z wnętrza i rosa osiada na nich później a nawet nie osiada. Tempo chłodzenia zależy w tym przypadku od przewodnictwa cieplnego ciała.

Występowanie rosy radiacyjnej wieczorem i rano prognozuje dobrą pogodę.



# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

**Rosa adwekcyjna** – rosa powstająca w wyniku napływu cieplejszego i wilgotniejszego powietrza w chłodniejsze rejony lub przeniesienia chłodnych przedmiotów do cieplejszych pomieszczeń. W naturze powstaje zazwyczaj w pobliżu frontów atmosferycznych, przed burzą. Wilgotne powietrze ma znacznie wyższą temperaturę punktu rosy – nawet o kilkanaście stopni. Rosa adwekcyjna pojawia się wówczas na kamieniach, glazurze, przedmiotach metalowych w chłodnych pomieszczeniach i zwiastuje pogorszenie pogody lub burzę.

Rosa nie występuje na powierzchniach wchłaniających wodę, a na przedmiotach o bardzo małym napięciu powierzchniowym nie obserwuje się kropelek, lecz jednorodną warstwę wody.

# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

**Mgła radiacyjna** – mgła pojawiająca się podczas bezchmurnych nocy, podczas których grunt szybko oddaje ciepło w postaci promieniowania w podczerwieni i wskutek przewodnictwa cieplnego ochładza warstwę powietrza tuż przy ziemi. Gdy temperatura spadnie poniżej punktu rosy para wodna kondensuje i tworzy się mgła. Przy idealnie bezwietrznych warunkach mgła może mieć nawet poniżej jednego metra grubości. Gdy wieje słaby wiatr mgła może osiągnąć do 300 m grubości.



# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

**Mgła adwekcyjna** – mgła powstająca, gdy nad zimne podłoże napływnie cieplejsze i wilgotne powietrze. Powietrze to wychładza się i następuje kondensacja. Mgły tego typu występują często na morzu (głównie latem), gdy tropikalne masy powietrza napotyka zimniejsze wody z wyższych szerokości geograficznych i nad lądem (zimną), gdy nad zimne podłoże napływa ciepłe morskie powietrze.

Mgły adwekcyjne mogą mieć do kilkuset metrów grubości i są długotrwałe, zwłaszcza przy inwersji temperatury (gdy temperatura rośnie wraz z wysokością). Znikają gdy masa powietrza ulegnie wymianie.





# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

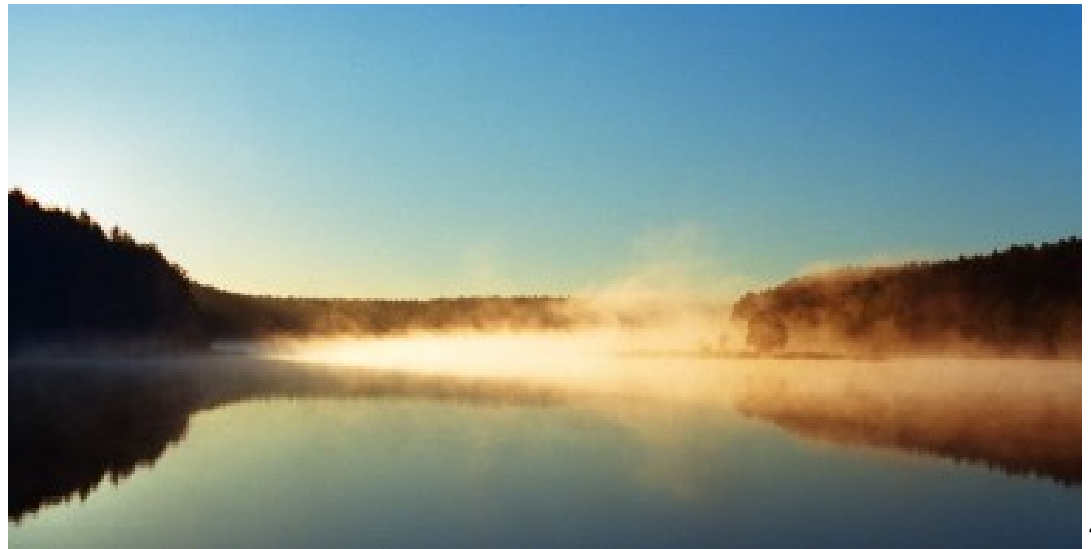
**Mgła orograficzna** – mgła powstała przez ochłodzenie wilgotnego powietrza w wyniku jego uniesienia. Tworzy się najczęściej w górach.



# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

**Mgła z wyparowania** – mgła powstała na skutek parowania z cieplejszej, swobodnej powierzchni wodnej do chłodniejszego otoczenia. Powietrze ogrzane od powierzchni wody i nasycone parą wodną unosi się i ochładza, a zawarta w nim para wodna ulega skropleniu. Do tworzenia się tego rodzaju mgieł potrzebny jest normalny profil temperatury powietrza w przyziemnej/przywodnej warstwie powietrza o stosunkowo dużym pionowym gradiencie temperatury (rzędu 2-4 [°C/m]).



# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

**Mgła deszczowa** – mgła powstała gdy deszcz wypada z wyższej warstwy cieplejszego powietrza i przechodzi przez chłodną warstwę zalegającą przy powierzchni ziemi.



# Punkt rosy a zjawiska pogodowe

---

**Mgła frontowa** – mgła powstała na granicy frontu ciepłego na skutek oziębienia ciepłego i wilgotnego powietrza nasuwającego się na powietrze zimne.

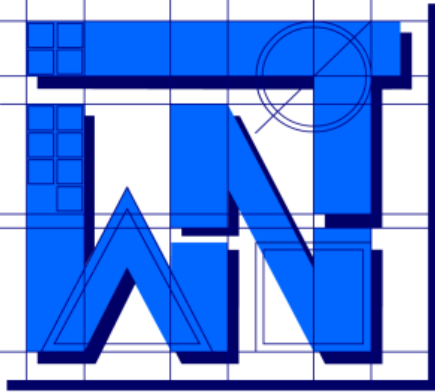


# Podsumowanie

---

## Zagadnienia:

Mieszanina, prawo Daltona, powietrze atmosferyczne, powietrze nasycone i nienasycone, koncepcje definiowania wilgotności powietrza, wilgotność bezwzględna powietrza, wilgotność względna powietrza, zawartość wilgoci, stopień nasycenia, temperatura punktu rosy, zastępcza indywidualna stała gazowa powietrza wilgotnego, gęstość powietrza wilgotnego, entalpia powietrza wilgotnego, wykres Moliera, pomiar wilgotności metodą psychrometryczną, punkt rosy a zjawiska pogodowe.



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN  
The Faculty of Technical Sciences  
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11  
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55  
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



**Dziękuję za uwagę**

**Wojciech Sobieski**

Olsztyn, 2013-2022