

SUSZENIE

PAROWANIE WODY ZE SWOBODNEJ POWIERZCHNI

W wyniku parowania nad cieczą tworzy się warstewka pary nasyconej o temperaturze równej temperaturze parującej cieczy. Parowanie jest to zatem dyfuzja pary przez tę warstewkę. Grubość warstwy dyfuzyjnej zależy od szybkości przepływu gazu nad powierzchnią cieczy: im szybkość ta jest większa, tym warstwa dyfuzyjna ma mniejszą grubość i tym szybszy jest proces parowania. Szybkość parowania zależy także od różnicy ciśnienia pary nasyconej w temperaturze parującej cieczy i ciśnienia cząstkowego pary w otaczającym gazie. Powyższe zależności ujmuje prawo **Daltona**:

$$V = \frac{C \cdot (p_{p \max} - p_p) \cdot 760}{p_b}$$

gdzie:

V- prędkość parowania wody z jednostki powierzchni g/h·m²,

C – współczynnik zależny od prędkości przepływu gazu (powietrza) nad powierzchnią cieczy g/h·m²,

p_{pmax} - ciśnienie pary nasyconej w temperaturze parującej cieczy (wody), czyli ciśnienie nasycenia w mmHg,

p_p – ciśnienie cząstkowe pary w otaczającym gazie w mmHg,

p_b – ciśnienie barometryczne mmHg,

WILGOTNOŚĆ MAS I SUROWCÓW

WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA – odniesiona do masy materiału bezwzględnie suchego m_s

$$W_b = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100\%$$

gdzie:

m_w – masa materiału wilgotnego,

m_s – masa materiału suchego,

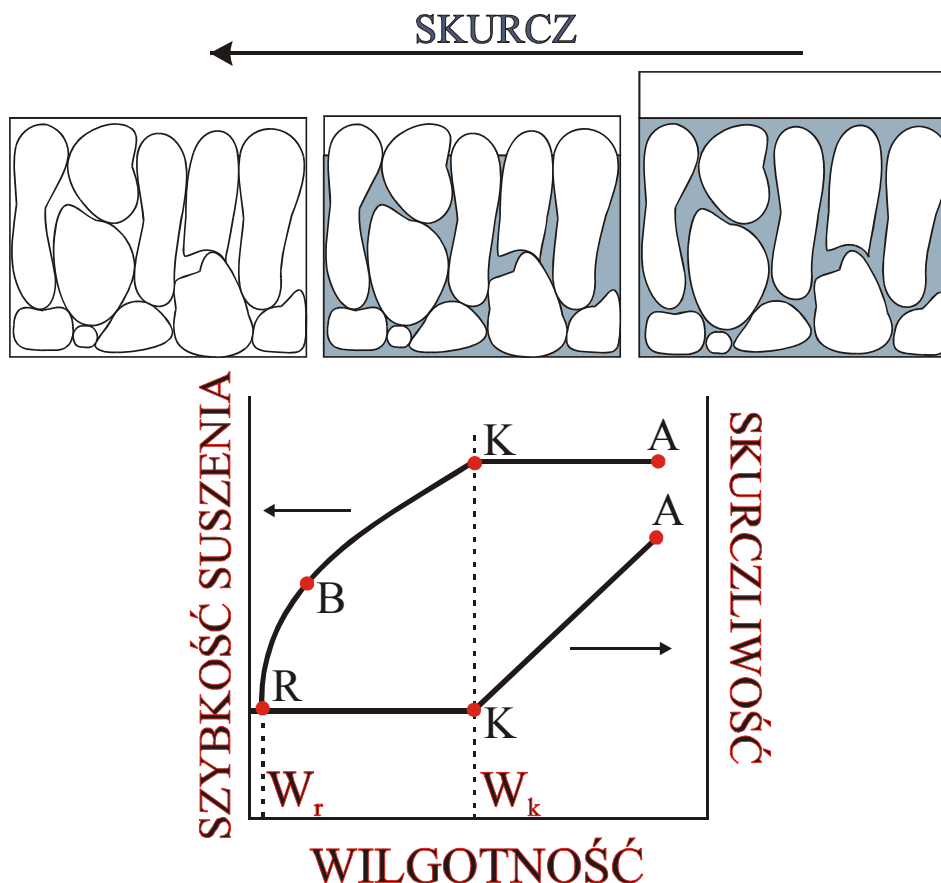
WILGOTNOŚĆ WZGLĘDNA – odniesiona do masy próbki wilgotnej

$$W_w = \frac{m_w - m_s}{m_w} \cdot 100\%$$

RODZAJE WODY W MATERIAŁACH CERAMICZNYCH

- 1. Woda związana chemicznie** w postaci grup hydroksylowych OH^- wchodzi w skład związku w ściśle określonym stosunku stechiometrycznym. Usunięcie powoduje zniszczenie struktury materiału i zachodzi w temperaturach znacznie przekraczających temperatury suszenia.
- 1. Pozostała woda w materiałach:**
 - a) woda swobodna** – oddziela odsunięte od siebie ziarna materiału,
 - b) woda kapilarna** – wypełnia szczeliny między ziarnami materiału,
 - c) woda adsorpcyjna** – zaadsorbowana na powierzchni ziaren,
 - d) woda międzypakietowa** – wchodzi w sposób uporządkowany pomiędzy pakiety minerału np. w montmorylonicie,

PODZIAŁ PROCESU SUSZENIA NA OKRESY

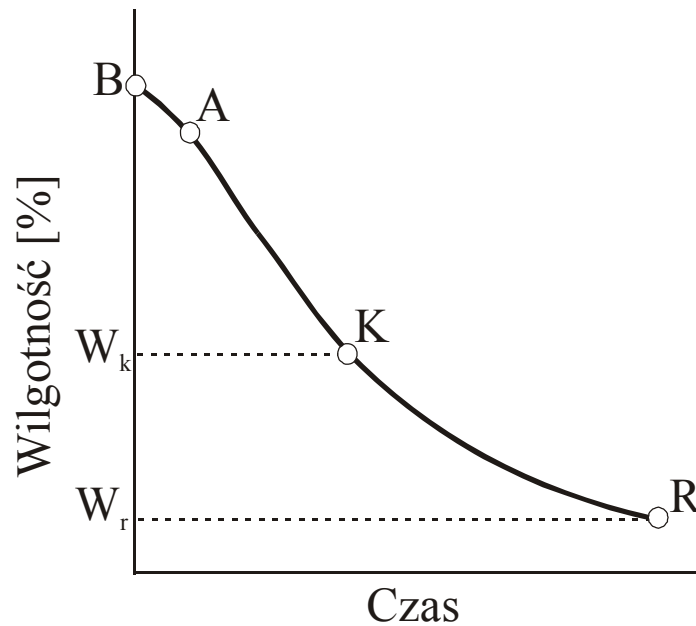


Okres opadającej prędkości suszenia
skurczliwość – wyroby o wilgotności $\leq W_k$ kurczą się nieznacznie lub wcale,
szybkość suszenia – spada, bo kapilary wypełnione są wodą o powierzchni wklęsłej

krzywe K-R

Okres stałej prędkości suszenia
skurczliwość = ilości odparowanej wody,
szybkość suszenia – stała i równa szybkości parowania ze swobodnej powierzchni cieczy

krzywe A-K



Odcinek B-A – ciepło dostarczane zużyte jest na ogrzanie wyrobu, spadek wilgotności jest nieznaczny,

Odcinek A-K – okres stałej szybkości suszenia,

Odcinek K-R – okres opadającej prędkości suszenia,

Wilgotność równowagowa W_r – wysuszony wyrób na powierzchni ziaren materiału adsorbuje wilgoć z powietrza, proces ten ustaje, gdy prężność pary wodnej nad powierzchnią wyrobu zrówna się z prężnością pary wodnej w powietrzu. Wartość W_r zależy od wilgotności względnej powietrza φ , temperatury i rodzaju materiału.

DYFUZJA WODY W SUSZONYM MATERIALE

Podczas suszenia, wskutek parowania wody z powierzchni wystąpi pewna różnica wilgotności powierzchni i wnętrza wyrobu, czyli powstanie tzw. **gradient wilgotności**. Gradient ten jest przyczyną przemieszczania się wody z miejsc o wyższej wilgotności do miejsc o niższej wilgotności.

Matematyczne ujęcie dyfuzji wilgoci:

$$m_d = -k \cdot \rho_0 \cdot \Delta u$$

gdzie:

m_d – masa cieczy przenikającej wewnątrz materiału w jednostce czasu na jednostkę powierzchni,

ρ_0 – gęstość suchego materiału,

k – współczynnik charakteryzujący przemieszczanie się wilgoci wewnątrz materiału pod wpływem różnicy wilgotności w różnych warstwach tego materiału,

Δu – gradient wilgotności,

Współczynnik **k** zależy:

1. od temperatury materiału – im wyższa temperatura tym niższa lepkość wody tym wyższa wartość współczynnika **k**,
2. od sposobu związania wody – wartość współczynnika **k** jest większa dla wody słabiej związanej (woda swobodna),
3. od rozmiaru ziaren – im mniejsze ziarna, tym drobniejsze pory tym mniejsze **k**,

Oprócz gradientu wilgoci występuje również gradient temperatury w wyrobie. Z miejsc o temperaturze wyższej jest transportowana wilgoć do miejsc o temperaturze niższej, zgodnie z kierunkiem strumienia ciepła.

$$m_d = -k \cdot \rho_0 \cdot (\Delta u \pm \sigma \Delta t)$$

PRZYSPIESZANIE PROCESU SUSZENIA

Proces suszenia polega na odparowaniu wody z materiału. Gdy wilgotność materiału jest większa od wilgotności krytycznej W_k woda paruje z powierzchni. Jej ubytek jest kompensowany drogą dyfuzji wilgoci z wnętrza wyrobu. Gdy wilgotność materiału jest mniejsza od W_k wówczas parowanie zachodzi w obrębie porów (kapilar), a para dyfunduje do powierzchni.

Przyspieszanie procesu suszenia:

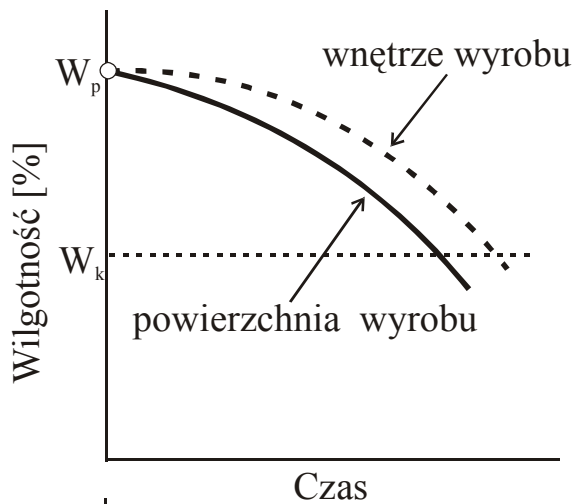
1. zwiększenie oddawania ciepła wyrobom przez medium suszące (zwiększanie różnicy temperatur między gazem i ciałem oraz podwyższanie prędkości przepływu gazu),
2. zwiększenie różnicy pomiędzy prężnością pary wodnej w medium suszącym i nad powierzchnią suszoną (przez obniżenie wilgotności względnej gazu),

Ubytek wilgoci z wyrobu pociąga za sobą kurczenie się wyrobu. Warstwy bliższe powierzchni wyrobu są bardziej suche niż wnętrze. W efekcie w warstwach powierzchniowych powstają naprężenia rozciągające, prowadzące do spękań wyrobu.

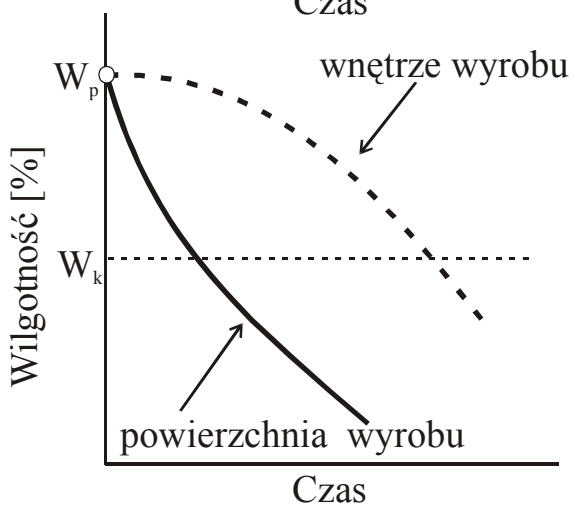
Naprężenia te można zmniejszyć albo przez zmniejszenie odprowadzania prędkości wody z materiału albo przyspieszenie dyfuzji wilgoci z wnętrza wyrobu.

Zastosowanie pierwszego ze sposobów jest nieopłacalne, gdyż wydatnie wydłuża czas suszenia. Zatem zwykle przyspiesza się prędkość dyfuzji wilgoci z wnętrza wyrobu. Współczynnik **k** wzrasta wraz z obniżeniem lepkości wody, lepkość wody silnie maleje wraz z wzrostem temperatury.

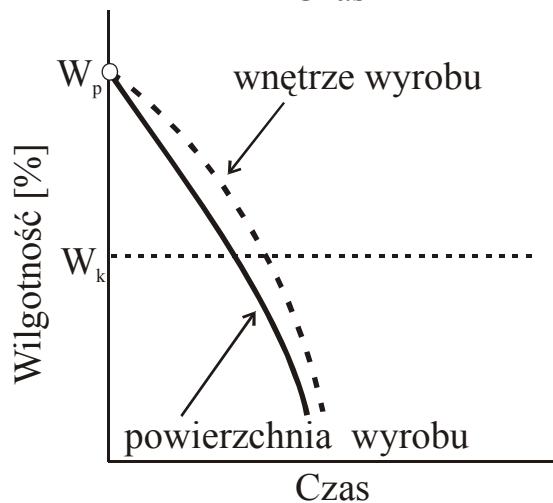
Dlatego zwykle wyroby suszy się w wysokiej temperaturze (80-120°C) tak aby masa była równomiernie ogrzana, przy unikaniu zbyt gwałtownego osuszenia powierzchni, a zatem przy wysokiej wilgotności względnej gazu (70-80%). Gdy nastąpi wyrównanie temperatury w wyrobach, obniża się stopniowo wilgotność gazu, przy zachowaniu wysokiej temperatury.



I. Powietrze o niskiej temperaturze i wysokiej wilgotności względnej



II. Powietrze o niskiej temperaturze i niskiej wilgotności względnej



III. Powietrze o wysokiej temperaturze i wysokiej wilgotności względnej

WŁASNOŚCI CZYNNIKA SUSZĄCEGO

Powietrze łącznie z parą wodną – **powietrze wilgotne**.

Powietrze zawierające w danej temperaturze możliwie największą ilość pary – **powietrze nasycone**, para znajdująca się w takim powietrzu – **para nasycona**.

Jeżeli ilość pary jest mniejsza – **powietrze nienasycone**, para nazywana jest **parą przegrzaną**.

Stosunek wilgotności bezwzględnej do bezwzględnej wilgotności maksymalnej nazywany WILGOTNOŚCIĄ WZGLĘDNĄ φ

$$\varphi = \frac{\gamma_p}{\gamma_{\max}} \cdot 100\% = \left(\frac{p}{p_{p\max}} \right)_T \cdot 100\%$$

WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA POWIETRZA γ_p – masa pary wodnej zawarta w 1m^3 powietrza wilgotnego,

Wszelkie przemiany zachodzą przy stałym ciśnieniu, zaś zawartość wilgotności bezwzględnej zależy od temperatury (objętości). Wielkością charakteryzującą wilgotność niezależną od zmian temperatury jest WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA MASOWA:

$$x = Y = \frac{\text{masa pary wodnej}}{\text{masa powietrza suchego}} = \frac{m_p}{m_g} \quad [\text{kg H}_2\text{O/kg pow.suchego}]$$

$$x = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_{p\max}}{p_b - \varphi \cdot p_{p\max}}$$

gdzie:

p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej,

p_b – ciśnienie panujące w suszarni=ciśnieniu atmosferycznemu,

$p_{p\max}$ – ciśnienie cząstkowe pary w powietrzu nasyconym,

PUNKT ROSY

Przy ochładzaniu powietrza nienasyconego w pewnej ściśle określonej temperaturze można zaobserwować wytrącanie się mgły wodnej powietrza. Temperatura odpowiadająca temu stanowi nosi nazwę **temperatury rosy** lub **punktu rosy**. Ciśnienie cząstkowe pary p_p równa się najwyższemu ciśnieniu $p_{p\max}$, wilgotność bezwzględna γ_p osiąga najwyższą wartość γ_{\max} w danej temperaturze a wilgotność względna $\varphi=100\%$.

WILGOTNOŚĆ WZGLĘDNA POWIETRZA

$$\varphi = \left(\frac{p}{p_{p \max}} \right)_T \quad \text{stad} \quad p = \varphi \cdot p_{p \max} \quad \varphi' = \varphi \cdot 100\%$$

gdzie:

p – ciśnienie cząstkowe pary wodnej,

$p_{p \max}$ – ciśnienie pary wodnej nasyconej w danej temperaturze,

WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA MASOWA

$$x = Y = \frac{\text{masa pary wodnej}}{\text{masa powietrza suchego}} = \frac{m_p}{m_g} = \frac{M_p \varphi p_{p \max}}{M_g (p_b - \varphi p_{p \max})} = 0,662 \frac{\varphi p_{p \max}}{p_b - \varphi p_{p \max}}$$

gdzie:

M_p - masa cząsteczkowa pary wodnej,

M_g - masa cząsteczkowa powietrza suchego,

Zgodnie z prawem Daltona

$$p_b = p_{\text{pow. suchego}} + p \quad \text{zatem} \quad p_{\text{pow. suchego}} = p_b - p$$

Stosunek prężności parcyjnych składników
= stosunkowi ułamków molowych

$$\frac{p}{p_{\text{pow. suchego}}} = \frac{p}{p_b - p} = \frac{y}{y_{\text{pow. suchego}}}$$

$$\frac{p}{p_b - p} = \frac{\varphi p_{p \max}}{p_b - \varphi p_{p \max}} = \frac{\frac{m_p}{M_p}}{\frac{m_g}{M_g}} = \frac{m_p}{M_p} = \frac{m_p}{M_g} = \frac{x(Y)}{\frac{M_p}{M_g}}$$

stad $x(Y)$ można wyrazić następującym wzorem

$$x = Y = \frac{\varphi p_{p \max}}{p_b - \varphi p_{p \max}} \cdot \frac{M_p}{M_g} = 0,662 \frac{\varphi p_{p \max}}{p_b - \varphi p_{p \max}}$$

WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA PROCENTOWA

$$\gamma_p = Z = \frac{x}{x_{\max}} \cdot 100\% = \frac{p_b - p_{p \max}}{p_b - p} \cdot \varphi$$

ENTALPIA WILGOTNEGO POWIETRZA

Entalpię wilgotnego powietrza odnosi się do sumy 1kg powietrza suchego i x kg wilgoci przypadającej na 1kg powietrza suchego.

$$I = i_g + xi_p$$

gdzie:

i_g – entalpia 1kg powietrza suchego [kcal/mol],

i_p – entalpia 1kg pary wodnej [kcal/mol],

x – zawartość wilgoci w [kg/kg]

Dla powietrza suchego i_g wynosi:

$$i_g = c_p \cdot t$$

gdzie:

c_p – ciepło właściwe, w zakresie niskich temperatur $c_p=0,24$ kcal/mol,

t – temperatura powietrza [°C],

Zatem:

$$i_g = 0,24 \cdot t$$

Entalpia pary wodnej w niskich temperaturach:

$$i_p = 595 + 0,47t$$

Zatem entalpia I wynosi:

$$I = 0,24t + 595x + 0,47t \cdot x \text{ [kcal/kg powietrza suchego]}$$

$$1 \text{ [cal]} = 4,187 \text{ [J]}$$

WYKRES I-x (entalpia – zawartość wilgoci) WYKRES RAMZINA – MOLLIERA

Przy znajomości dwu z pięciu wartości można odczytać brakujące dane:

p_p – ciśnienie cząstkowe pary w wilgotnym powietrzu [mmHg],

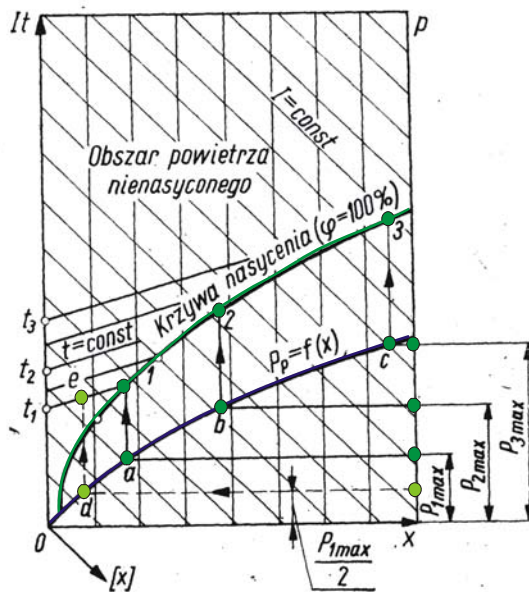
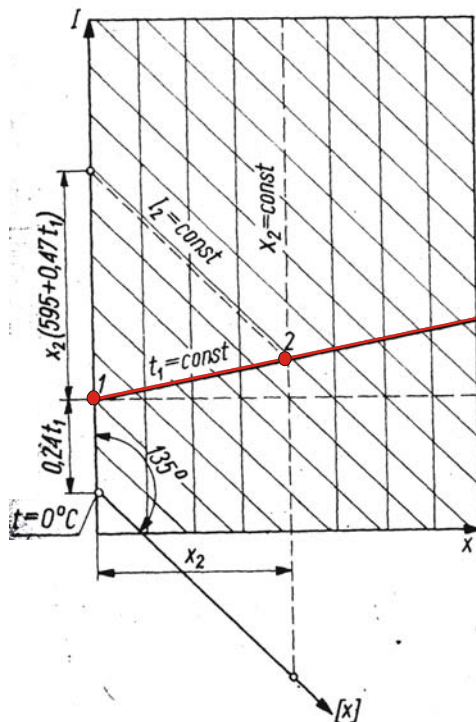
x – zawartość wilgoci w kg na kg suchego powietrza [kg/kg],

t – temperatura [°C],

I – entalpia powietrza [kcal/kg] powietrza suchego,

φ - wilgotność względna [%],

Również z wykresu I-x można odczytać temperaturę punktu rosy **t_r** [°C]



Konstrukcja wykresu I-x:

1. pod kątem 135° narysowanie osi: **x – wilgoci** i **y – entalpii**,
2. wykreślenie linii pionowych **x=const** i linii ukośnych **I=const**,
3. wykreślenie linii izoterm **t=const** zgodnie z równaniem

$$I = 0,24t + 595x + 0,47t \cdot x$$

4. wykreślenie zależności **$p_p=f(x)$** czyli zależności ciśnienia cząstkowego pary od zawartości wilgoci zgodnie ze wzorem

$$x = 0,622 \frac{p_p}{p_b - p_p} \quad p_p = \frac{x \cdot p_b}{0,622 + x}$$

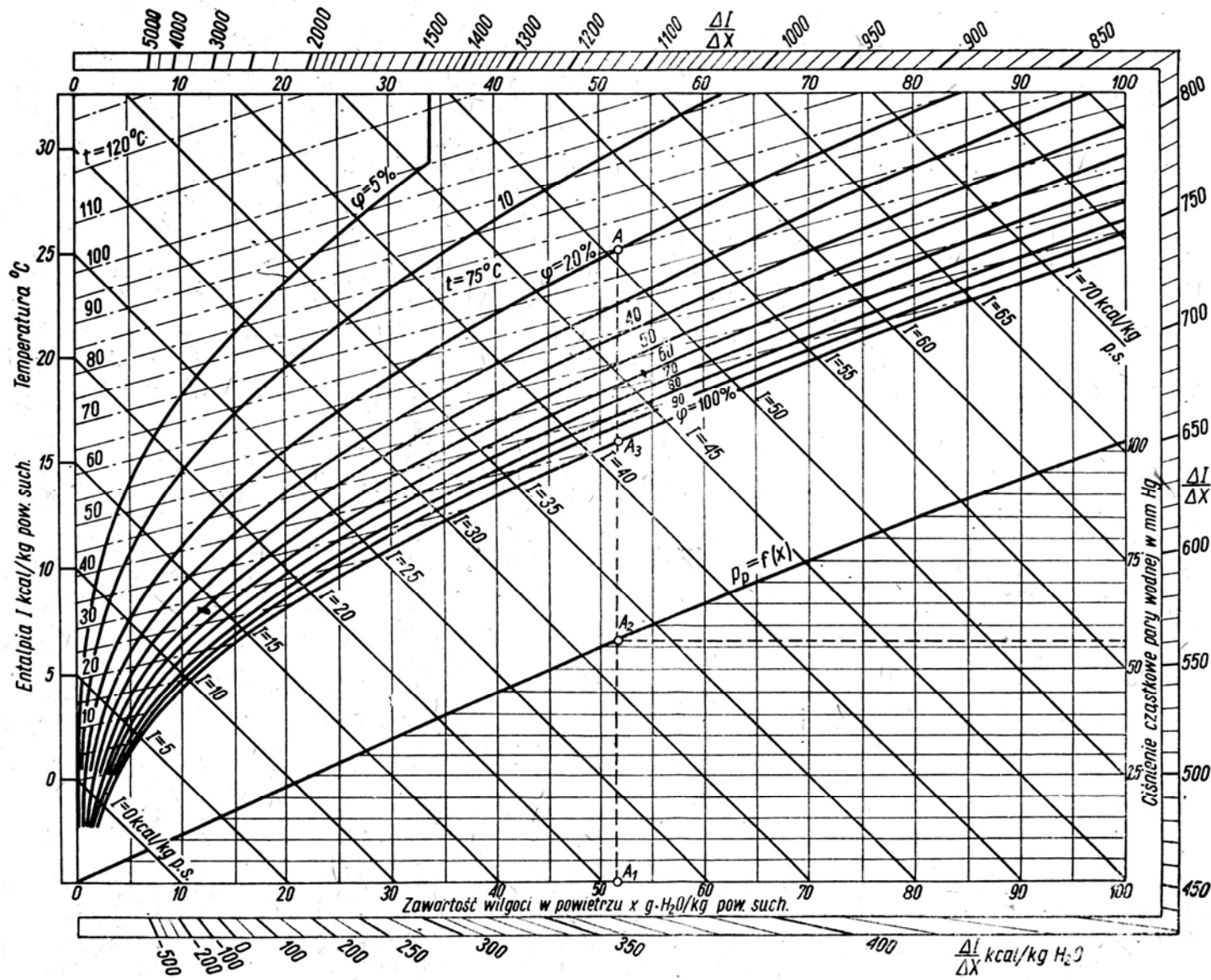
gdzie:

p_b – ciśnienie atmosferyczne,

5. wykreślenie krzywej nasycenia **$\varphi=100\%$** , wartość ciśnienia cząstkowego w powietrzu nasyconym p_{1max} dla danej temperatury odcina się na osi ciśnienia i prowadzi się poziomą linię do przecięcia się z krzywą $p_p=f(x)$, otrzymuje się punkt a, z punktu a prowadzi się pionową linię do odpowiedniej izoterm t_1 , otrzymuje się punkt 1. Podobnie dla innych wartości p_{max} .

6. wykreślenie krzywych **$\varphi=50\%$** itp.,

Krzywa nasycenia dzieli wykres na dwie części: górna odpowiada stanowi powietrza nienasyconego, dolna stanowi powietrza przesyconego (tzw. obszar mgły, w powietrzu rozproszone są kropelki wody)



WYKRES I-x
(WYKRES
RAMZINA-MOLLIERA)

ZADANIA

ZADANIE 1

Posługując się wykresem Ramzina-Molliera (I-x) znaleźć brakujące dane wiedząc, że:

- a) powietrze używane w suszarni ma wilgotność względną 60% i temperaturę 45°C,
- b) entalpia powietrza wynosi 54 kcal/kg powietrza suchego zaś zawartość wilgoci jest równa 65 gH₂O/kg powietrza suchego,
- c) ciśnienie parcjale pary wodnej w powietrzu wynosi 25 mmHg entalpia tego powietrza jest zaś równa 30 kcal/kg powietrza suchego,

ZADANIE 2

Obliczyć wilgotność względną i bezwzględną materiału wiedząc, że masa materiału wilgotnego wynosi 2080g. W materiale zawarte jest 350g wody.

ZADANIE 3

Pod ciśnieniem atmosferycznym w powietrzu o 60% wilgotności względnej ciśnienie parcjale pary wodnej wynosi 30 mmHg. Wyznaczyć zawartość wilgoci w tym powietrzu, ciśnienie parcjale pary nasyconej i ciśnienie parcjale powietrza suchego.