

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

AGH UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY

AGH

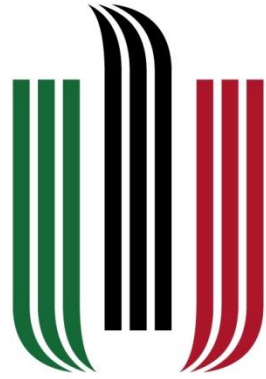
Inżynieria Chemiczna

Transport masy i ciepła

dr hab. inż. Agnieszka Gubernat, prof. AGH

gubernat@agh.edu.pl

p.1.14; budynek B8



AGH

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**AGH UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY**

SUSZENIE

MATERIAŁÓW CERAMICZNYCH

dyfuzyjna operacja jednostkowa

PLAN WYKŁADÓW

1. Wprowadzenie, podstawowe zasady , podstawowe zasady technologii chemicznej, schemat procesowy
2. Termodynamika procesów, energia, ciepło
3. Źródła energii, spalanie i właściwości paliw, niekonwencjonalne źródła energii
4. Termometria, pomiary temperatury,
5. Temperatura, zerowa i trzecia zasada termodynamiki, entropia, termodynamiczna definicja temperatury,
6. Przepływ ciepła, mechanizmy wymiany ciepła, stałe materiałowe
7. Suszenie i suszarnie
8. Płyny, statyka, dynamika, równanie ciągłości strugi, prawo Bernouliego
9. Opory przepływu, filtracja, opadanie cząstek w płynach, sedymentacja,
10. Pomiary prędkości i natężenia przepływu,
11. Homogenizacja zawiesin, ocena jednorodności,
12. Segregacja hydrauliczna, odpylanie i oczyszczanie gazów.
13. Reologia, modele reologiczne, zawiesiny i pasty,
14. Rozdrabnianie ciał stałych, klasyfikacja ziarnowa, metodyka pomiaru rozkładu i wielkości ziaren,

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 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 (aktualnego) pary w otaczającym gazie jak również gradientu ciśnienia cząstkowego pary wodnej w pobliżu powierzchni wyrobu. Powyższe zależności ujmuje **prawo Daltona**:

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

WILGOTNOŚĆ WYROBÓW, MAS I SUROWCÓW

WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA

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

WILGOTNOŚĆ WZGLĘDNA

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

Najczęściej stosowaną fazą rozpraszającą w klasycznych technologiach ceramiki jest WODA.

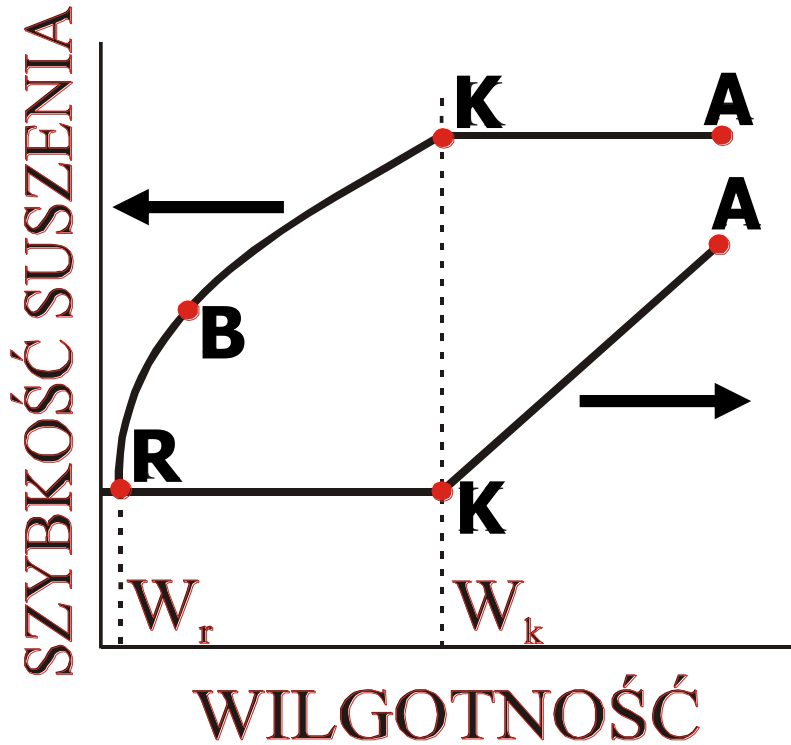
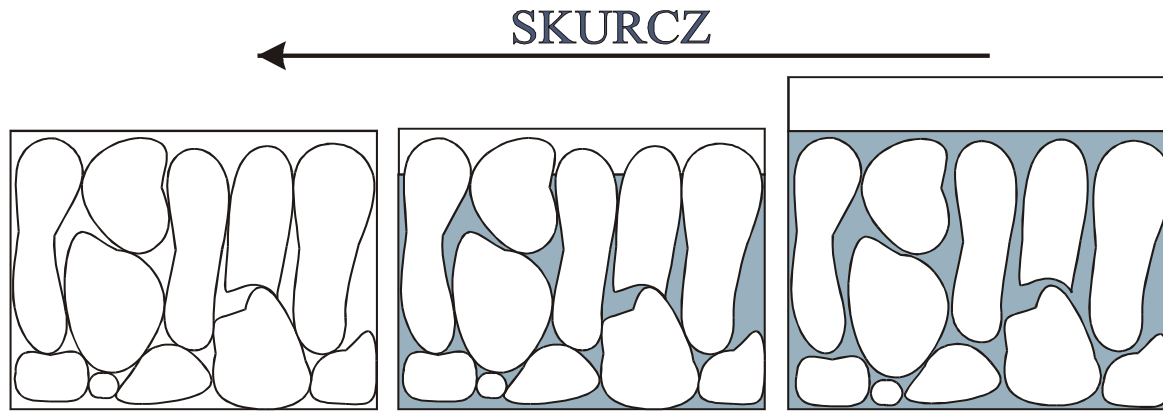
RODZAJE WODY W MATERIAŁACH CERAMICZNYCH

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.

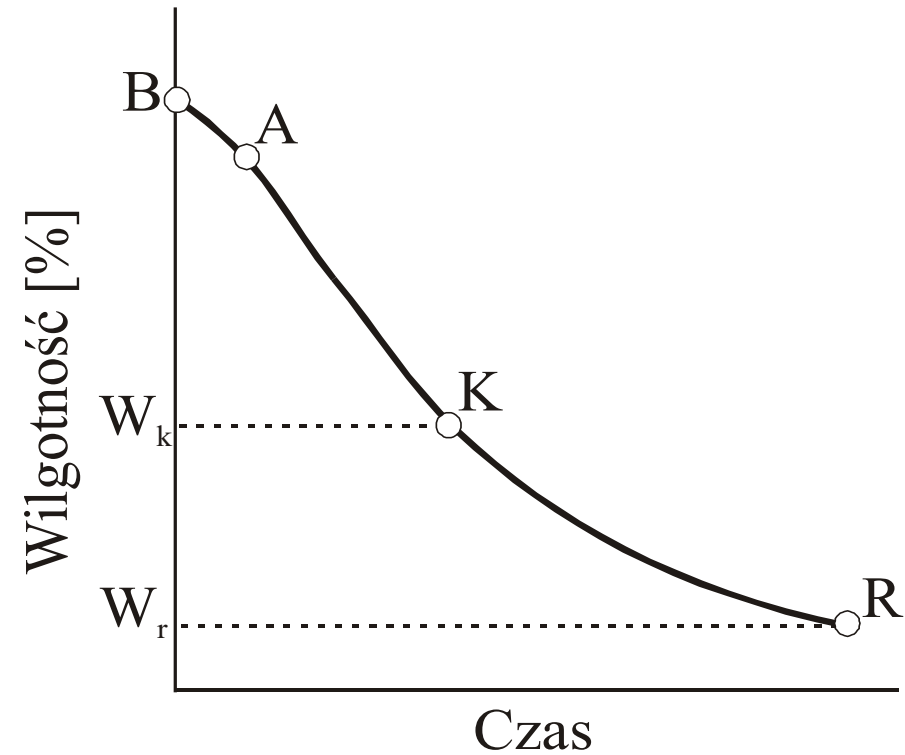
2. Pozostała woda w materiałach:

- **woda swobodna** – oddziela odsunięte od siebie ziarna materiału,
- **woda kapilarna** – wypełnia szczeliny między ziarnami materiału,
- **woda adsorpcyjna** – zaadsorbowana na powierzchni ziaren,
- **woda międzypakietowa** – wchodzi w sposób uporządkowany pomiędzy pakiety minerału np. w montmorylonicie,

PODZIAŁ PROCESU SUSZENIA NA OKRESY



SKURCZLIWOŚĆ



A-K - okres stałej prędkości suszenia,

K-R - okres opadającej prędkości suszenia,



Okres stałej prędkości suszenia – parowanie z powierzchni swobodnej (płaskiej), intensywny skurcz wyrobów,

Okres opadającej prędkości suszenia – parowanie z powierzchni wklęsłej ($p_{p\max}$ mniejsze, gradient p_p mniejszy w pobliżu powierzchni wyrobu), brak skurczu wyrobów,

$$\ln \frac{p_{\max}}{p_{o \max}} = -\frac{\gamma M}{\rho RT} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Wilgotność krytyczna W_k - w momencie jej osiągnięcia ustaje skurcz wyrobów, przestaje w wyrobie istnieć woda swobodna a zawarta jest woda kapilarna i adsorpcyjna,

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.



AGH

DYFUZJA WODY W SUSZONYM MATERIALE

GRADIENT WILGOTNOŚCI

Gradient wilgotności jest przyczyną przemieszczania się wody z miejsc o wyższej wilgotności do miejsc o niższej wilgotności.

Matematyczne ujęcie dyfuzji wilgoci:

$$m_d = -k \cdot \rho_0 \cdot \Delta u \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \quad \text{lub} \quad J = -k \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

Współczynnik **k** zależy:

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

Oprócz gradientu wilgoci występuje również gradient temperatury w wyrobie.

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

KONTROLA 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:

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

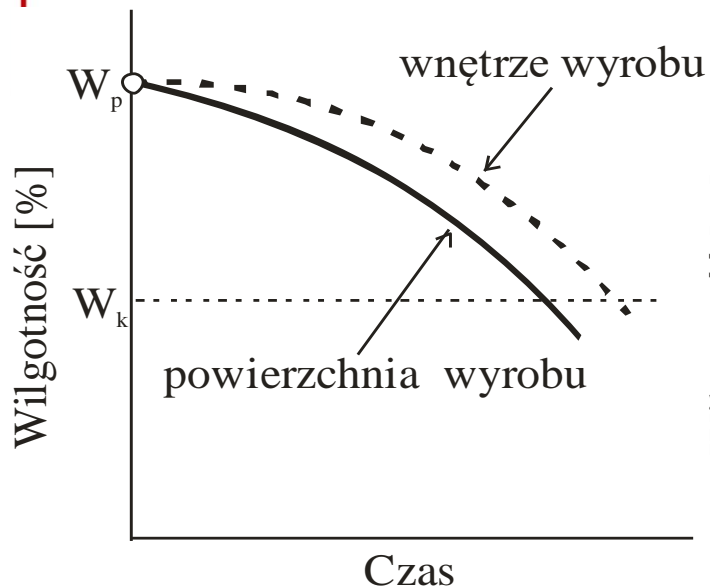
WARIANTY SUSZENIA



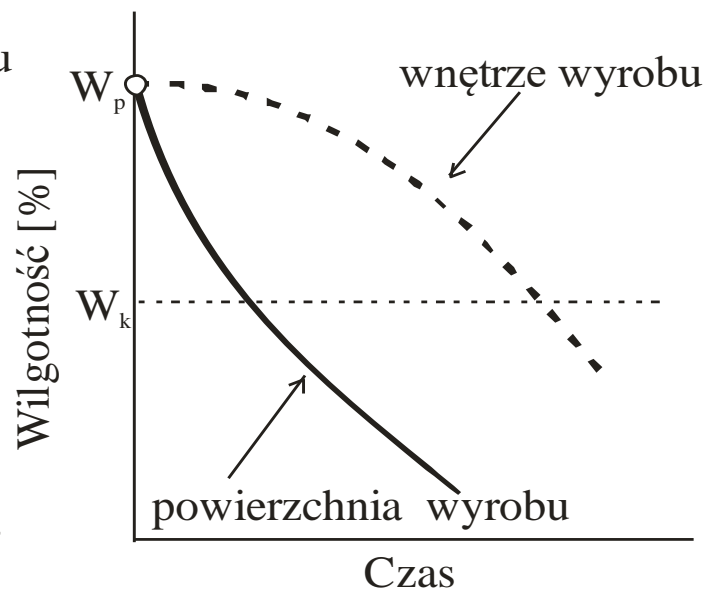
Suszone wyroby kurczą się. Warstwy bliższe powierzchni wyrobu są bardziej suche niż wewnątrz. W efekcie w warstwach powierzchniowych powstają naprężenia rozciągające, prowadzące do spękań wyrobu.

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

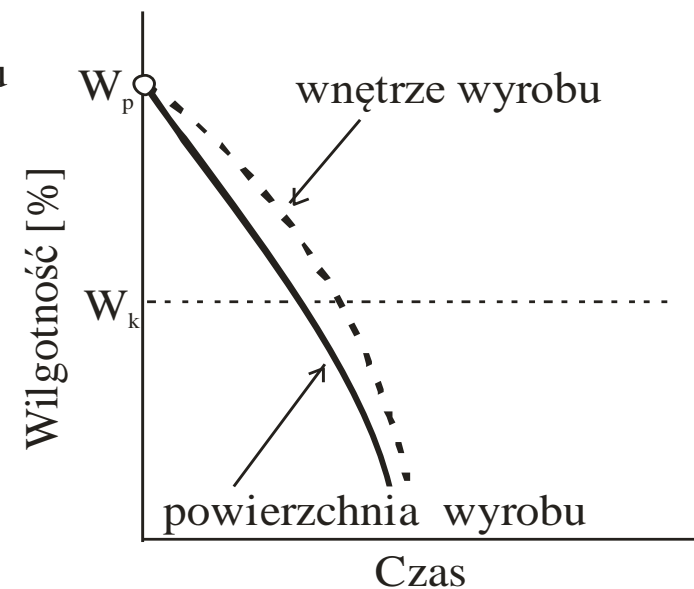
I. Powietrze o niskiej temperaturze i wysokiej wilgotności względnej



II. Powietrze o niskiej temperaturze i niskiej wilgotności względnej



III. Powietrze o wysokiej temperaturze i wysokiej wilgotności względnej



Zastosowanie pierwszego ze sposobów jest nieopłacalne, gdyż wydatnie wydłuża czas suszenia. Zatem zwykle przyspiesza się prędkość dyfuzji wilgoci z wnętrza wyrobu. Wartość współczynnika 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.

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**.

WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA POWIETRZA γ_p

masa pary wodnej zawarta w 1m³ powietrza wilgotnego,

WILGOTNOŚĆ WZGLĘDNA φ

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

WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA MASOWA [kg H₂O/kg pow.suchego]

$$x = Y = \frac{\text{masa pary wodnej}}{\text{masa powietrza suchego}} = \frac{m_p}{m_g}$$

Zgodnie z prawem Daltona $p_b = p_{\text{pow.suchego}} + p$

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

Ze wzoru na wilgotność względną wynika $p = \varphi \cdot p_{p \max}$

Stosunek prężności parcjalnych składników = stosunkowi ułamków molowych

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

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

Zatem wilgotność bezwzględna masowa będzie równa:

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

gdzie:

p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej,

p_b - ciśnienie panujące w suszarni = ciśnieniu atmosferycznemu,

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

WILGOTNOŚĆ BEZWZGLĘDNA PROCENTOWA

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

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_{pmax} , wilgotność bezwzględna γ_p osiąga najwyższą wartość γ_{max} w danej temperaturze a wilgotność względna $\varphi=100\%$.

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 [$^{\circ}\text{C}$],

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

Entalpia pary wodnej w niskich temperaturach:

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

Zatem entalpia I wynosi:

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

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

WYKRES I (entalpia) – x (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 (wilgotność bezwzględna masowa w kg na kg suchego powietrza [kg/kg],

t - temperatura [°C],

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

φ - wilgotność względna [%],

Oraz dodatkowo:

t_r - temperaturę punktu rosy [°C],

1. pod kątem 135° narysowanie osi: x - wilgoci i y - entalpii,
2. wykreślnie linii pionowych $x=\text{const}$ i linii ukośnych $I=\text{const}$,
3. wykreślenie linii izoterm $t=\text{const}$ 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

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

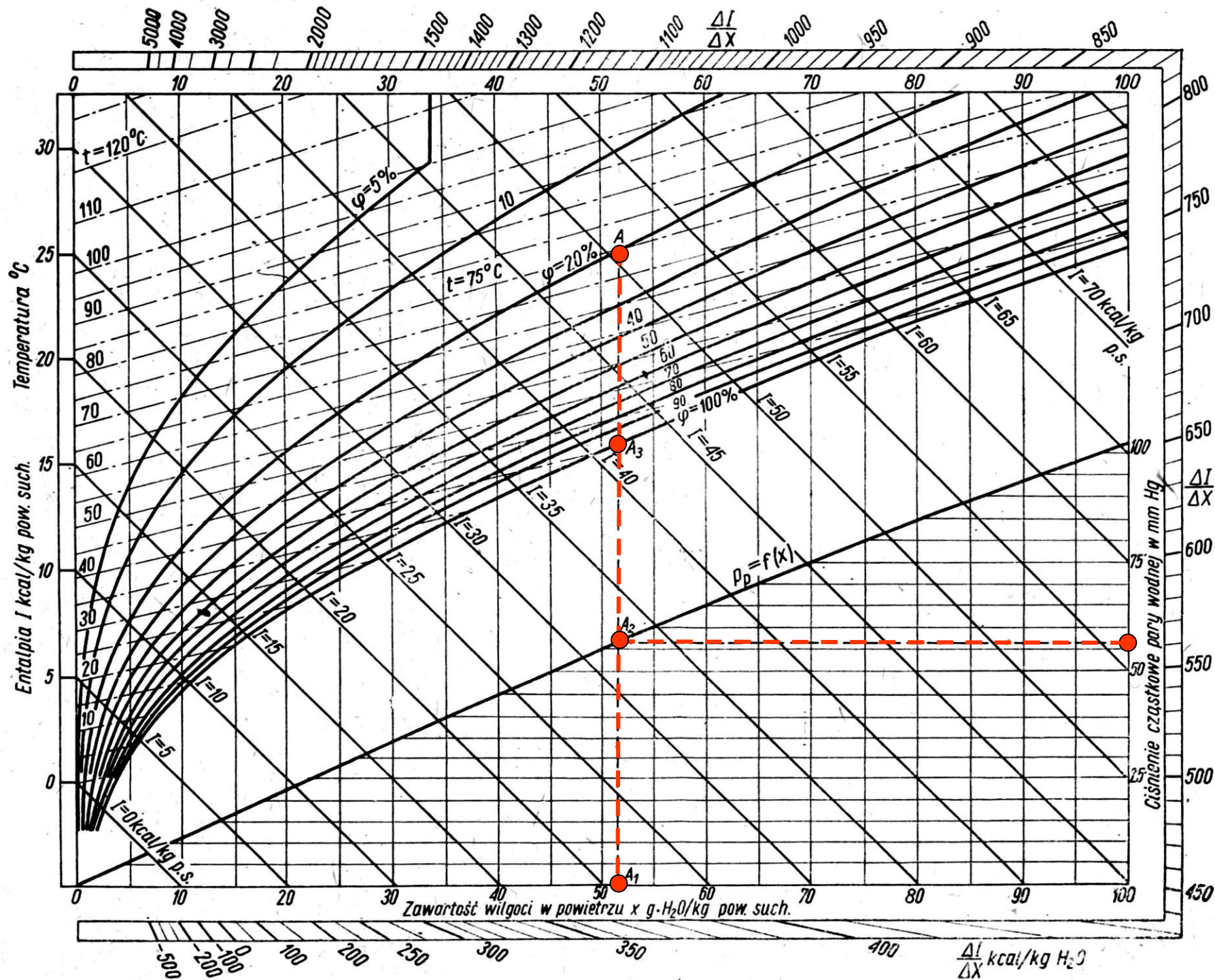
5. wykreślenie krzywej nasycenia $\varphi=100\%$, wartość ciśnienia cząstkowego w powietrzu nasyconym $p_{1\text{max}}$ dla danej temperatury odcina się na osi ciśnienia i prowadzi się poziomą linię do przecięcia się z krzywą $p_p=f(x)$, otrzymuje się punkt a, z punktu a prowadzi się pionową linię do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

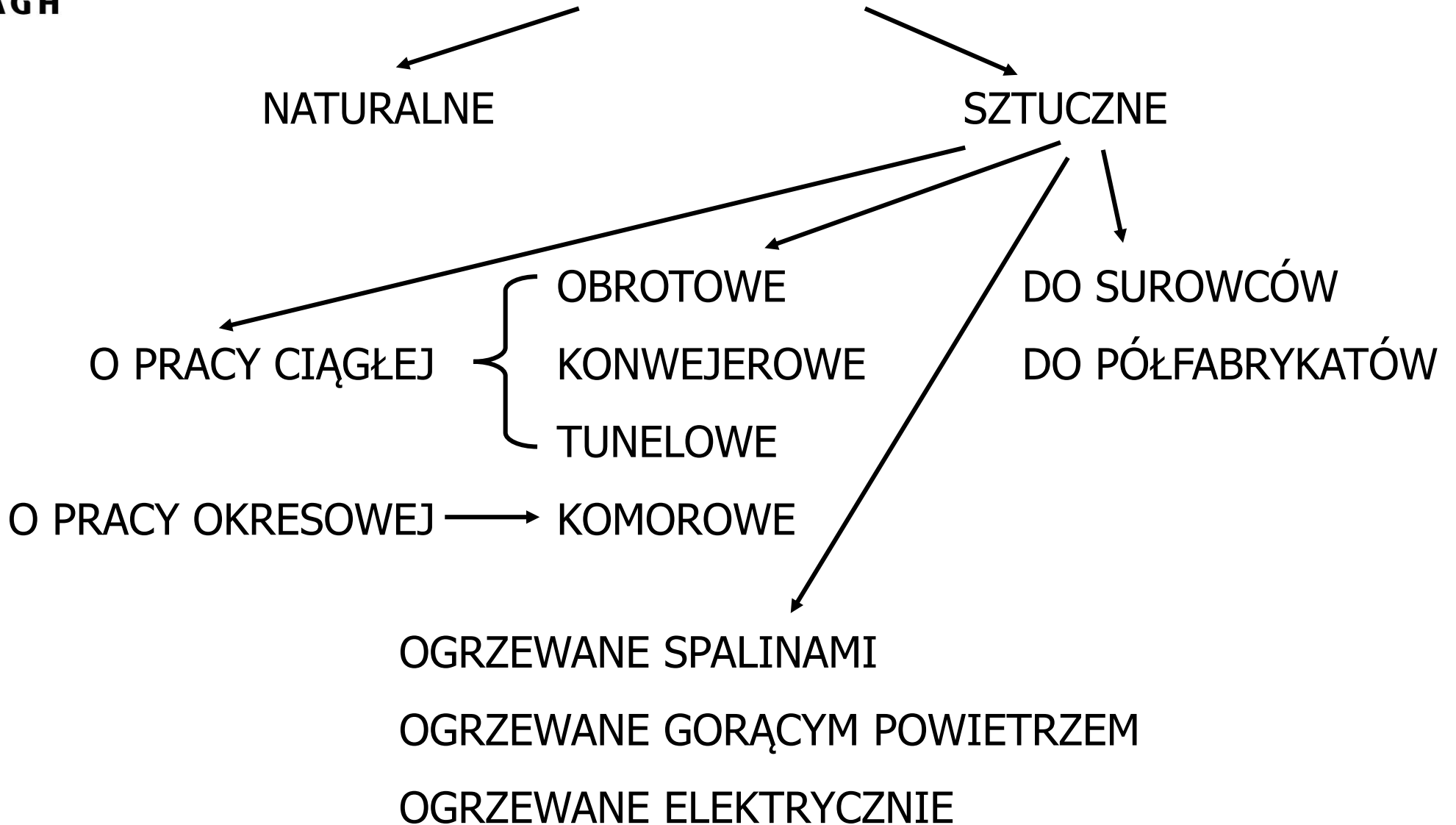
górna odpowiada stanowi powietrza nienasyconego,

dolna stanowi powietrza przesyconego (tzw. obszar mgły, w powietrzu rozproszone są kropelki wody).



1. Parametry wyjściowe:
 $t=75^{\circ}\text{C}$
 $\phi=20\%$
2. $x=51-52$
 $\text{gH}_2\text{O/kg}$
pow. suchego
3. $P_p=56$ mmHg
4. $I=52$ kcal/kg
pow. suchego
5. $t_r=41-42^{\circ}\text{C}$

KLASYFIKACJA SUSZARNII



SUSZARNIE NATURALNE

rzadko stosowane, głównie w manufakturze ceramicznej
proces suszenia bardzo długi

SUSZARNIE PÓŁSZTUCZNE

hale produkcyjne, wyroby stawia się w sąsiedztwie reaktorów grzejnych. Temperatura nie przekracza 35 °C, wilgotność względna jest zwykle duża. Suszenie zachodzi zwykle powoli.



SUSZARNIE SZTUCZNE KOMOROWE

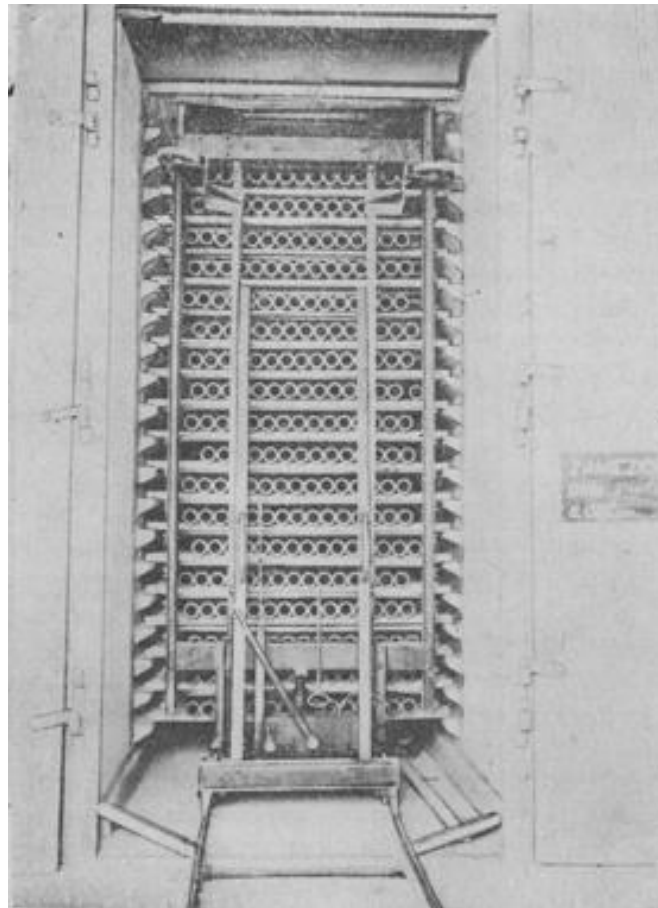
pracują w sposób okresowy, są to zamknięte przestrzenie, więc można w nich regulować warunki suszenia wg założonych warunków technologicznych. Mogą być zasilane gorącym powietrzem, spalinami, mogą mieć grzejniki parowe i wodne.



SUSZARNIE SZTUCZNE KOMOROWE

typu Kellera, *typu Dannenberga* – suszarnia cyrkulacyjna,
typu Szemetyły – suszarnia recyrkulacyjna – wymuszony przepływ
medium suszącego,

W tym przypadku medium suszące jest w ruchu a wyroby w
spoczynku.





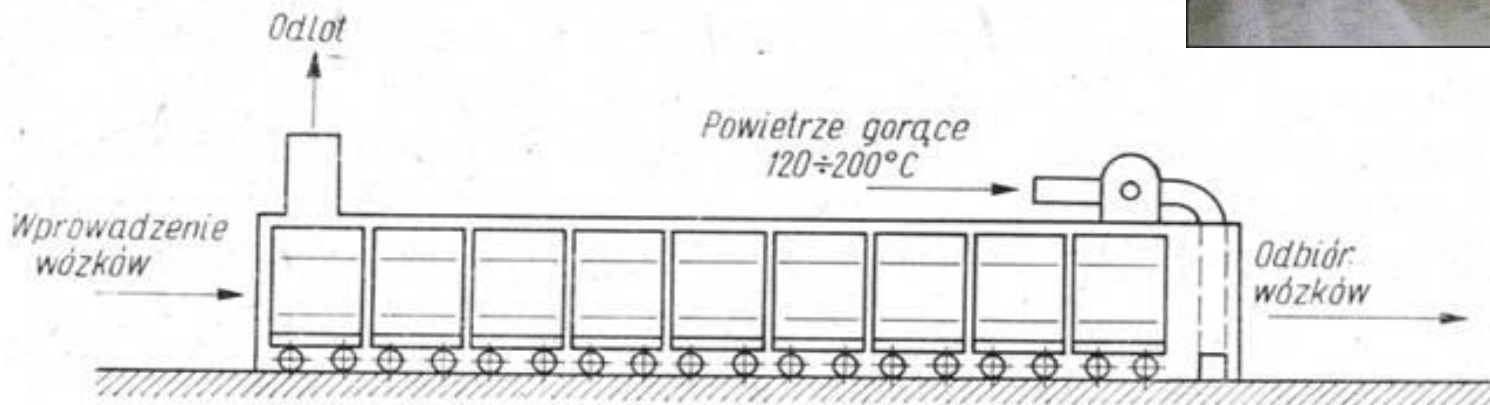
AGH

SUSZARNIE O PRACY CIĄGŁEJ - TUNELOWE

W suszarni tunelowej materiał suszony ułożony jest na wózkach i w czasie cyklu suszenia stopniowo przesuwa się przez suszarnię. Wyroby przechodzą odpowiednio strefę wilgotnego powietrza, prawie bez utraty wody, w dalszej części, w miarę podwyższenia temperatury powietrza, następuje powiększanie ilości oddawanej wody.

W ten sposób zachodzi „samoregulacja” procesu suszenia, charakterystyczna dla suszarni przeciwprądowych.

Suszarnie o bardzo szerokim zastosowaniu.



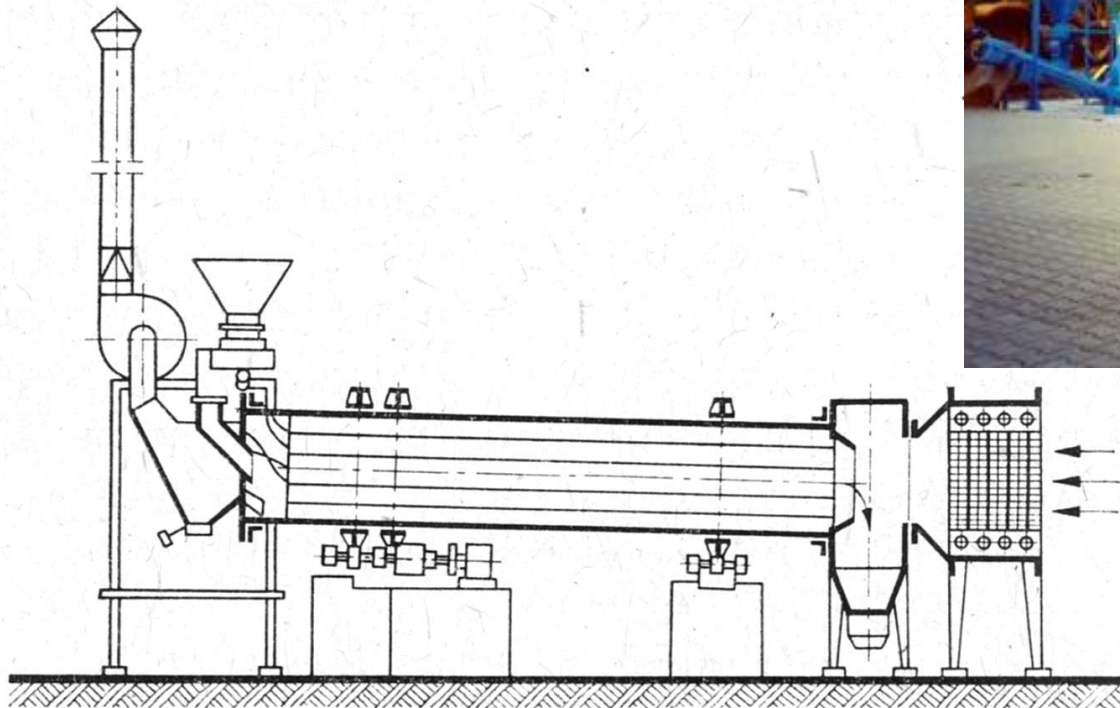
SUSZARNIE O PRACY CIĄGŁEJ - KONWEJEROWE

Zwane łańcuchowymi, szafkowymi lub szalkowymi. Suszenie półfabrykatów w ceramice szlachetnej, budowlanej, rur kamionkowych. Skonstruowane są jako komory, w których wędrują dwa równoległe łańcuchy bez końca, do łańcuchów tych podwieszają się półki, na których unoszone są wyroby.



SUSZARNIE O PRACY CIĄGŁEJ - BĘBNOWE

Przeznaczone do suszenia wyrobów sypkich (piasek, glina, wapień, kreda), mogą działać współprądowo i przeciwprądowo. W celu wywołania mieszania wsadu i zwiększenia powierzchni jego kontaktu z gazami suszącymi, w bębnie ($d=1-3m$) znajdują się różnego typu półki i przegrody.



SUSZARNIE ROZPYŁOWE

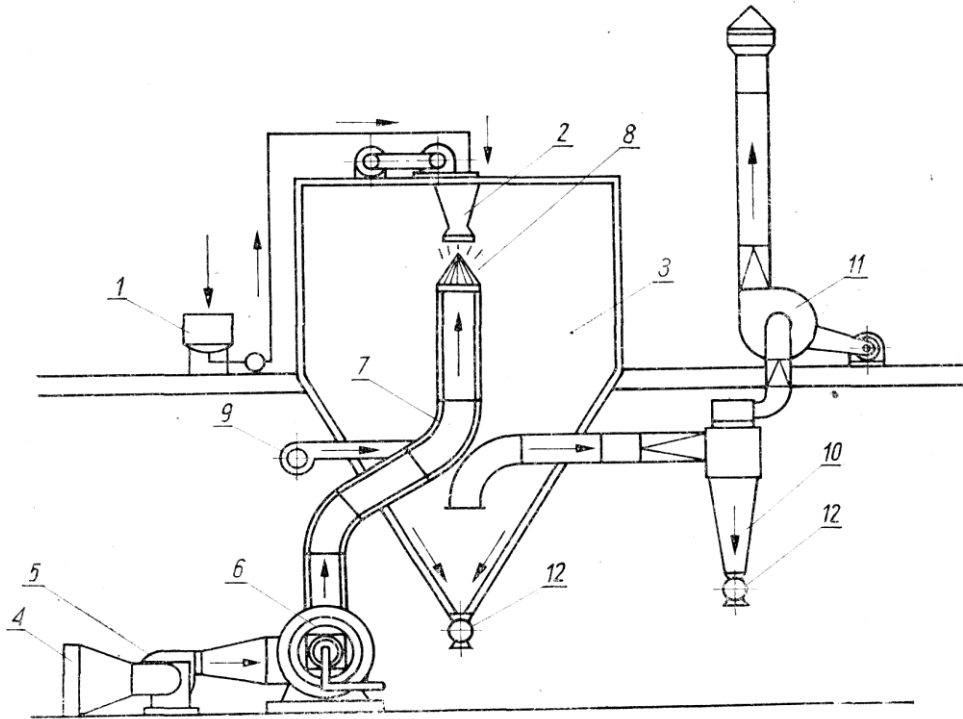
Przeznaczone są do granulowania mas ceramicznych, służących do formowania wyrobów np. płytek ceramicznych. Zapewniają, przy dobrze dobranych parametrach suszenia stałość wielkości granul, oraz stałość ich wilgotności i temperatury.

Rozpylana gęstwa powinna mieć jak najmniejszą wilgotność, wtedy wydajność suszarni jest duża, zwykle gęstwa jest sztucznie upłynniana. Rozpylanie gęstwy odbywa się za pomocą:

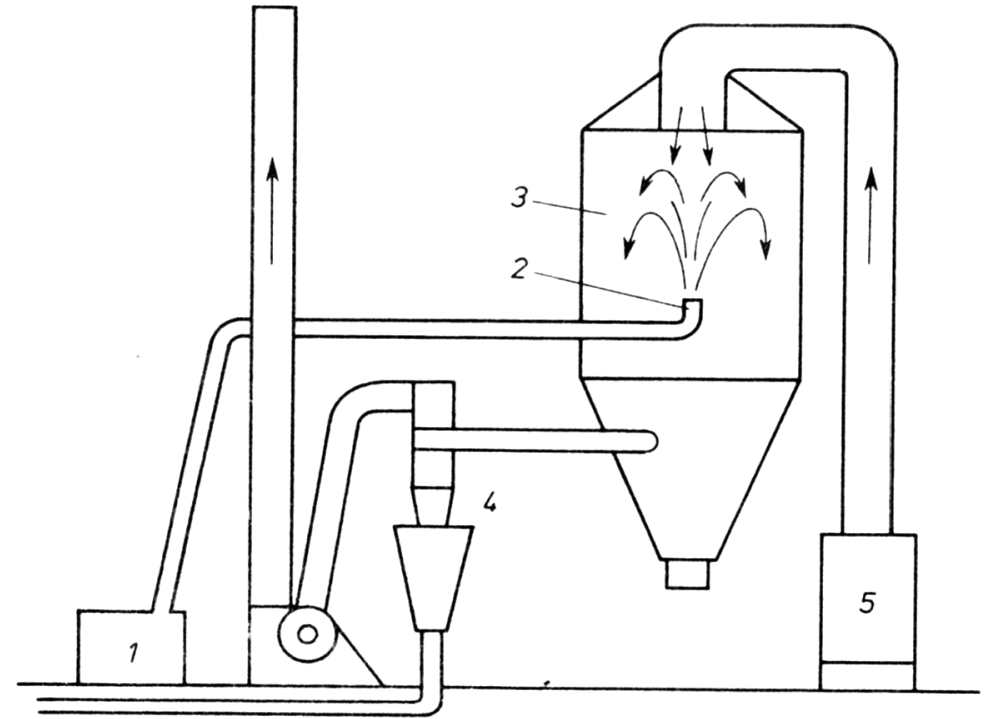
- 1) Rozpylacza dyskowego (wirujące talerze)
- 2) Rozpylacza dyszowego (ciśnieniowego)
- 3) Rozpylacza pneumatycznego (dwustrumieniowego)
- 4) Rozpylacza odśrodkowego
- 5) Rozpylacza ultradźwiękowego

Rozpylona na krople gęstwa wpada w strumień medium suszącego o bardzo wysokiej temperaturze (~ 550 °C), tam krople są suszone i opadają do zbiornika. Uzyskuje się granulaty o średnicach od 50-300 μm .

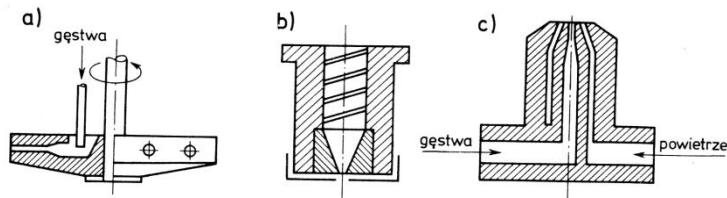
SUSZARNIE ROZPYŁOWE



Rys. 8-22. Schemat suszarni rozpyłowej z rozpylaczem odśrodkowym
 1 – zbiornik masy, 2 – rozpylacz odśrodkowy, 3 – komora, 4 – wlot powietrza
 5 – wentylator ssący, 6 – urządzenie grzewcze, 7 – przewód gorącego powietrza, 8 – rozdzielacz powietrza, 9 – wentylator cyrkulacyjny, 10 – cyklon
 11 – wentylator wyciągowy, 12 – zawory

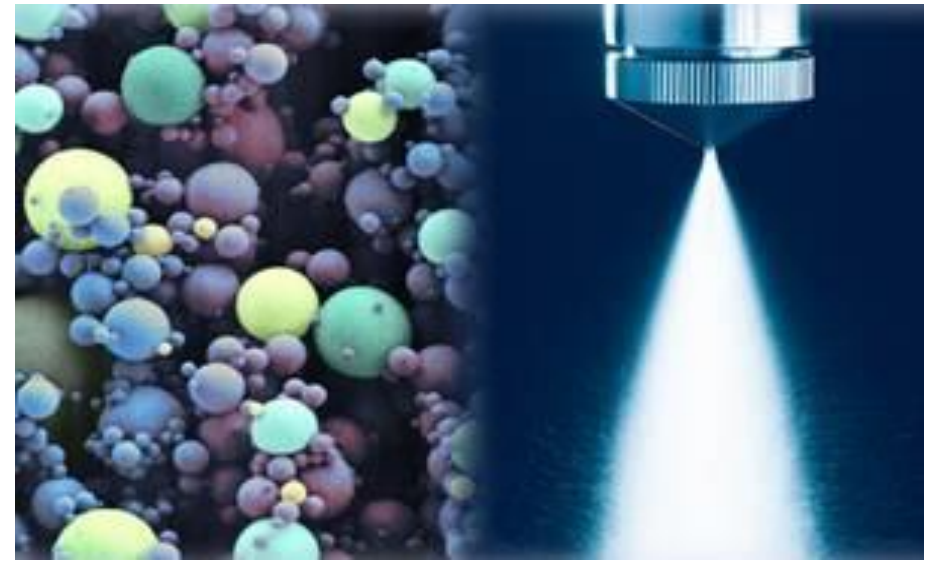


Rys. 4.4. Schemat suszarni rozpyłowej z rozpylaczem dyszowym; 1 – urządzenie zasilające (pompa), 2 – dysza, 3 – komora suszarni, 4 – cyklon, 5 – podgrzewacz powietrza

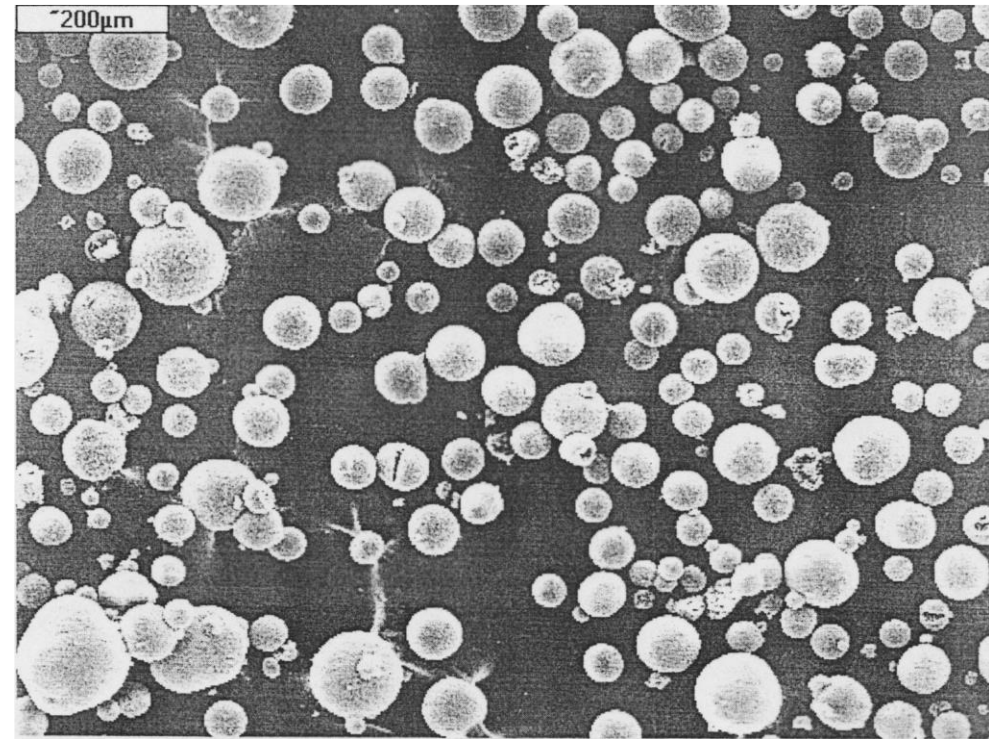
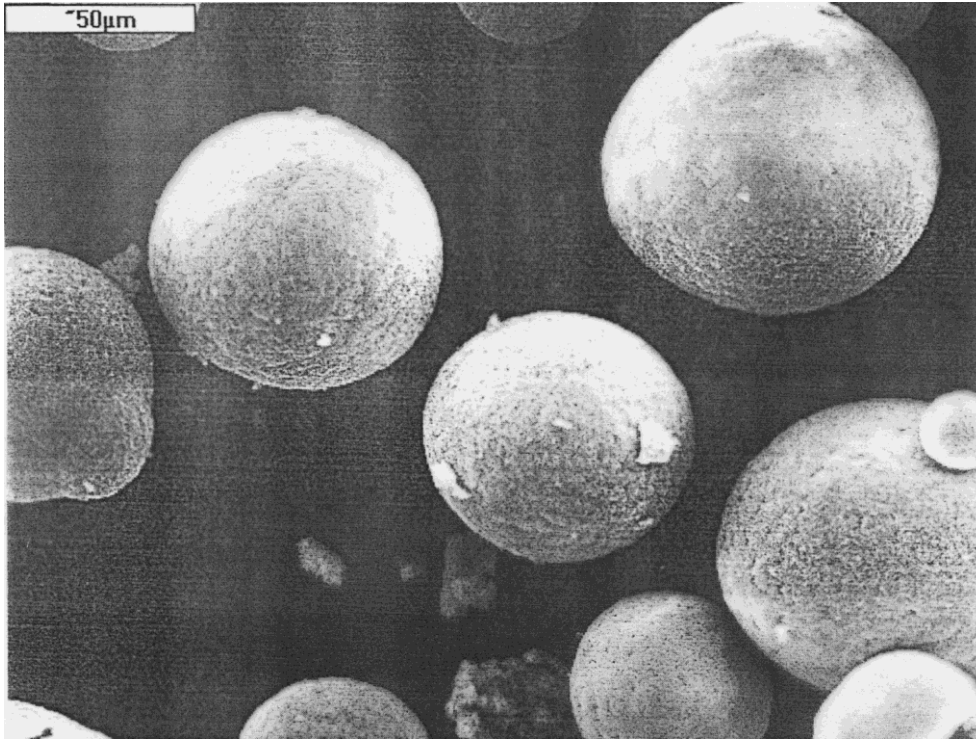


Rys. 4.5. Rozpylacze gęstwy: a) rozpylacz dyskowy (wirująca tarcza), b) rozpylacz dyszowy (ciśnieniowy), c) rozpylacz pneumatyczny (dwustrumieniowy)

SUSZARNIE ROZPYŁOWE



SUSZARNIA ROZPYŁOWA - GRANULAT



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!



ourselves in
the dryer for
10 minutes and
come out
wrinkle free...