

## WPŁYW TEMPERATURY NA WYMIANĘ WILGOCI W CZASIE SUSZENIA ZIARNA PSZENICY Z WYKORZYSTANIEM SORBENTU NATURALNEGO

### Streszczenie

Suszenie płodów rolnych z wykorzystaniem sorbentu naturalnego – jakim jest ziarno tego samego gatunku co ziarno suszone. Artykuł przedstawia dynamikę oddawania wilgoci przez ziarno wilgotne i pochłaniania wody przez ziarno przesuszone z uwzględnieniem różnych udziałów masowych ziarna i temperatury czynnika suszącego.

**Słowa kluczowe:** sorbent, wymiana wilgoci, ziarno pszenicy, funkcja harmoniczna z tłumieniem

### Oznaczenia

A - powierzchnia jednostkowa  $m^2/kg$ ,  
d - wymiar charakterystyczny m,  
J - strumień prędkości  $kg/(m^2 s)$ ,  
 $k_0$  - współczynnik empiryczny,  
 $k_1$  - współczynnik empiryczny,  
 $k_2$  - współczynnik empiryczny,  
u - zawartość wody  $kg_{H_2O}/kg_{s.m.}$ ,  
 $\Theta$  - czas s, h,  
 $\gamma$  - gęstość  $kg/m^3$ ,  
 $\lambda_m$  - współczynnik przewodności masy  $kg/(m K)$ .

### Wprowadzenie

Podstawowym celem przechowywania zbóż jest utrzymanie przez jak najdłuższy okres jego przydatności przetwórczej i odżywczej. Cel ten można osiągnąć przez stworzenie warunków ograniczających procesy życiowe ziarna i uniemożliwiających rozwój szkodników i drobnoustrojów.

Głównymi czynnikami wpływającymi na wzrost natężenia procesów życiowych zboża oraz żyjących w nim drobnoustrojów, owadów i roztoczy są wilgoć, ciepło i dostęp tlenu. Na trwałość zboża mają również wpływ cechy odmianowe, warunki dojrzewania i zbioru, czystość i zdrowotność ziarna, a także sposób przygotowania do magazynowania.

### Cel i zakres pracy

Stosowanie sorbentów może być dwójakiego rodzaju:

pośrednie : polegające na osuszaniu powietrza, które następnie pochłania wilgoć z ziarna

bezpośrednie : polegające na zmieszaniu ziarna z sorbentem mineralnym lub naturalnym.

Do mineralnych sorbentów należą różnego rodzaju silikażele. Najczęściej stosowanym sorbentem mineralnym jest żel kwasu krzemowego, bentonit sodowy i inne. Sorbenty w suszarnictwie są jeszcze mało popularne i wykorzystywane na niewielką skalę. Wadą tej metody jest konieczność oddzielania sorbentu od suszonego ziarna po zakończeniu procesu suszenia.

Natomiast zastosowanie sorbentu naturalnego, jakim jest ziarno tego samego gatunku, co ziarno suszone, usuwa tę trudność, ponieważ nie ma konieczności rozdzielania ziarna po zakończeniu procesu. Także wymogi ostatnich lat preferujące konieczność zmniejszenia

zużycia energii stwarzają możliwość rozwoju tej metody, jako jednej z niekonwekcyjnych metod suszenia płodów rolnych.

W pracy tej przedstawiono metodę suszenia z wykorzystaniem naturalnego sorbentu w suszeniu zbóż, czyli ziarna tego samego gatunku co ziarno suszone.

Suszenie zbóż rozpatrywane w oparciu o założenia inżynierii chemicznej jest procesem zachodzącym w układzie fazowym z udziałem fazy stałej, dla opisu którego duże znaczenie ma zależność zwana równowagą suszarniczą.

Wilgoć może dyfundować od materiału wilgotnego do czynnika suszącego, gdy równowagowa prężność pary wodnej nad materiałem jest większa niż prężność cząstkowa pary wodnej w czynniku suszącym. Następuje wówczas desorpcja wilgoci. Odparowanie wilgoci następuje do momentu osiągnięcia stanu równowagi, wówczas prężność pary wodnej nad materiałem wilgotnym i w czynniku suszącym są sobie równe.

Poznanie stanu równowagowego materiału wilgotnego stanowi ważny element dla określenia wiązania wilgoci z materiałem oraz ma duże znaczenie w technologii suszenia.

Mechanizm wiązania wody w kapilaro – porowatym ciele, jakim jest ziarno zbóż, polega na mechanicznym wiązaniu cieczy siłami ciężkości i napięcia powierzchniowego oraz adsorpcji fizycznej, której towarzyszy kondensacja kapilarna. Dlatego równowaga suszarnicza posiadać może charakter równowagi adsorpcyjnej, absorpcyjnej, osmotycznej.

Układ materiał wilgotny – sorbent dąży do równowagi termodynamicznej (hydrotermicznej), którą określa ją równość potencjałów przenoszenia wody. W stanie równowagi hydrotermicznej potencjał przenoszenia wody stykających się ciał jest równy, ale w zależności od ich higroskopijności, różne są zawartości wody w tych ciałach.

Dotychczas nie opracowano wyczerpująco charakterystyk dynamiki procesu wymiany wody w mieszaninie ziaren wilgotnych (sorbat) i wysuszonych (sorbent).

W pracy badawczej, której część rezultatów przedstawiono w tym artykule poruszany jest problem wykorzystania naturalnego sorbentu jakim jest ziarno tego samego gatunku co ziarno suszone z uwzględnieniem temperatury czynnika suszącego.

## Metodyka

Przeprowadzono 9 serii badań wymiany wody między ziarnami pszenicy o różnej zawartości wody dla trzech różnych udziałów masowych sorbatu i sorbentu z uwzględnieniem temperatury. Dla każdego składu wykonano dwa powtórzenia. Badania prowadzono w trzech różnych temperaturach (tab. 1).

Tab. 1. Skład sorbentu i sorbatu dla poszczególnych prób  
Table 1. Composition of the mixture for particular wheat grain samples

lp.	temperatura sorbentu [°C]	materiał wilgotny [%]	sorbent [%]	masa ziaren wilgotnych [kg]	masa sorbentu [kg]
1	30	50	50	1	1
2	30	60	40	1,2	0,8
3	30	75	25	1,5	0,5
4	40	50	50	1	1
5	40	60	40	1,2	0,8
6	40	75	25	1,5	0,5
7	55	50	50	1	1
8	55	60	40	1,2	0,8
9	55	75	25	1,5	0,5

Badanie przebiegu wymiany wody między dwiema frakcjami ziarna pszenicy przeprowadzono w pojemniku o pojemności 3 kg, do którego wsypano odpowiednio wymieszany materiał, tak aby wypełniał całą objętość pojemnika. Pojemnik następnie zamknięto, aby wyeliminować wpływ czynnika wilgotnościowego z zewnątrz. Do osiągnięcia stanu wymieszania ziaren pszenicy zastosowano mieszalnik statyczny według koncepcji Bossa i innych [1]

W każdej próbie mieszano ziarna przesuszone (sorbent) w temperaturach: 30, 40, 55°C przez 32 godziny trwania procesu (tab.2.)

Tab. 2 Zawartość wody i czas suszenia sorbentu  
Table 2. Moisture content and drying time of the sorbent

numer próby	temperatura [°C]	czas suszenia [h]	zawartość wody [kg/kg]
1,2,3	30	24	0,09
4,5,6	55	24	0,05
7,8,9	40	24	0,06

Sorbat (ziarno wilgotne) zostało sztucznie nawilgocone za pomocą pary wodnej. W tym celu zbudowano stanowisko w którym wykorzystano dygestorium i łaźnię wodną. Nad zwierciadłem pary wodnej powstałej z łaźni umieszczono ramę z ziarnem. Dygestorium w czasie nawilgacania ziarna było zamknięte, utrzymano wilgotność 100% i temperaturę 28 °C (tab.3.)

Tab. 3. Zawartość wody sorbatu po nawilgoceniu  
Table 3. Moisture content of sorbate after moistening

nr próby	temperatura [°C]	udział ziaren wilgotnych i suchych [%]	zawartość wody [kg/kg]
1	30	50-50	0,23
2	30	60-40	0,24
3	30	75-25	0,24
4	40	50-50	0,31
5	40	60-40	0,23
6	40	75-25	0,38
7	55	50-50	0,29
8	55	60-40	0,39
9	55	75-25	0,35

Obie frakcje ziaren zsypywano w odpowiednich stosunkach wagowych do pojemnika po uprzednim określeniu ich wilgotności, zgodnie z Polską Normą. Ziarno nawilgocone zostało wcześniej zabarwione, w celu późniejszego rozdzielania składników mieszaniny. Badania prowadzono w warunkach otoczenia. Temperatura otoczenia w którym wykonano doświadczenie przez cały czas prowadzenia badań wynosiła 25°C.

Pojemnik z mieszaniną był przez cały czas trwania procesu wymiany wody między ziarnami zamknięty. Ziarna w pojemniku zostały tak wymieszane, aby ziarna wilgotne stykały się z ziarnami przesuszonymi. Mieszanie następowało również przy każdym pobieraniu próbki. Wymianę wody między ziarnami badano na podstawie zmiany zawartości wody w materiale wilgotnym i w sorbencie w czasie trwania procesu. Pobierano próbki mieszaniny po około 50 g i po rozdzielaniu ziaren określano w nich zawartość wody metodą suszarkową zgodnie z PN-79/R – 65950, ważąc próbki sorbatu i sorbentu bezpośrednio po ich pobraniu i rozdzielaniu oraz po wysuszeniu ich w suszarce do suchej masy. Próbkę ważono z dokładnością +/- 0,0001 g. Zawartość wody oznaczono w [kg H<sub>2</sub>O/kg s.m.]. Próbkę pobierano

---

co 2,4,8 godzin przez 32 godziny trwania procesu. Wykonano dwa powtórzenia. W celu ustalenia wpływu temperatury ziaren sorbentu na intensywność wymiany wody podgrzano uprzednio ziarna pszenicy do temperatur 30, 40, 55 °C.

### Wyniki badań i ich analiza

W celu określenia dynamiki ruchu wilgoci sporządzono wykresy krzywych prędkości masowej.

W celu określenia dynamiki sorpcji – desorpcji dokonano analizy przyrostów i spadków zawartości wody  $\Delta u / (\Delta \theta \cdot A)$  w odniesieniu do czasu przebiegu procesu  $f(du/dt; A)$  dla każdego kroku czasowego  $\Delta \theta$ , gdzie  $A$  jest powierzchnią jednostkową. Powierzchnia jednostkowa obliczona została według wzoru:

$$A = \frac{6M}{d_e \gamma_m} \quad (1)$$

gdzie:

$M$  – masa nasion  
 $\gamma_m$  – ciężar właściwy  
 $d_e$  – średnica nasion

Przyjęto model Strumiły [1983], ponieważ uwzględnia powierzchnię jednostkową suszonego materiału, które w przypadku ziarna wilgotnego i suchego jest różna i może mieć decydujące znaczenie.

Jak wynika z analizy krzywych dynamiki zmian zawartości wody (rys. 1,2,3), daje się zauważyć wyraźny wpływ zarówno składu (proporcji) mieszaniny jak i temperatury sorbentu na przebieg procesu oddawania wilgoci i jej pochłaniania.

Tak więc w przypadku zmieszania 50% ziarna wilgotnego i 50% ziarna podgrzanego do 40 °C o potencjale sorpcji decyduje udział fazy suchej, gdzie przy małym jej udziale szybkość sorpcji jest wyższa niż desorpcji (rys.1).

W przypadku wyższych temperatur zaznacza się wyraźny wpływ fazy gazowej, w której zawarty jest nadmiar wilgoci wnikającej do niej w pierwszych minutach kontaktu gorącego sorbentu i zimnego ziarna wilgotnego. Po wyrównaniu temperatury zmiana warunków termodynamicznych w tak założonym układzie powoduje wykraplanie się wody na powierzchni zarówno sorbentu, ale głównie na powierzchni sorbatu. Mechanizm sorpcji, który jest bardzo powolny nie pozwala na pochłonięcie tej formy wilgoci. Nadmiar wilgoci nie wchłoniętej powoduje po pewnym czasie pojawienie się pleśni i grzybów, które następnie rozwijają się ze znaczną intensywnością.

Ponieważ w rozpatrywanym układzie zwłaszcza tam gdzie mamy do czynienia ze znacznym przegrzaniem sorbentu w stosunku do temperatury otoczenia daje się zauważyć, że dyfundująca wilgoć napotyka dodatkowy opór (wtórna sorpcja), który powoduje, że transport wilgoci nie przebiega tak jak podczas konwekcyjnego suszenia. Ten proces da się opisać za pomocą funkcji harmonicznej z silnym tłumieniem.

Do sporządzenia wykresów jednostkowego strumienia masy (szybkości sorpcji i desorpcji) w oparciu o analogię do konwekcyjnego modelu suszenia płodów rolnych o kształcie kuli dopisano w oparciu o funkcję harmoniczną z tłumieniem dodatkowy człon, który pozwala na wytłumienie krzywych w funkcji czasu (rys.1-4).

Funkcja harmoniczna z tłumieniem za pomocą której sporządzono wykresy jednostkowego strumienia masy w funkcji czasu ma ogólną postać:

$$J = -\Delta u (\exp(k_0 \Delta t)) \left( -\cos \left( \frac{\Delta \theta}{k_1} - \frac{\Delta \theta}{k_2} \right) \right) \quad (2)$$

gdzie:  $k_0, k_1, k_2$  współczynniki empiryczne

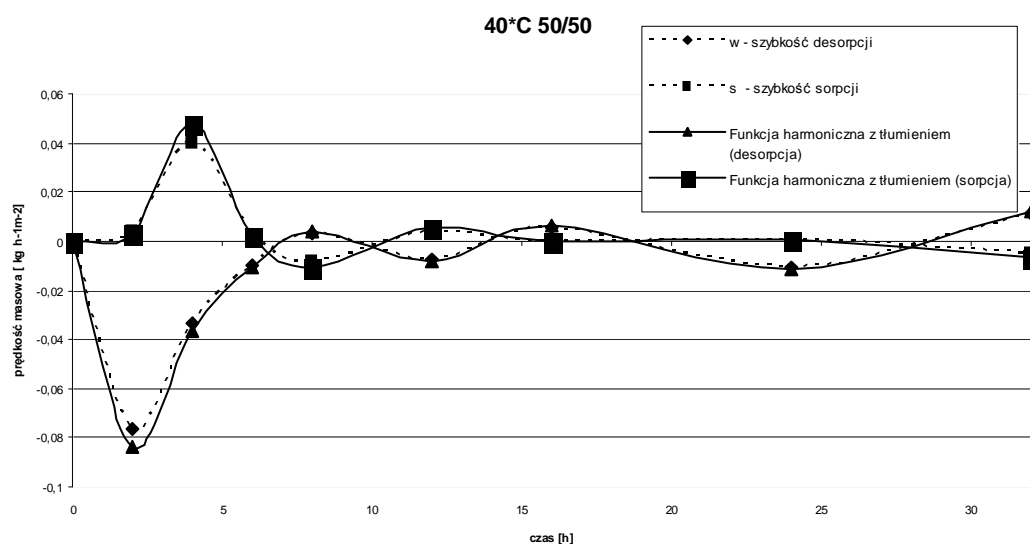
## Wnioski

1. Wykresy zmiany zawartości wody w funkcji czasu nie dają dobrego opisu procesu suszenia. Wprowadzona analiza zmiany prędkości masowej sorpcji / desorpcji w funkcji czasu przebiegu procesu daje efekt w formie przyjęcia ogólnego rozwiązania w postaci funkcji :  

$$J = f(A, n, F_o, k_1, \dots, k_n)$$
2. Znaczny stopień przegrzania sorbentu ma negatywny wpływ na przebieg procesu, na skutek pojawienia się efektu wtórnej sorpcji i desorpcji.
3. Znalaziono empiryczne zależności w postaci równania harmonicznego z tłumieniem w funkcji czasu opisującego przebieg procesu transportu wody między ziarnami pszenicy o różnej zawartości wody i różnym stopniu przegrzania sorbentu:

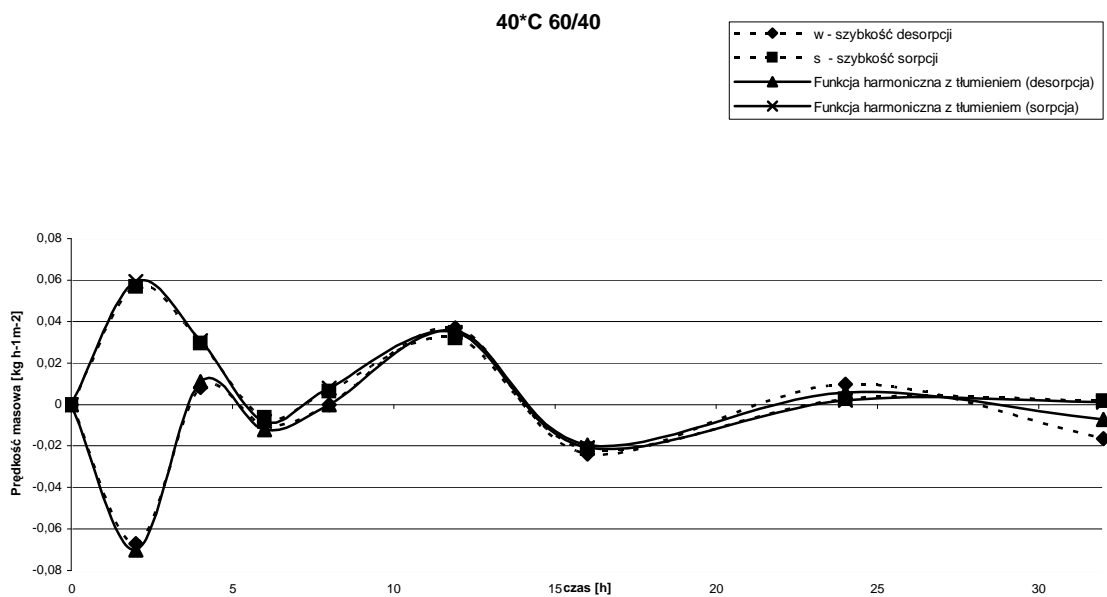
$$J = -\Delta u (\exp(k_0 \Delta t)) \left( -\cos \left( \frac{\Delta \Theta}{k_1} - \frac{\Delta \Theta}{k_2} \right) \right)$$

gdzie:  $k_0, k_1, k_2$  współczynniki empiryczne



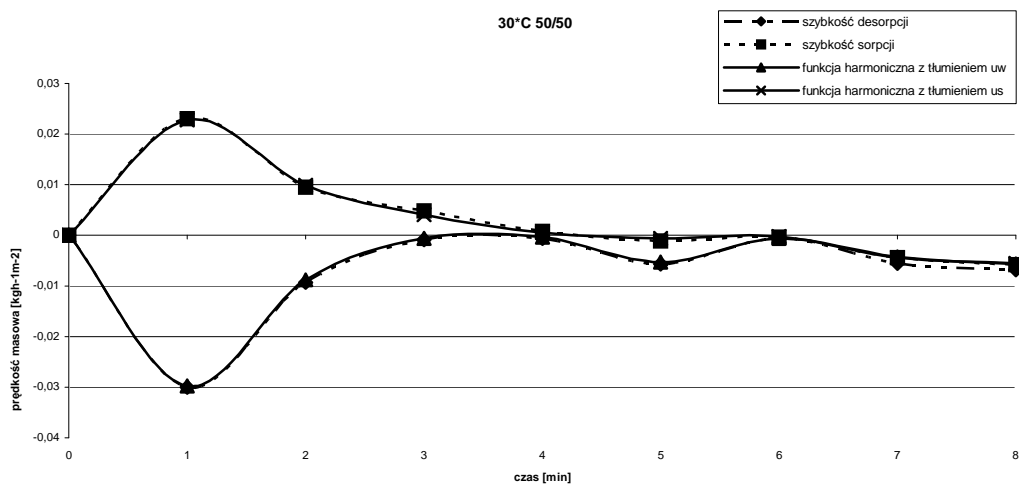
Rys. 1. Prędkość masowa w funkcji czasu wykreślona za pomocą funkcji harmonickej z tłumieniem dla sorbentu podgrzanego do 40°C, przy udziale 50% ziaren wilgotnych i 50% ziaren suchych

Fig. 1. Mass velocity in function of time, plotted by means of harmonic function with attenuation for sorbent heated up to 40 deg C, at 50% share of moist grain and 50% dry grain



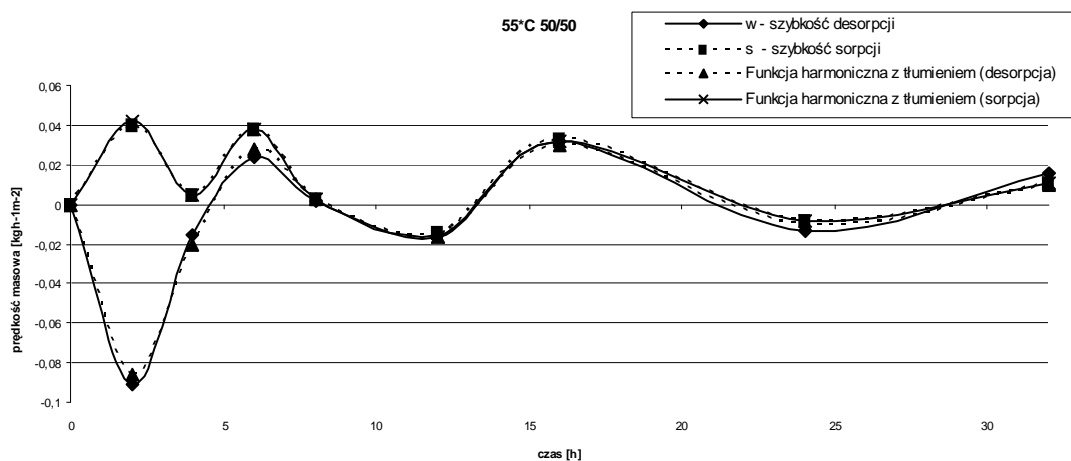
Rys. 2. Prędkość masowa w funkcji czasu wykreślona za pomocą funkcji harmonicznej z tłumieniem dla sorbentu podgrzanego do 40°C, przy udziale 60% ziaren wilgotnych i 40% ziaren suchych

Fig. 2. Mass velocity in function of time, plotted by means of harmonic function with attenuation for sorbent heated up to 40 deg C, at 60% share of moist grain and 40% dry grain



Rys. 3. Prędkość masowa w funkcji czasu wykreślona za pomocą funkcji harmonicznej z tłumieniem dla sorbentu podgrzanego do 30°C, przy udziale 50% ziaren wilgotnych i 50% ziaren suchych

Fig. 3. Mass velocity in function of time, plotted by means of harmonic function with attenuation for sorbent heated up to 30 deg C, at 50% share of moist grain and 50% dry grain



Rys. 4. Prędkość masowa w funkcji czasu wykreślona za pomocą funkcji harmonicznej z tłumieniem dla sorbentu podgrzanego do 55°C, przy udziale 50% ziaren wilgotnych i 50% ziaren suchych

Fig. 4. Mass velocity in function of time, plotted by means of harmonic function with attenuation for sorbent heated up to 55 deg C, at 50% share of moist grain and 50% dry grain

## BIBLIOGRAFIA

Boss J. , Tukiendorf M. 1989.: Mieszanie systemem funnel – flow układu ziarnistego o różnych średnicach ziaren , Zesz. Nauk. WSI w Opolu, nr 151, z. 37,

Pabis S., Pabis J., 1974.: Technologia suszenia i czyszczenia nasion, PWRiL, W-wa,

Pabis S., 1965.: Suszenie płodów rolnych, PWRiL, W-wa,

Pabis S., 1982.: Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych, PWRiL, W-wa,

Pohorecki R., Wroński S., 1979.: Kinetyka i termodynamika procesów inżynierii chemicznej, WNT, W-wa,

Polska Norma PN- 79/R-65950, Oznaczanie wilgotności ziarna,

Strumiłło Cz., 1983.: Podstawy teorii i techniki suszenia, WNT, W-wa.

## EFFECT OF THE TEMPERATURE IN MOISTURE EXCHANGING PROCESS WITH THE USE OF NATURAL SORBENT WITHIN FIRST TWO HOURS AFTER HARVESTING OF SHEAT GRAIN

### Summary

Paper discussed the drying of agricultural products with the use of natural sorbent – the grain of the same species as the grain being dried. The dynamics of giving up the moisture by moist grain and absorption of the moisture by over dried grain were presented considering various mass fractions of grain and the temperature of drying agent.

---

**Key words:** natural sorbent of moisture, moisture exchange, wheat grain, harmonic function with attenuation.

Recenzent - Andrzej Lenart