

BADANIE PROCESU SUSZENIA GRANULATU W SUSZARCE TAŚMOWEJ

Wojciech Korpul, Edward Sobczak, Wojciech Weiner

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej

Synopsis: W pracy przedstawiono wyniki badań suszenia zgranulowanego pyłu w suszarce taśmowej własnej konstrukcji w prostokątnym strumieniu powietrza. Opracowano model matematyczny procesu suszenia. Otrzymano równania opisujące kinetykę suszenia materiału i nawilżania się powietrza suszącego. Do opisu procesu użyto zmodyfikowaną wartość siły napędowej. Dla wykonanych doświadczeń obliczono współczynnik kinetyczny k oraz współczynnik równowagowy m .

Słowa kluczowe: modelowanie procesu suszenia, kinetyka suszenia, suszarka taśmowa.

Wprowadzenie

Granulat otrzymywany metodą bezcisnieniową np. w granulatorze talerzowym zawiera najczęściej po procesie znaczną ilość wilgoci, którą trzeba następnie usunąć. Proces suszenia można realizować w różnych urządzeniach suszarniczych, zależnych głównie od rodzaju materiału poddawanego suszeniu.

Najefektywniej materiały ziarniste suszy się konwekcyjnie w złożu fluidalnym [1] i w złożu fontannowym [2]. Materiały ziarniste najczęściej suszy się w suszarkach z nieruchomą warstwą materiału [3, 4].

Dla produktów o stosunkowo małej wytrzymałości mechanicznej w stanie wilgotnym z dużym powodzeniem można stosować suszarki taśmowe.

Proces suszenia cząstek materiałów porowatych polega na dyfuzji wilgoci przez

materiały porowate z jego wnętrza do powierzchni oraz pary wodnej od powierzchni przez laminarną warstwę gazową do strumienia gazu. Gdy opór dyfuzji wilgoci przez materiał suszony jest mały w porównaniu z oporem dyfuzji przez laminarną warstwę gazu mamy do czynienia z pierwszym okresem suszenia.

W przypadku gdy opór dyfuzji poprzez materiał suszony jest bardzo duży w porównaniu z oporem warstwy gazowej mamy do czynienia z drugim okresem suszenia [5]. Najczęściej oba opory dyfuzyjne są ze sobą porównywalne i żadnego nie można pominąć. W tym przypadku analogicznie do procesu wymiany ciepła proponuje się opisanie kinetyki dyfuzji za pomocą współczynnika wnikania masy k zawierającego w sobie oba opory dyfuzji.

$$\frac{dm_{H_2O}}{d\tau} = k(Y^* - Y)F \quad (1)$$

Siłą napędową procesu suszenia jest wówczas różnica wilgotności na granicy faz Y^* i w strumieniu Y [kg H_2O /kg powietrza].

Przyjęto, że hipotetyczna wilgotność powietrza na granicy faz ciała stałe - gaz:

$$Y^* = \frac{M_{H_2O}}{M_{pow.}} \frac{P_{H_2O}}{P - p_{H_2O}} \quad (2)$$

jest funkcją prężności pary wodnej przy powierzchni materiału. Postuluje się, że prężność pary wodnej nad wilgotnym materiałem jest proporcjonalna do ułamka masowego wilgoci w materiale i prężności wody $p_{H_2O}^*$

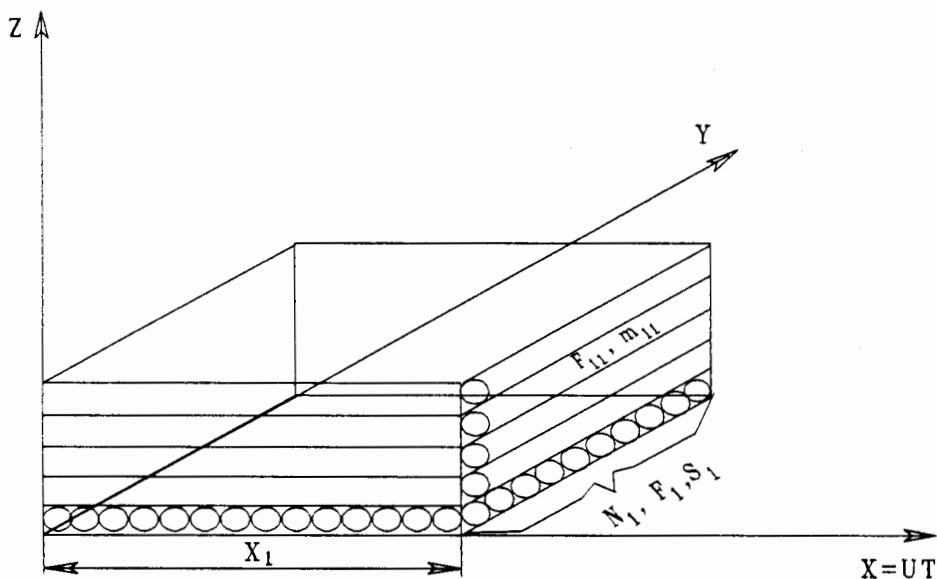
Stężenie pary wodnej Y^* na granicy faz jest proporcjonalne do zawartości wody $X = \frac{m_{H_2O}}{s}$ przypadającej na jednostkę masy suchego ciała stałego.

$$Y^* = \frac{M_{H_2O}}{M_{pow.}} \frac{mP_{H_2O}^* \frac{X}{1+X}}{P - mP_{H_2O}^* \frac{X}{1+X}} \quad (3)$$

lub

$$Y^* \approx 0,625mX \frac{P_{H_2O}}{P} \quad (4)$$

Dla materiału suszonego umieszczonego na taśmie w strumieniu gorącego powietrza przepływającego prostopadle do kierunku przesuwania się taśmy został sporządzony bilans różniczkowy dla pionowego wycinka granulatu na taśmie o grubości równej średnicy granulki d (rys. 1).



Rys.1 Schemat ułożenia suszonego granulatu na taśmie poruszającej się z prędkością liniową u w kierunku $\vec{x} = \vec{u}\tau$.

F_{11} , m_{11} - powierzchnia i masa warstwy granulek o grubości $\Delta_x = d$ leżących w płaszczyźnie pionowej y - z przechodzącej przez punkt $x = x_1$.

N_1 , F_1 , S_1 - ilość sztuk, powierzchnia i sucha masa granulek leżących na taśmie wzdłuż jej szerokości (wzdłuż osi y).

Fig.1 Scheme of dried granulate layer on the band travelling at linear velocity (u) in direction $\vec{x} = \vec{u}\tau$.

F_{11} , m_{11} - surface and mass of granulate layer at thickness $\Delta_x = d$ lying in vertical plane y - z crossing the point $x = x_1$.

N_1 , F_1 , S_1 - number, surface and dry matter of granules lying on the band along its width (along y -axis).

Uwzględniając masę (N_1 granulek) suchego materiału znajdującą się w najniższej warstwie analizowanego wycinka jako

$$S_1 = \frac{\pi d^3}{6} \times \rho_s \times N_1 = \frac{\pi d^3}{6} \times \rho_s \times \frac{b}{d} \quad (5)$$

oraz jego powierzchnię zewnętrzną przez

$$F_1 = \pi d^2 \times N_1 = \pi db \quad (6)$$

i powierzchnię zewnętrzną wszystkich granulek w tym wycinku o masie m_{11} jako

$$F_{11} = \frac{6}{d} \times \frac{m_{11}}{\rho_s(1+X_0)} = \frac{6}{d} \times \frac{m^* \tau_c}{\rho_s(1+X_0)} \times \frac{d}{l_c} \quad (7)$$

otrzymano równania szybkości suszenia materiału w analizowanym wycinku:

$$-S_1 \frac{dX}{d\tau} = k(Y^* - Y) F_1 \quad (8)$$

oraz

$$W_1 dY = k(Y^* - Y) dF_{11} \quad (9)$$

gdzie - W_1 jest strumieniem masowym przepływającego powietrza przez materiał w analizowanym wycinku:

$$W_1 = V^* \frac{d}{l_c} \rho_{pow.} \quad (10)$$

- V^* jest strumieniem objętościowym przepływającego powietrza o gęstości $\rho_{pow.}$ prostopadle do taśmy o długości l_c

- m^* strumień masowy materiału o wilgotności X_0 wprowadzanego do suszarki

- τ_c całkowity czas przebywania materiału w suszarce

Zauważmy, że różniczkowy czas przebywania jest równy:

$$d\tau = \tau_c \frac{dl}{l_c} \quad (11)$$

Wprowadzając zależności (5-8, 11) do równań (9) i (10) otrzymamy po scałkowaniu w wąskim przedziale zmiennych X-Y następujące zależności:

$$\frac{(1-m \frac{P_{H_2O}}{P}) X_2 - \frac{Y_0}{Y_0^* - Y_0}}{(1-m \frac{P_{H_2O}}{P}) X_1 - \frac{Y_0}{Y_0^* - Y_0}} = \exp\left[-(1-m \frac{P_{H_2O}}{P})(\Delta X \frac{Y^* - Y_0}{Y_0^*}) + \frac{6k\Delta l \tau_c}{l_c \rho_s d} \frac{1}{Y_0^*}\right] \quad (12)$$

$$\frac{Y_1^* - Y_{n1}}{Y_1^* - Y_1} = \exp\left[-\frac{6km^* \tau_c}{\rho_s \rho_{pow} d V^*} \frac{1}{1+X_0}\right] \quad (13)$$

gdzie: X_1, Y_1 - wilgotność materiału i powietrza pod złożem w punkcie $x=x_1$
 X_{n1}, Y_{n1} - wilgotność materiału i powietrza nad złożem w punkcie $x=x_1$
 P - ciśnienie barometryczne

oraz

$$Y_0^* = \frac{M_{H_2O}}{M_{pow.}} \frac{mP_{H_2O}^* \frac{X_{12}}{1+X_{12}}}{P - mP_{H_2O}^* \frac{X_{12}}{1+X_{12}}} \quad (14)$$

$$Y_1^* = \frac{M_{H_2O}}{M_{pow.}} \frac{m\bar{P}_{H_2O}^* \frac{\bar{X}_1}{1+X_1}}{P - m\bar{P}_{H_2O}^* \frac{\bar{X}_1}{1+X_1}} \quad (15)$$

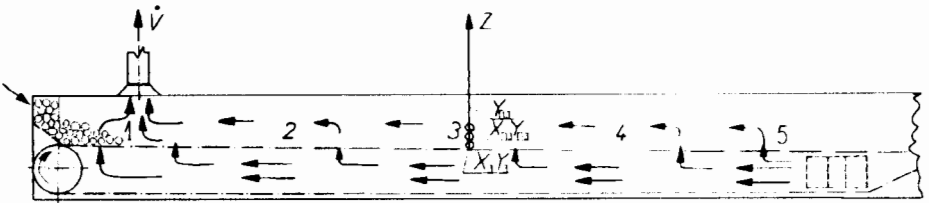
$P_{H_2O}^* = P_{H_2O}^*(t=t_0)$ - prężność pary wodnej nasyconej w temperaturze powietrza wlotowego do pierwszej warstwy materiału na taśmie.

$\bar{P}_{H_2O}^* = P_{H_2O}^*(t = \frac{t_1 + t_{n1}}{2})$ - prężność pary wodnej nasyconej w temperaturze średniej pionowego przekroju kul w pkt. $x=x_1$ (w średniej arytmetycznej temperaturze powietrza pod warstwą $t_1=t_0$ i nad warstwą kul t_{n1}).

$X_{12} = 0,5(X_1 + X_2)$ - średnia wilgotność kul ułożonych w pierwszej warstwie na taśmie (w płaszczyźnie x-y) - (rys.1).

- $\bar{X}_1 = 0,5(X_i + X_{n1})$ - średnia wilgotność kul w przekroju pionowym przechodzącym przez pkt. $x = x_1$
- $\Delta X = (X_2 - X_1)$ - spadek wilgotności kul znajdujących się w pierwszej warstwie na taśmie po przebyciu drogi $\Delta l = l_2 - l_1 = u\tau$

Układ równań (12) i (13) opisuje kinetykę suszenia materiału wzdłuż drogi przesuwania się taśmy od punktów $x = x_1$ do $x = x_2$ oraz w kierunku prostopadłym do taśmy czyli wzdłuż grubości warstwy materiału i pozwala na wyznaczenie współczynnika wnikania masy k i współczynnika m określającego zależność wównowagową wilgoci na granicy faz.



Rys.2 Schemat aparatury doświadczalnej

1, 2, 3, 4, 5 - punkty pomiarowe

X_3, Y_3 - wilgotność granulatu i powietrza suszającego w punkcie 3 na dnie warstwy

X_{n3}, Y_{n3} - wilgotność granulatu i powietrza suszającego w punkcie 3 na powierzchni warstwy

V - strumień objętościowy powietrza opuszczającego suszarkę

Fig.2 Scheme of experimental stand.

1, 2, 3, 4, 5 - measurement points.

X_3, Y_3 - moisture content of granules and humidity of drying air at the bottom of layer, point 3.

X_{n3}, Y_{n3} - moisture content of granules and humidity of drying air at layer top, point 3.

V - volumetric air stream at outlet of drier.

Tabela 1

Wyniki pomiarów kinetyki suszenia granulatu

Table 1

Measurement results of granules drying kinetics.

Wielkość mierzona	Nr punktu pomiarowego				
	1	2	3	4	5
l [m]	0.45	1.40	2.35	3.30	4.25
t_c [min]	91				
X [kg H ₂ O/kg s.m.]	0.790	0.764	0.736	0.712	0.690
X_n [kg H ₂ O/kg s.m.]	0.790	0.779	0.771	0.760	0.750
t_n [°C]	45.0	45.6	46.0	46.5	47.0
θ_n [%]	48.5	47.4	45.1	42.1	40.5
t_c [min]	12.5				
X [kg H ₂ O/kg s.m.]	0.790	0.784	0.779	0.774	0.768
t_n [°C]	87.0	87.3	87.5	87.8	88.0
θ_n [%]	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2

Aparatura doświadczalna i metodyka pomiarów.

Aparatura doświadczalna (rys. 2) do suszenia materiałów ziarnistych składała się z suszarki taśmowej o długości $l_c = 6,2$ m, dmuchawy powietrza o wydajności $V = 0,14$ m³/s oraz grzejnika powietrza o mocy 12 kW. Szybkość przesuwu taśmy była zmieniana w zakresie od 0,07 do 0,50 m/min. Do pomiaru wilgotności i temperatury powietrza pod i nad taśmą z materiałem suszonym służyły otwory pomiarowe od 1 do 5. W tych też punktach pobierano z taśmy próbki materiału suszonego z dna i powierzchni złoża.

Materiałem poddawany suszeniu był granulat o średnicy przeciętnej 25 mm i wilgotności 44%. Granulat ten otrzymywano bezpośrednio przed procesem suszenia w granulatorze talerzowym i kierowano na taśmę suszarki w sposób ciągły z prędkością masową $m = 3,15$ kg/min. Czas przebywania materiału w suszarce zmieniano w zakresie od 12,5 do 91 min.

Do pomiarów wilgotności względnej i temperatury powietrza służył przyrząd

firmy Ebro Electronic GmbH Hygrometr RHT 200.

Wilgotność materiału suszonego oznaczano metodą wagową po wysuszeniu go do stałej masy w suszarce laboratoryjnej w temp. 105 ° C.

Wyniki doświadczeń i wnioski

Uśrednione wyniki pomiarów kinetyki suszenia przedstawiono w tabelicy 1.

Opracowanie wyników

Na podstawie przedstawionych w tabelicy 1 wyników pomiarów procesu suszenia wyznaczono zależność bezwzględnej wilgotności powietrza Y_n wpływającego ze złoża od odległości s (drogi przebytej) od wlotu powietrza (punkt pomiarowy 5).

Zależność zawartości wilgoci w powietrzu wpływającym ze złoża od odległości s opisano zależnością liniową:

$$Y_n = a + b_s \quad (16)$$

Pomiary wilgotności względnej dotyczyły sumy strumieni powietrza wpływających ze złoża na odcinku s

$$\bar{Y}_n = \frac{\int_0^s Y_n ds}{s} = a + \frac{b}{2}s \quad (17)$$

Wielkość a w równaniach (16) i (17) dla warunków doświadczeń (tablica 1) oznacza wilgotność bezwzględną powietrza nad złożem w punkcie 5:

$$a = 0,029 \text{ [kgH}_2\text{O/kg s. pow.]}$$

natomiast współczynnik kierunkowy b określa zmianę wilgotności powietrza na jednostce drogi s :

$$b/a = 0,000525 \text{ dla } \tau_c = 91 \text{ min.}$$

stąd

$$b = 0,00105 \text{ [kgH}_2\text{O/m kg s. pow.]}$$

Dla τ_c min. wielkości powyższe wynoszą:

$$a = 0,016 \text{ i } b = 0,00042$$

Tabela 2

Wyniki obliczeń parametrów powietrza

Table 2

Computed air parameters.

Wielkość mierzona	Nr punktu pomiarowego				
	5	4	3	2	1
s [m]	0	0.95	1.90	2.85	3.80
τ_c [min]	91				
\bar{Y}_n [kg H ₂ O/kg]	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
Y_n [kg H ₂ O/kg]	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
τ_c [min]	12.5				
\bar{Y}_n [kg H ₂ O/kg]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Y_n [kg H ₂ O/kg]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Na podstawie danych zawartych w tabelach 1 i 2, wyznaczono współczynniki m i k rozwiązując układ równań (12) i (13). Współczynniki te wynoszą:

$$m = 1,17$$

$$k = 7,23 \cdot 10^{-4} \text{ [kg H}_2\text{O/m}^2\text{s]}$$

Dla zweryfikowania równań (12) i (13) przyjęto, że proces suszenia w niezbyt szerokim zakresie wilgotności materiału suszonego przebiega ze stałą szybkością, w związku z czym zmiana wilgotności materiału jest proporcjonalna do czasu suszenia:

$$\Delta X_2 = \Delta X_1 \frac{\tau_{c2}}{\tau_{c1}} = (0,69 - 0,79) \frac{12,5}{91} = -0,014$$

Wilgotność materiału suszonego po czasie 12,5 min. jest równa:

$$X_2 = X_0 + \Delta X_2 = 0,79 - 0,014 = 0,776 \quad \text{[kg H}_2\text{O/kg s.m.]}$$

a wilgotność powietrza:

$$Y_0^* = \frac{18}{28,8} \frac{1,17 \times 0,0576 x^{\frac{0,783}{1,783}}}{1,013 - 1,17 \times 0,756 x^{\frac{0,783}{1,783}}} = 0,392 \text{ kg H}_2\text{O/kg s.pow.}]$$

Po podstawieniu obliczonych wartości do równania (12) otrzymamy wartość wilgotności materiału suszonego:

$$X_2 = 0,775 \quad [\text{kg H}_2\text{O/kg s.m.}]$$

Porównując wartość wilgotności bezwzględnej materiału suszonego z wartością założoną oraz wartością doświadczalną uzyskano wysoką zgodność wyników potwierdzających dobrą dokładność przyjętego modelu matematycznego.

4. Wnioski

1. W pracy przedstawiono wyniki badań suszenia zgranulowanego pyłu w suszarce taśmowej własnej konstrukcji w prostym strumieniu powietrza.
2. Opracowano model matematyczny procesu suszenia, pozwalający opisywać kinetykę suszenia materiału i nawilżania się powietrza suszącego zgodnie z równaniami (12) i (13).

Do opracowania modelu matematycznego wprowadzono zmodyfikowaną wartość siły napędowej:

$$\Delta Y = Y^* - Y$$

gdzie:

$$Y^* = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{pow.}}} \frac{mP_{\text{H}_2\text{O}}^* \frac{x}{1+x}}{P - mP_{\text{H}_2\text{O}}^* \frac{x}{1+x}}$$

3. Dla wykonanych doświadczeń obliczono współczynnik kinetyczny k :

$$k = 7,23 \cdot 10^{-4} \text{ [kg H}_2\text{O/m}^2\text{s]}$$

oraz współczynnik równowagowy m :

$$m = 1,17$$

4. Ze względu na zbyt mały zakres zmiany wilgotności materiału suszonego nie przekraczające 12 % wilgotności początkowej uzyskany model jest zbliżony do modelu liniowego:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \text{const}$$

Literatura

1. Włodzimierz Ciesielczyk: Efektywność konwekcyjnego i kontaktowego suszenia fluidalnego, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3/94, s. 14-17
2. Andrzej Kmieć, Jerzy Kucharski, Sylwester Mielczarski: Badanie kinetyki suszenia węgla w złożu fontannowym, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3/94, s. 17-20
3. Stanisław Pabis: Tworzenie oraz aktualny stan teorii konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych i kierunki rozwoju w Polsce, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 1993, z. 408, s. 41-51
4. Jan Pabis: Technologia suszenia nasion i warzyw, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 1984, z. 287, s. 187-204
5. Czesław Strumiłło: Podstawy teorii i techniki suszenia, WNT W-wa 1983

Studies on drying granulated material in a band drier

Wojciech Korpai, Edward Sobczak, Wojciech Weiner

Summary

Paper presents the results of drying granulated dust layer at perpendicular air flow in a band drier of authors' own design. Mathematical model of drying process was developed. Equations describing the kinetics of either material drying and humidification of drying air were derived. Modified value of drying activation force was used to describe the process. Kinetics coefficient (k) and moisture equilibrium coefficient (m) were calculated for experimental drying.