

**TRANSPORT WILGOCI PRZY PRZECHOWYWANIU
ZIARNA W SILOSACH.
CZEŚĆ II. BADANIA TRANSPORTU MASY MIĘDZY
ZIARNIAKAMI O ZRÓŻNICOWANEJ WILGOTNOŚCI**

Marian Szarycz, Ryszard Kramkowski, Eugeniusz Kamiński,
Klaudiusz Jałoszyński

Streszczenie. W pracy przedstawiono budowę i działanie stanowiska badawczego do wyznaczenia składowej konwekcyjnej oraz składowej kontaktowej przy transporcie wilgoci między ziarniakami o różnej wilgotności. Wykonano badania zmian wilgoci w czasie dla sorbatu i sorbentu. Proces transportu wilgoci opisano równaniami wykładniczymi przy założeniu symetryczności suszenia i nawilżania. Uzasadniono dominującą rolę kontaktowego transportu wilgoci pomiędzy ziarniakami o zróżnicowanej wilgotności.

Słowa kluczowe: silos zbożowy, transport wilgoci, składowe transportu

OZNACZENIA

t – temperatura, °C
U_{red} – zredukowana zawartość wody, -
u – zawartość wody w suchej masie, kg·kg⁻¹
u_k – krytyczna zawartość wody, kg·kg⁻¹
u_r – równowagowa zawartość wody, kg·kg⁻¹
τ – czas, h

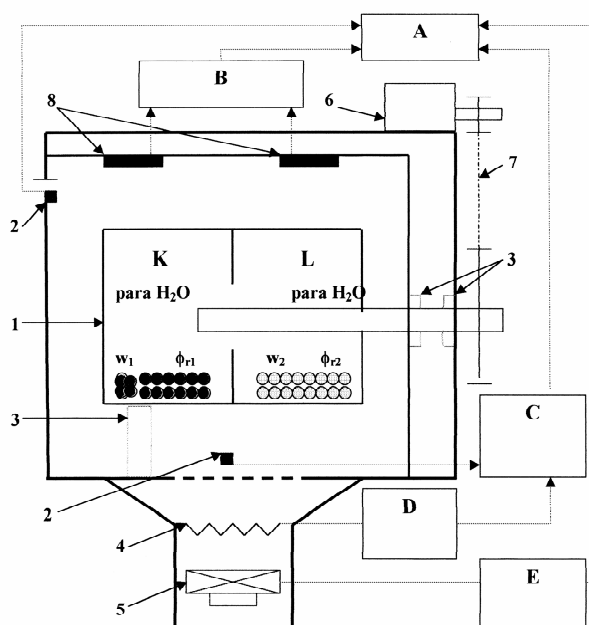
WSTĘP

Na bazie wyników pierwszej części pracy podjęto badania, których celem było uzyskanie eksperymentalnych danych dotyczących przebiegu suszenia i nawilżania ziaren zbóż ze szczególnym uwzględnieniem relacji między konwekcyjnym a konwekcyjno-kontaktowym sposobem transportu wilgoci.

METODY

W piśmiennictwie znane są relacje dotyczące przekazywania wilgoci przez ziarna wilgotne ziarnom zboża suchego. Dotyczyły one zwłaszcza wykorzystania przesuszonego ziarna jako naturalnego sorbentu [Słodczyk E. 1998]. W celu doświadczalnego wyznaczenia składowej konwekcyjnej oraz kontaktowo-konwekcyjnej przy transporcie wilgoci między ziarniakami zbudowano stanowisko doświadczalne, które umożliwia wyznaczenie tych składowych osobno.

Badania konwekcyjnego transportu wilgoci. W skład stanowiska badawczego (rys. 1) wchodził hermetyczny obrotowy bęben o wymiarach $\text{Ø } 200 \times 280 \text{ mm}$ ze szkła organicznego, suszarka mikrofalowa, w której umieszczony był pojemnik oraz silnik i przekładnia, jak również układ sterujący temperaturą. Stałość warunków termicznych wokół bębna uzyskiwano przez przepływ wokół niego powietrza o temperaturze 30°C . Dla przyspieszenia nagrzewania materiału w początkowej fazie był on dodatkowo nagrzewany mikrofalami, aż do osiągnięcia założonej temperatury.



Rys. 1. Schemat stanowiska do badania konwekcyjnego transportu wilgoci: 1 – obrotowy bęben; 2 – czujnik temperatury; 3 – łożyska; 4 – grzałka; 5 – wentylator; 6 – mechanizm napędu bębna; 7 – mechanizm przekazywania napędu; 8 – magnetrony; A – komputer sterujący; B – układ sterowania mocą mikrofal; C – układ sterowania temperaturą; D – układ sterowania mocą grzałek; E – układ sterowania prędkością powietrza

Fig. 1. The scheme of laboratory plant for studying of convection moisture transport: 1 – rotary drum, 2 – temperature sensor, 3 – bearings, 4 – heater, 5 – fan, 6 – drive of the drum, 7 – gear box, 8 – magnetrons, A – control computer, B – control system of microwave power, C – system of temperature control, D – heater power controlling system

W bębnie wydzielono strefy K i L. W strefie K umieszczano ziarna pszenicy (odmiana 'Wanda') o wilgotności początkowej $w_1 \approx 22\%$, a w strefie L to samo ziarno, ale o wilgotności początkowej $w_2 \approx 10\%$. Ziarna o różnych wilgotnościach początkowych w czasie obrotów bębna nie mieszały się, natomiast pomiędzy strefami występował swobodny przepływ powietrza. Założono, że gdyby strefy K i L były oddzielone, to w strefie K powietrze dążyłoby do wilgotności równowagowej dla w_1 w temperaturze 30°C ($\phi_{r1} \approx 92\%$), a w strefie L do wilgotności równowagowej dla w_2 w temperaturze również 30°C ($\phi_{r2} \approx 35\%$). Jednak ze względu na swobodny przepływ powietrza pomiędzy strefami K i L wilgotności powietrza wyrównywały się i w końcowej fazie dążyły w obu strefach do wartości $\phi_{rk} \approx 83\%$ (wilgotność równowagowa dla ziarna pszenicy $w_{sr} = 16,6\%$ przy temperaturze powietrza 30°C), co wynika z przeprowadzonych obliczeń bilansowych.

W strefach K i L umieszczano po 400 g ziarna. Przed umieszczeniem w bębnie materiał przechowywano w hermetycznych pojemnikach w temperaturze 4°C . Czas przechowywania wynosił 120 godzin, co zapewniało jednorodność próbek pod względem rozkładu temperatury oraz wilgotności ziaren.

Próbki ważono z dokładnością do 0,01 g, a wilgotność określano metodą suszarkową. Przed każdym z doświadczeń i po nim pobierane były próbki (3×20 g) dla sorbentu i sorbatu w celu określenia zawartości wody.

Wykonano 9 serii doświadczeń dla transportu konwekcyjnego, określając wilgotność ziaren ze stref K i L (rys. 1) po 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75 i 150 godzinach. W czasie doświadczeń hermetyczny bęben obracał się w celu zapewnienia jednakowego kontaktu wszystkich ziaren z otaczającym powietrzem.

Badania konwekcyjno-kontaktowego transportu wilgoci polegały na wypełnieniu hermetycznego pojemnika ziarnem będącym mieszaniną frakcji o różnych wilgotnościach (po 70 g każdej frakcji). Ziarno wilgotne (o wilgotności $w_1 \approx 22\%$) zabarwiano roztworem fuksyny [Ledwoń i in. 1998], a ziarno suche ($w_2 \approx 10\%$) miało barwę naturalną. Po przeprowadzeniu każdego doświadczenia materiał był rozdzielany, ważony i umieszczany w suszarce laboratoryjnej, co pozwoliło na określenie zawartości wody metodą suszarkową.

Doświadczenia dotyczące transportu konwekcyjno-kontaktowego wykonano w 8 seriach, rozdzielając ziarno barwione od niebarwionego po 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 i 75 godzinach i używano każdorazowo świeżego materiału. Po każdym doświadczeniu określano wilgotność rozdzielonych frakcji metodą suszarkową.

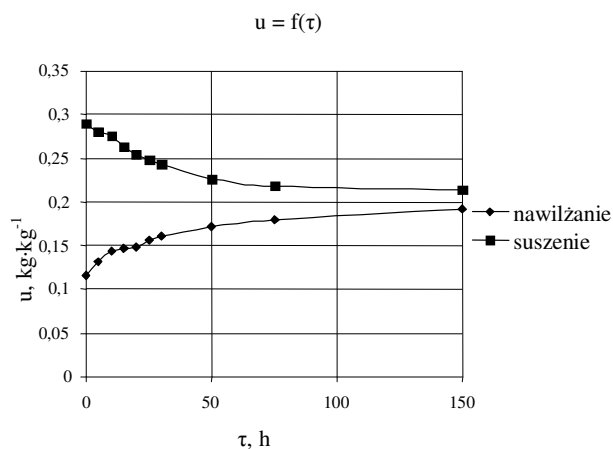
WYNIKI I DISKUSJA

Na podstawie danych doświadczalnych sporządzono wykres zmian zawartości wody w czasie dla sorbatu i sorbentu dla konwekcyjnego transportu masy (rys. 2). Początkowa zawartość wody u sorbentu wynosiła $0,12 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($w_1 = 10,7\%$), a sorbatu $u = 0,29 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($w_2 = 22,5\%$). W obliczeniach przyjęto symetryczność obu przebiegów.

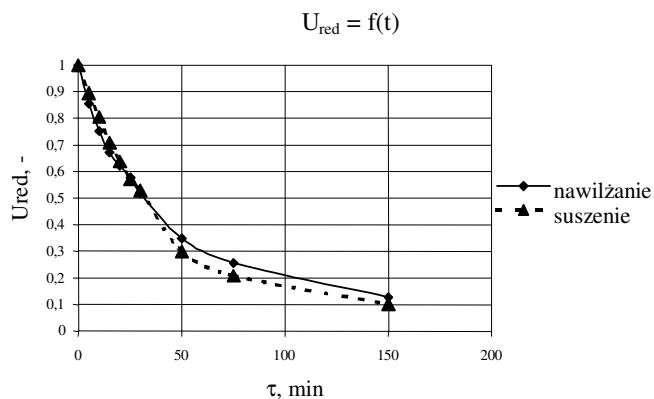
Symetryczność przebiegu nawilżania i suszenia ziarna wynika z krzywych przedstawionych na rysunku 3. Rysunek przedstawia przebieg empirycznego suszenia i nawilżania opisanego zredukowaną zawartością wody. Zredukowaną zawartość wody zdefiniowano jako:

$$U_{\text{red}} = \frac{u(\tau) - u_r}{u_0 - u_r} \quad (1)$$

a wielkość u_r przyjmowano jako średnią arytmetyczną początkowych zawartości wody u_0 obu próbek. Dla próbki suszonej licznik i mianownik były dodatnie, a dla próbki nawilżanej – ujemne.



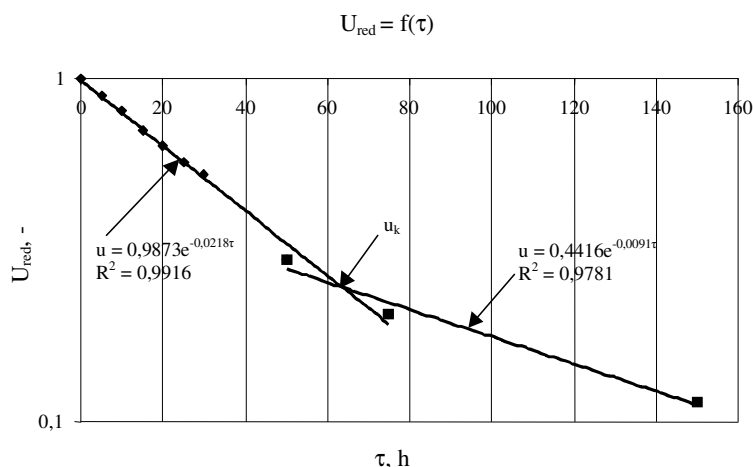
Rys. 2. Przebieg zmian zawartości wody w sorbacie i sorbencie
Fig. 2. The run of changes in water content in sorbate and sorbent



Rys. 3. Przebieg zmian zredukowanej zawartości wody w sorbacie i sorbencie
Fig. 3. The run of reduced water content in sorbate and sorbent

Odstępstwa pomiędzy krzywymi mogą wynikać z błędów pomiarowych, lecz przede wszystkim z histerazy charakterystycznej dla suszenia i nawilżania oraz z pojemności wodnej powietrza znajdującego się w stanowisku.

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg zmian zredukowanej zawartości wody w sorbacie w podziałce półlogarytmicznej. Pozwala to stwierdzić, że przebieg nawilżania i suszenia przy konwekcyjnym transporcie masy w układzie zamkniętym można opisać dwoma równaniami wykładniczymi rozgraniczonymi punktem krytycznej zawartości wody u_k . Wielkość ta wyznaczona eksperymentalnie wynosiła dla procesu wysychania $0,23 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ natomiast dla procesu nawilżania wynosiła $0,17 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$.



Rys. 4. Przebieg zmian zredukowanej zawartości wody w sorbacie
 Fig. 4. The run of reduced water content in sorbate

Dla opisu jednoczesnego przebiegu tych procesów dobrano współczynniki równania wykładniczego jako średnie ważone współczynników równań opisujących oddzielnie przebiegi suszenia i nawilżania. Równania opisujące jednocześnie nawilżanie i suszenie mają postać:

- I okres (dla $u \geq 0,23 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – suszenie oraz dla $u \leq 0,17 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – nawilżanie):

$$U_{\text{red}} = e^{-0,022\tau} \quad (2)$$

- II okres (dla $u < 0,23 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – suszenie oraz dla $u > 0,17 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – nawilżanie):

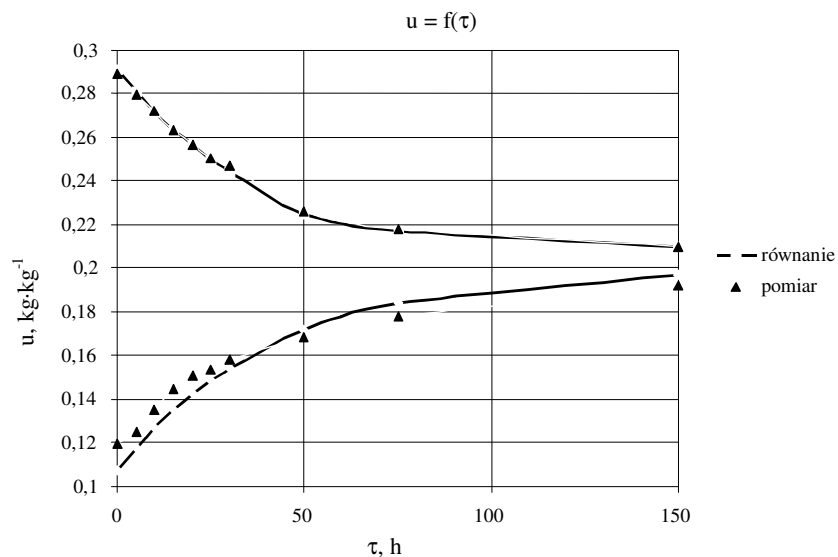
$$U_{\text{red}} = 0,5e^{-0,01\tau} \quad (3)$$

Dla tak opisanych przebiegów zmian zredukowanej zawartości wody, chwilową zawartość wody w materiale suszonym i nawilżanym opisano równaniem:

$$u(\tau) = U_{\text{red}}(u_o - u_r) + u_r \quad (4)$$

W przypadku suszenia wyrażenie w nawiasie przyjmuje wartość dodatnią ($u_0 > u_r$), natomiast dla nawilżania wyrażenie w nawiasie przyjmuje wartość ujemną ($u_0 < u_r$).

Przebieg obliczonych na podstawie wyznaczonych równań krzywych nawilżania i suszenia na tle punktów uzyskanych w drodze eksperymentów przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Krzywe nawilżania i suszenia dla konwekcyjnego transportu wilgoci
Fig. 5. Wetting and drying curve for convection moisture transport

W przypadku suszenia współczynnik korelacji równań opisujących przebieg procesu w obu okresach był bliski jedności. W przypadku nawilżania współczynnik dopasowania dla I okresu wynosi 0,88, a dla okresu II wynosi 0,85. Gorsze dopasowanie równań do punktów uzyskanych w drodze eksperymentów w przypadku nawilżania można wytłumaczyć tym, że w obliczeniach przyjęto symetryczność procesu, nie uwzględniając pojemności wodnej powietrza zawartego w hermetycznym zbiorniku.

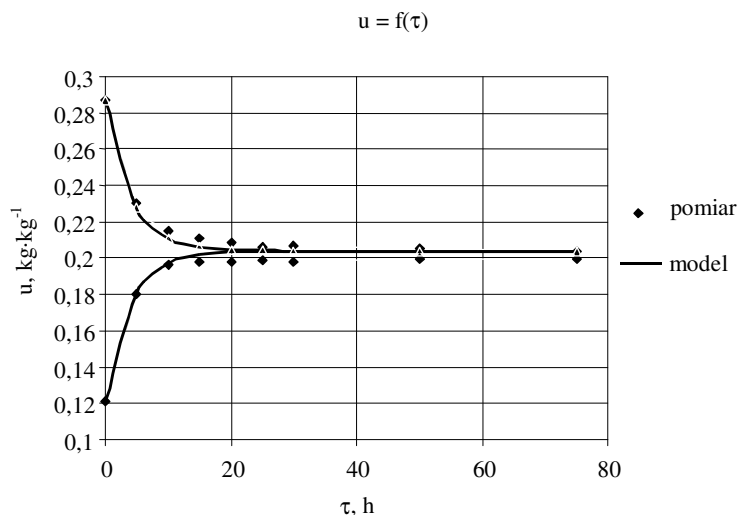
Przebiegi suszenia i nawilżania podczas konwekcyjno-kontaktowego transportu masy opisano również równaniami typu wykładniczego. Równania te mają postać:

– I okres (dla $u \geq 0,23 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – suszenie oraz dla $u \leq 0,17 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – nawilżanie):

$$U_{\text{red}} = e^{-0,25\tau} \quad (5)$$

– II okres (dla $u < 0,23 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – suszenie oraz dla $u > 0,17 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – nawilżanie):

$$U_{\text{red}} = 0,2e^{-0,04\tau} \quad (6)$$



Rys. 6. Krzywe nawilżania i suszenia dla konwekcyjno-kontaktowego transportu wilgoci
 Fig. 6. Wetting and drying curves for convection-contact moisture transport

Przebieg krzywych zmian zawartości wody w czasie nawilżania i suszenia obliczonych na podstawie równań 5 i 6 oraz równania 4 przedstawiono na rysunku 6.

WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania konwekcyjnego i konwekcyjno-kontaktowego transportu masy pozwoliły na sformułowanie opisu przebiegu zmian uwilgotnienia przy pomocy równań empirycznych. Ogólna postać ogólna równań (wykładnicza) jest identyczna z przyjmowaną najczęściej w literaturze postacią opisu przebiegu procesu suszenia. Opis przebiegu suszenia i nawilżania podzielono na podokresy, wyznaczając punkty graniczne podziału. Wyznaczone równania empiryczne opisują przebiegi nawilżania i suszenia z wysokim współczynnikami korelacji, co świadczy o właściwym doborze równania ogólnego i występujących w nim współczynników stałych.

2. Dzięki przyjęciu ogólnej postaci równań opisujących przebieg suszenia i nawilżania uzyskano możliwość porównania dynamiki tych procesów podczas konwekcyjnego i kontaktowo-konwekcyjnego transportu wilgoci. W przypadku suszenia otrzymano równanie empiryczne ze współczynnikiem $R^2 = 0,84$, a w przypadku nawilżania współczynnik ten wynosił $R^2 = 0,804$. Niższe wartości współczynników korelacji mogły być spowodowane błędami wynikającymi z dokładności oznaczania wilgotności materiału oraz z brakiem całkowitej symetrii procesu suszenia i nawilżania.

3. O zróżnicowaniu szybkości przebiegu transportu masy na drodze konwekcyjnej i kontaktowo-konwekcyjnej świadczą wykładniki potęgowe równań. Dla transportu

konwekcyjnego w pierwszym okresie wykładnik ten wynosi 0,022, a w drugim okresie 0,01. Dla transportu konwekcyjno-kontaktowego wykładniki wynosiły odpowiednio 0,25 i 0,04. Świadczy to o dominującej roli kontaktowego sposobu transportu wilgoci pomiędzy stykającymi się cząstkami o różnych wilgotnościach początkowych.

PIŚMIENNICTWO

- Ledwoń K., Słodczyk E., Suszanowicz D., 1998. Wykorzystanie przesuszonego ziarna jako naturalnego sorbentu w procesach konserwacji i przechowania zbóż. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 454, cz. II.
- Słodczyk E., 1998. Wykorzystanie przesuszonego ziarna jako naturalnego sorbentu w przechowaniu zbóż. Praca doktorska UO, Opole.

MOISTURE TRANSPORT DURING THE STORAGE OF SEED IN SILO PART II. INVESTIGATION OF MASS TRANSPORT BETWEEN THE GRAINS WITH DIFFERENT WATER CONTENT

Abstract. The structure and function of a test plant for measuring of convection and contact components during the moisture transport between the grains with different water content have been presented. The studies of change in moisture versus time for sorbate and sorbent were carried out. The process of moisture transport was described with exponential equations with assumption of symmetry during the wetting and drying process. The prevailing role of contact moisture transport between the grains with different moisture has been proved.

Key words: wheat silo, moisture transport, transport component

Marian Szarycz, Ryszard Kramkowski, Eugeniusz Kamiński, Klaudiusz Jajoszyński, Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, ul. Chelmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław