

EWA GONDEK, PIOTR P. LEWICKI

## RUCH WILGOCI W MIESZANKACH TYPU MUESLI

### Streszczenie

Mieszanka płatków zbożowych z suszonymi owocami i innymi dodatkami jest materiałem niejednorodnym, a przez to trudnym do badania. W momencie produkcji składniki takiej mieszanki różnią się istotnie aktywnością wody, produkt nie znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej, a pomiędzy jego składnikami zachodzi wymiana masy. Płatki, jako typowe produkty higroskopijne, chłoną intensywnie wilgoć, a owoce podlegają desorpcji. Do badań wybrano składniki mieszanek najbardziej różniące się aktywnością wody czyli płatki zbożowe (płatki kukurydziane i płatki z otrąb pszennych) i owoce (jabłko). Wyznaczono izotermy sorpcji tych produktów metodą statyczno-eksykatorową, uzyskano izotermy drugiego typu według klasyfikacji Brunauera w przypadku płatków kukurydzianych i jabłka oraz trzeciego typu w odniesieniu do płatków z otrąb pszennych. Przygotowano mieszanki płatków z jabłkiem o zróżnicowanej zawartości wody. Plastry jabłka świeżego i suszonego do zawartości suchej substancji 40, 60 i 80 % mieszano z płatkami, zachowując stały stosunek suchych mas wynoszący 1:10. Po określonym czasie mieszanki rozdzielano, a w składnikach oznaczano zawartość wody i aktywność wody. Eksperyment prowadzono do uzyskania stanu równowagi, czyli zrównania się aktywności wody składników.

Wyznaczono efektywny współczynnik dyfuzji wody w jabłkach metodą Cranka, a w przypadku płatków obliczono iloraz  $D_{ef}/L^2$  ze względu na trudności w określeniu ich wymiarów.

Współczynnik dyfuzji wody w jabłku wyznaczony w mieszance płatków i jabłka świeżego wynosił  $2,43 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s, a współczynnik dyfuzji wody w jabłku poddanym procesowi suszenia był na zbliżonym poziomie ( $3,23$ - $3,08 \cdot 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s) niezależnie od warunków prowadzenia eksperymentu. W przypadku płatków wartość ilorazu  $D_{ef}/L^2$  była tym niższa im mniejsza była zawartość wody w jabłku, co oznacza, że główny opór w ruchu masy w całym rozpatrywanym układzie stanowi tempo przemieszczania się wody w owocach. W związku z tym uzyskane w pracy wartości  $D_{ef}/L^2$  w przypadku płatków nie mogą być traktowane jako miara współczynnika dyfuzji wody w płatkach.

**Słowa kluczowe:** płatki zbożowe, dyfuzja wody, izotermy sorpcji

### Wprowadzenie

Płatki zbożowe oraz mieszanki płatków z suszonymi owocami i nasionami, zaliczane do zbożowej galanterii śniadaniowej, cieszą się w ostatnich latach rosnącą popu-

larnością. Zapewnienie dobrej jakości tego typu produktów jest trudnym zadaniem, gdyż mieszanka płatków z suszonymi owocami jest układem złożonym, w którym podczas przechowywania zachodzi wymiana masy pomiędzy jego składnikami. Płatki zbożowe jako typowe produkty higroskopijne o niskiej aktywności wody chłoną intensywnie wilgoć, suszone owoce to z kolei produkty o średniej aktywności wody, które w zetknięciu z suchym i higroskopijnym materiałem, jakim są płatki, podlegają desorpcji. Wskutek tego procesu płatki zbożowe tracą chrupkość, a owoce stają się twarde, przez co produkt nie jest akceptowany przez konsumenta [4, 5, 9, 11].

Celem niniejszej pracy była analiza szybkości przemieszczania się wody pomiędzy wybranymi składnikami mieszanek typu muesli.

### Material i metody badań

Do badań wybrano składniki mieszanek typu muesli najbardziej różniące się aktywnością wody, czyli płatki zbożowe (płatki kukurydziane i płatki z otręb pszennych) i jabłko. Wymiary płatków były zróżnicowane ich powierzchnia wynosiła ok. 60 - 80 mm<sup>2</sup>, grubość 2 - 4 mm. Izotermy sorpcji tych produktów wyznaczano metodą statyczno-eksykatorową, jako czynniki higrostatyczne zastosowano nasycone roztwory soli i roztwory kwasu siarkowego.

Przygotowano mieszanki płatków kukurydzianych z jabłkiem o zróżnicowanej zawartości wody w dwóch powtórzeniach. Krążki jabłka średnicy 10 mm i grubości 3,5 mm suszono do zawartości wody 60, 40 i 20 % i mieszano z płatkami, zachowując stały stosunek suchej masy płatków do jabłka wynoszący 1:10. Przygotowano również mieszankę płatków z otręb pszennych z jabłkiem oraz mieszankę trójskładnikową złożoną z płatków kukurydzianych, płatków z otręb pszennych i jabłka suszonego do wilgotności 40 %.

Po określonym czasie składniki mieszanek rozdzielano i oznaczano w nich zawartość i aktywność wody. W początkowej fazie eksperymentu czas pomiędzy pomiarami wynosił kilkanaście minut, w końcowej kilkanaście godzin. Eksperyment prowadzono do uzyskania stanu równowagi, czyli zrównania się aktywności wody składników.

Zawartość wody oznaczano: w owocach metodą suszenia próżniowego w temp. 70 °C przez 24 h oraz w płatkach wg PN-ISO 6540 [11].

Aktywność wody płatków i owoców mierzono w aparacie Aqua Lab model CX-2 firmy Decagon Devices Inc., o dokładności  $\pm 0,003$  w temp.  $25 \pm 1,5$  °C.

Izotermy adsorpcji pary wodnej opisano równaniami GAB i Lewickiego:

Równanie GAB [1]:

$$u = \frac{u_m \cdot c \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w)[1 + (c - 1) \cdot k \cdot a_w]} \quad (1)$$

gdzie:  $u_m$ ,  $c$ ,  $k$  - stałe,  $u$  - zawartość wody w g wody/100 g s.s.,  $a_w$  - aktywność wody

Równanie Lewickiego [7]:

$$u = \frac{E}{(1 - a_w)^F} - \frac{E}{1 + a_w^G} \quad (2)$$

gdzie: E, F, G- stałe

Uzyskane krzywe zależności zawartości wody w składnikach mieszanek od czasu opisano przy użyciu programu Table Curve 2D v3 (Jandel Scientific) następującymi równaniami:

- w przypadku desorpcji pary wodnej:

$$\frac{u - u_r}{u_0 - u_r} = A \exp(-K\tau) \quad (3)$$

- w przypadku adsorpcji pary wodnej:

$$\frac{u_r - u}{u_r - u_0} = A \exp(-K\tau) \quad (4)$$

Obliczono z tych równań: równowagową zawartość wody w produkcie -  $u_r$ , współczynnik kształtu A, oraz parametr K, który informuje o współczynniku dyfuzji wody w badanym materiale;  $u_0$  – początkowa zawartość wody w produkcie.

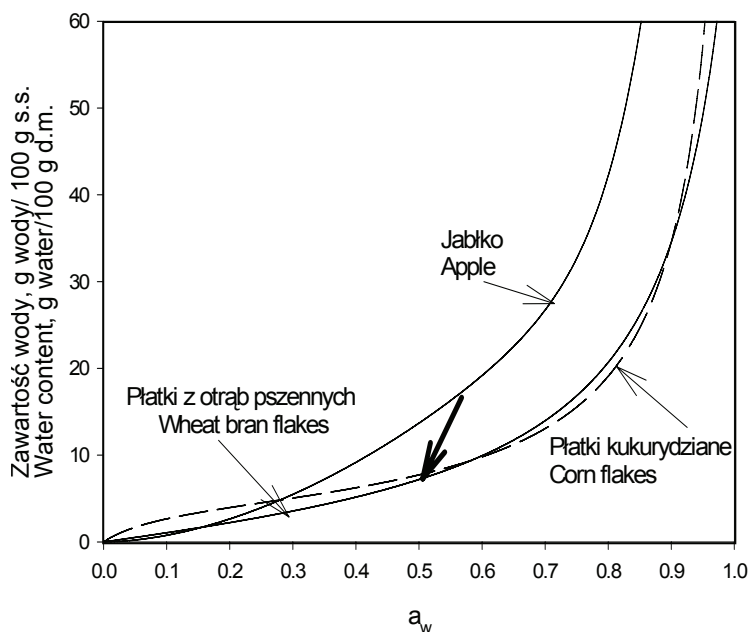
$$K = \frac{D_{ef}}{\left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (5)$$

gdzie:  $D_{ef}$ - efektywny współczynnik dyfuzji,  $m^2/s$ , L- droga dyfuzji, m

## Wyniki i dyskusja

Na rys. 1. przedstawiono izotermy sorpcji pary wodnej składników analizowanych mieszanek. Uzyskano izotermy II typu według klasyfikacji Brunauera [2] w przypadku płatków kukurydzianych i jabłka [3] oraz izotermę III typu w odniesieniu do płatków z otrąb pszennych. Izotermy opisano równaniami GAB (1) i Lewickiego (2).

W przeważającym obszarze aktywności wody izotermy owoców położone są na rysunku nad izotermami płatków, co oznacza, że w stanie równowagi składniki mieszanki różnią się zawartością wody. We wszystkich analizowanych przypadkach woda przemieszcza się w tym samym kierunku: od owoców do płatków (z przebiegu izoterm składników mieszanek wynika, że przy bardzo niskich aktywnościach wody teoretycznie możliwy jest ruch wody w przeciwnym kierunku). Kierunek przemieszczania się wody w mieszance płatków z jabłkiem zaznaczono na rysunku strzałką.

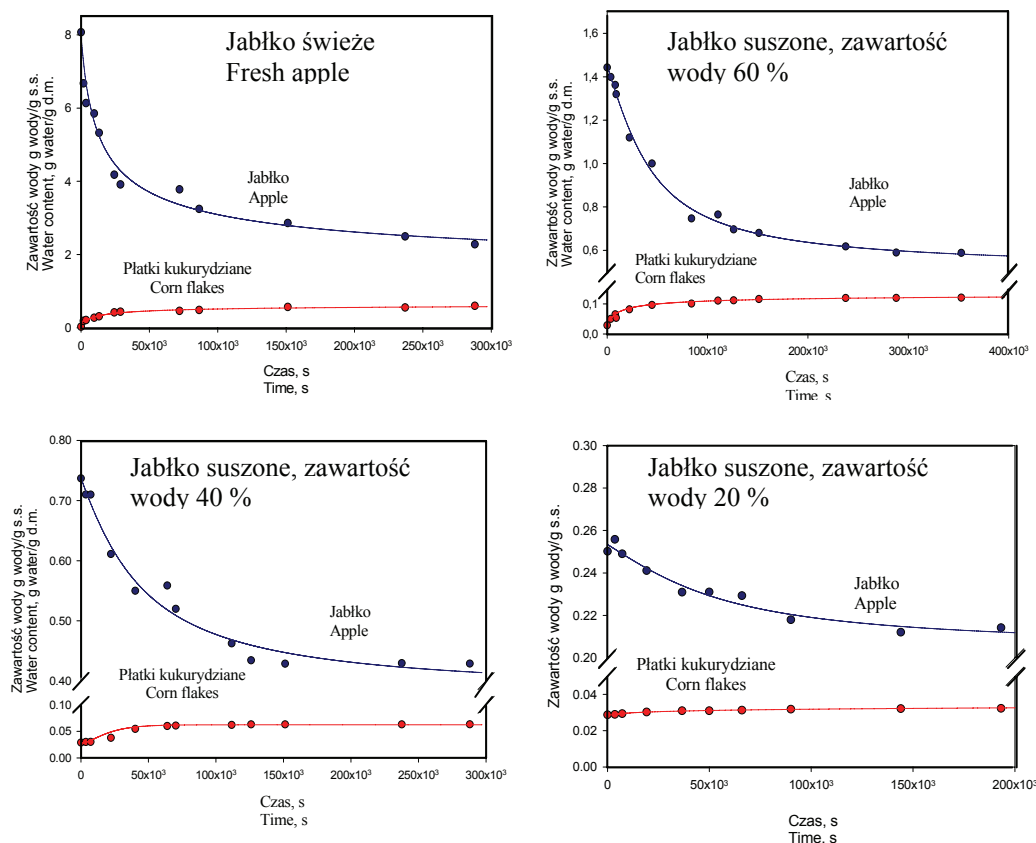


Rys. 1. Izotermi sorpcji pary wodnej składników badanych mieszanek.

Fig. 1. Moisture sorption isotherms of the ingredients of the products investigated.

W pracy podjęto próbę wyznaczenia efektywnego współczynnika dyfuzji wody w składnikach mieszanek płatków z jabłkiem. Efektywny współczynnik dyfuzji wody zawiera w sobie kilka możliwych mechanizmów transportu masy, poza dyfuzyjnym np. przepływ powierzchniowy, kapilarny, ciśnieniowy, termodyfuzję, dyfuzję Knudseną i inne [6, 10]. Na rys. 2. przedstawiono zmiany zawartości wody w składnikach badanych mieszanek płatków kukurydzianych z jabłkiem o zróżnicowanych początkowych zawartościach wody. Dużym zmianom zawartości wody w jabłku towarzyszyły niewielkie zmiany zawartości wody w płatkach, co wynikało z przyjętych w doświadczeniu proporcji. Zapach mieszanki płatków z jabłkiem świeżym w czwartej dobie trwania eksperymentu sugerował zepsucie mikrobiologiczne, dlatego eksperyment został przerwany mimo braku osiągnięcia stanu równowagi ( $a_w$  płatków wynosiła wówczas 0,901, a jabłka 0,955). Jabłka suszone do 40% s.s. po zmieszaniu z płatkami najintensywniej oddawały wodę przez pierwsze 20 h eksperymentu, po około 98 h układ osiągał stan równowagi przy  $a_w = 0,625$ . W kolejnej mieszance, zawierającej jabłko o zawartości suchej substancji 60 %, stan równowagi stwierdzono po około 80 h przy aktywności wody wynoszącej 0,447.

W ostatniej, przedstawionej na rys. 2., mieszance zmiany zawartości wody składników były niewielkie, wilgotność płatków zwiększyła się o około 0,7 % w stosunku do wartości początkowej. Układ osiągał stan równowagi po 61 h przy  $a_w = 0,370$ .



Rys. 2. Przebieg zmian zawartości wody w składnikach mieszanek w czasie przechowywania płatków z jabłkiem o różnej początkowej zawartości wody.

Fig. 2. Changes in the moisture content in the ingredients of mixtures when storing the flakes with apple with a different initial water content.

Głównym składnikiem mieszanek typu muesli są płatki (80 % i więcej) woda przemieszcza się więc z owoców do masy płatków. Nieliczne badania tego typu produktów dowodzą, że zjawisko to ma istotne znaczenie z punktu widzenia ruchu wilgoci. Tutuncu i Labuza [11] obliczyli współczynnik dyfuzji wody w pojedynczych płatkach oraz w masie płatków i stwierdzili, że w pojedynczym płatku woda przemieszcza się wolniej niż w warstwie płatków. Również Meskine [8], badając dyfuzję wody w masie płatków kukurydzianych i w pojedynczych płatkach, uzyskał znaczną różnicę pomiędzy obliczonymi współczynnikami dyfuzji  $D_{ef}$ . Współczynniki  $D_{ef}$  wody w żyw-

ności mieszczą się w przedziale  $10^{-9}$ - $10^{-12}$   $m^2/s$ , przy czym wyższe wartości dotyczą produktów porowatych, jak np. produkty zbożowe, a niższe produktów o zwartej strukturze, jak np. rodzynki i jabłka [6]. Na tym tle współczynnik dyfuzji wody w powietrzu jest bardzo wysoki i wynosi  $2,4 \cdot 10^{-5} m^2/s$ , co tłumaczy istotny wpływ przestrzeni powietrznych na procesy przenoszenia wody w układach wieloskładnikowych. Jeśli przyjąć, że powietrze uwięzione w złożu płatków zachowuje się jakby stanowiło składnik układu, to sprawia ono, że współczynnik  $D_{ef}$  wyznaczony w złożu jest wyższy niż uzyskany w przypadku pojedynczej cząstki i rośnie ze wzrostem ilości powietrza zawartego w złożu. Tutuncu i Labuza [11] wykazali również, że  $D_{ef}$  w dużej mierze zależy od geometrii układu i eksperymenty powinny uwzględniać konfigurację przestrzenną produktu, co nie jest łatwe w badanych produktach.

W analizowanym eksperymencie dochodziło ponadto do kontaktu pomiędzy składnikami mieszaniny, przy czym niemożliwość zdefiniowania powierzchni kontaktu dodatkowo utrudnia interpretację wyników.

W tab. 1. podano uzyskane w doświadczeniu współczynniki dyfuzji wody w jabłkach oraz wartości ilorazu  $D_{ef}/L^2$  płatków kukurydzianych. Wykazano, że w badanych mieszkach współczynnik dyfuzji wody w jabłkach wysuszonych do różnych zawartości wody był zbliżony. Współczynnik dyfuzji wody w jabłku, wyznaczony w mieszance płatków z jabłkiem świeżym, był ponad 7-krotnie wyższy od współczynników uzyskanych w jabłku suszonym, w tym przypadku woda ze zniszczonych na skutek cięcia komórek jabłka znajdujących się na powierzchni wydostawała się bardzo łatwo.

Tabela 1

Wyznaczone parametry równania (5), odnoszące się do mieszanek płatków kukurydzianych z jabłkiem o zróżnicowanej początkowej zawartości wody.

The determined parameters of equation (5) referring to corn flakes & apple mixtures with a different initial water content level.

$D_{ef}/L^2, (s^{-1})$ $D_{ef}, (m^2/s)$	Początkowa zawartość wody w jabłku, % Initial water content in apple [%]			
	88,97 (jabłko świeże / fresh apple)	60	40	20
Płatki kukurydziane Corn flakes $D_{ef}/L^2$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$7,379 \cdot 10^{-7}$	$4,939 \cdot 10^{-7}$	$4,003 \cdot 10^{-7}$
Jabłko / Apple $D_{ef}/L^2$ $D_{ef}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$ $1,08 \cdot 10^{-12}$	$6,31 \cdot 10^{-6}$ $3,03 \cdot 10^{-13}$	$8,72 \cdot 10^{-7}$ $2,79 \cdot 10^{-13}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$ $3,38 \cdot 10^{-13}$

Obliczono również współczynnik dyfuzji wody w jabłku o zawartości 60 % s.s. w mieszance z płatkami z otrąb pszennych oraz w mieszance trójskładnikowej płatków kukurydzianych, płatków z otrąb pszennych i jabłka, wynosił on odpowiednio  $3,04 \times 10^{-13}$  i  $3,11 \times 10^{-13}$  m/s<sup>2</sup>. Również w tych przypadkach wartości  $D_{ef}$  były zbliżone, stwierdzić więc można że w analizowanych przypadkach współczynnik dyfuzji wody w jabłku nie zależał od substancji adsorbującej wodę.

### Wnioski

1. Izotermy sorpcji jabłka i płatków kukurydzianych charakteryzują się przebiegiem II typu, a płatków z otrąb pszennych III typu według klasyfikacji Brunauera i wsp.
2. W badanych mieszankach płatków zbożowych z owocami współczynnik dyfuzji wody w jabłku poddanym suszeniu jest na zbliżonym do siebie poziomie, niezależnie od początkowej wilgotności jabłka ani rodzaju płatków użytych do sporządzania mieszanki.
3. Wartość ilorazu  $D_{ef}/L^2$  płatków zbożowych zależy od początkowej wilgotności jabłka, nie może być więc uważana za wskaźnik opisujący dyfuzję wody w płatkach.

*Praca była prezentowana podczas VI Konferencji Naukowej nt. „Nowoczesne metody analityczne w zapewnieniu jakości i bezpieczeństwa żywności”, Warszawa, 6 - 7 grudnia 2007 r.*

### Literatura

- [1] Bizot H.: Using the GAB model to construct sorption isotherms. In: Physical Properties of Food. (eds. Jowitt R., Escher F., Hällström B., Meffert H. F. T., Spiess W.E.L., Vos G.) Applied Science Publishers, London 1983, pp. 43-54.
- [2] Brunauer S., Deming L. S., Deming W. E., Teller E.: On the theory of van der Waals adsorption of gases. J. Am. Chem. Soc., 1940, **62**, 1723-1732.
- [3] Ertugay M. F., Certel M.: Moisture sorption isotherms of cereals at different temperatures. Nahrung, 2000, **44**, 107-109.
- [4] Gondek E., Lewicki P.P.: Antiplasticization of cereal-based products by water. Part II: Breakfast cereals. J. Food Eng., 2006, **77** (2), 644-652.
- [5] Gondek E., Lewicki P.P.: Kinetics of water vapor sorption by selected ingredients of muesli-type mixtures. Pol. J. Food Nutr. Sci., 2007, **57**(3), 23-27.
- [6] Labuza T. P., Hyman C.R.: Moisture migration and control in multi-domain foods. Trends Food Sci. Technol., 1998, **9**, 47-55.
- [7] Lewicki P. P.: A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. J. Food Proc. Eng., 1998, **21**, 127-144.
- [8] Meskine A.: Analysis of effect of relative mass diffusion resistances on moisture transport in food-package systems. M.S. thesis, The Univ. of Minnesota, St Paul, MN. (za Tutuncu i Labuza), 1998.
- [9] Nowak D., Lewicki P.P., Stasiak M.: Procesy dyfuzyjne w mieszankach wieloskładnikowych. Mat. Konf. Nauk. PTTŻ „Żywność funkcjonalna”, Kraków, 1999, s. 83-84.

- [10] Sapru V., Labuza T. P.: Moisture transfer simulation in packaged cereal-fruit systems, *J. Food Eng.*, 1996, **27**, 45-61.
- [11] Tutuncu M. A., Labuza T. P.: Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient. *J. Food Eng.*, 1996, **30**, 433-447.

## MOISTURE DIFFUSION IN MIXTURES OF THE MUESLI TYPE

### S u m m a r y

A mixture of cereal flakes with dried fruit and with other additions is not a homogeneous material, thus, it is difficult to investigate it. During the production of such a mixture, its ingredients significantly differ by water activity, the product is not in the state of thermodynamic equilibrium, and the mass exchange occurs among those ingredients. The flakes, being a typical hygroscopic product, intensely absorb moisture, and the fruit is subject to desorption. Ingredients of the mixtures with the highest differences in water activity were selected for the investigation, i.e. cereal flakes (corn flakes and wheat bran flakes) and fruit (apple). Moisture sorption isotherms of those products were determined using a static exsiccation method. In the case of corn flakes and apples, the obtained isotherms represented type II according to the isotherm classification of Brunauer et al., and in the case of wheat bran flakes: type III of the same classification. Next, mixtures of flakes and apples were prepared; they had different water content levels. Slices of the fresh apples and of the apples dried so as to have 40, 60, and 80 % of dry matter were mixed with the flakes at a 1:10 constant ratio of dry matter. After a fixed time period, the mixtures were separated and the content of water & water activity were determined in the ingredients of those mixtures. The experiment was continued until the state of equilibrium was achieved, i.e. until the water activity levels of all the ingredients became equal.

An effective water diffusion coefficient was determined for apples using the Crank method, and, as for the flakes, a  $D_{ef}/L^2$  quotient was calculated because it was difficult to measure their sizes.

The water diffusion coefficient of the apple as measured in the flakes & fresh apple mixture was  $2.43 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  while the water diffusion coefficient for the apple subject to drying was similar ( $3.23 - 3.08 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ) regardless of the experiment conditions. As for the flakes, the lower the water content in the apple was the lower the  $D_{ef}/L^2$  quotient value was. This means that the water diffusion speed in the fruit constitutes the major resistance to mass transfer within the entire system. Therefore, the  $D_{ef}/L^2$  values as obtained under this experiment cannot be regarded to be a reliable measure of water diffusion coefficient for the flakes.

**Key words:** cereals flakes, water diffusion, water sorption isotherms ☒