

## BADANIE WPŁYWU PRĘDKOŚCI CZYNNIKA SUSZĄCEGO NA KORELACJE MIĘDZY WYBRANYMI PARAMETRAMI POWIETRZA I ZIARNA JĘCZMIENIA SUSZONEGO METODĄ NISKOTEMPERATUROWĄ

Marzena Gawrysiak-Witulska, Antoni Ryniecki, Jolanta Wawrzyniak,  
Justyna Banaszak

*Instytut Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego, Akademia Rolnicza w Poznaniu*

**Streszczenie.** Zbadano wpływ prędkości czynnika suszącego na związki korelacyjne między parametrami powietrza w wybranych warstwach masy ziarna jęczmienia a wilgotnością jęczmienia w czasie suszenia niskotemperaturowego w sytuacji gdy wilgotność i temperatura powietrza suszącego zmieniają się w sposób stochastyczny. Ziarno jęczmienia suszono w warstwie o grubości 1,2 m. Wykazano, że liniowa pozorna prędkość czynnika suszącego w masie ziarna w zakresie (0,06–0,10 m·s<sup>-1</sup>) nie ma istotnego wpływu na silne związki korelacyjne między zmianami wilgotności względnej powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych a zmianami zawartości wody w suszonym ziarnie. Potwierdziło to możliwość zbudowania algorytmu automatycznej identyfikacji zakończenia procesu suszenia niskotemperaturowego w grubej nieruchomej warstwie.

**Słowa kluczowe:** suszenie jęczmienia, suszenie niskotemperaturowe, późniwna konserwacja ziarna

### Wykaz oznaczeń

$t$	– temperatura, °C
$u$	– zawartość wody w nasionach, kg·(kg s.m.) <sup>-1</sup>
$\varphi$	– wilgotność względna powietrza, %
$\rho$	– współczynnik korelacji
$\tau$	– czas, h

### Wprowadzenie

Ziarno jęczmienia jest najważniejszym surowcem do produkcji słodu piwowarskiego. Zebrane z pola pozostaje żywym organizmem, w którym zachodzą procesy życiowe związane z przemianą materii oraz następuje w nim rozwój pleśni i innych mikroorganizmów. W celu bezpiecznego przechowywania masę ziarna należy po zbiorze jak najszybciej doprowadzić do stanu anabiozy, ograniczając procesy życiowe poprzez zmniejszenie wilgotności oraz obniżenie temperatury. Począwszy od 2004 roku skup interwencyjny zbóż

prowadzony przez Agencję Rynku Rolnego rozpoczyna się od listopada każdego roku tak jak w innych krajach Unii Europejskiej. Wymusza to w dużym stopniu suszenie i przechowywanie surowców roślinnych w gospodarstwach producentów (w ostatnich latach takiemu przechowywaniu podlegało około 66% rocznej produkcji zbóż [Kisiel 1996; Łukasiewicz 1998]). Straty jakościowe ziarna zbóż w Polsce powstałe na skutek złego przechowywania dotyczą szacunkowo ponad połowy masy zbieranego ziarna [Szymański 2002]. Jednym ze sposobów konserwacji ziarna jęczmienia w gospodarstwach producentów jest jego konwekcyjne suszenie w miejscu składowania nazywane suszeniem niskotemperaturowym. Suszenie to trwa od kilku do kilkunastu dni, w zależności od potencjału suszącego powietrza atmosferycznego w okresie późnym, w różnych latach. Dostępne na rynku urządzenia pomiarowe-kontrolne nadzorujące proces niskotemperaturowego suszenia jęczmienia nie posiadają możliwości automatycznej identyfikacji zakończenia procesu. Ryniecki i in. [2004] zaproponowali metodę identyfikacji zakończenia suszenia niskotemperaturowego nasion rzepaku. Jako funkcję przeliczeniową wykorzystali równanie wilgotności równowagowej nasion rzepaku Halseya zalecane przez normy amerykańskie (ASAE Standards 2000). Wilgotność nasion w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego obliczana jest na podstawie funkcji przeliczeniowej oraz mierzonych na bieżąco temperatury i wilgotności względnej powietrza w wymienionej warstwie nasion. Opracowanie równania przeliczeniowego niezbędnego w automatycznej identyfikacji zakończenia suszenia ziarna jęczmienia wymaga zbadania zależności między rozkładem temperatury i wilgotności względnej powietrza wzdłuż drogi przepływu powietrza suszącego, a trudno mierzalną wilgotnością ziarna suszonego metodą niskotemperaturową.

## **Cel i zakres pracy**

Celem badań było ustalenie korelacji między temperaturą i wilgotnością względną powietrza w wybranych warstwach masy ziarna jęczmienia a wilgotnością jęczmienia w czasie suszenia dla różnej prędkości przepływu czynnika suszącego przez grubą nieruchomą warstwę ziarna w typowym dla praktyki zakresie zmian.

## **Stanowisko badawcze i materiał**

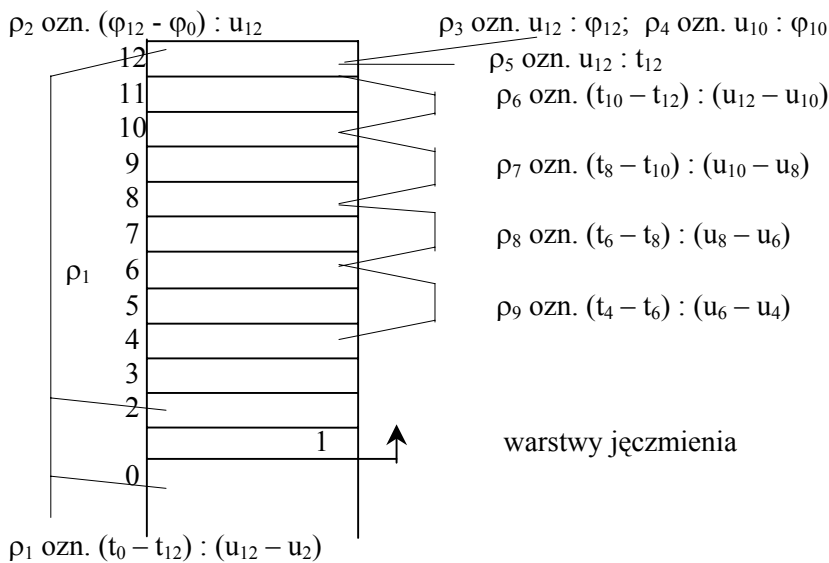
Niskotemperaturowe suszenie ziarna jęczmienia prowadzono w specjalnie skonstruowanej i zbudowanej suszarce laboratoryjnej [Gawrysiak-Witulska, Ryniecki 2001]. Materiałem doświadczalnym było świeżo zebrane z pola ziarno jęczmienia pochodzące ze zbiorów w 2005 roku. Przed doświadczeniem jęczmień nawilżano poprzez zraszanie wodą o określonej masie i pozostawiono w pomieszczeniu o temperaturze 8°C na okres 24 h. Po tym zabiegu wilgotność początkowa ziarna w kolejnych doświadczeniach wynosiła od 18 do 20%.

Ziarno jęczmienia w przeprowadzonych doświadczeniach suszono niskotemperaturowo w warstwie o grubości 1,2 m. Wykonano 6 doświadczeń. Liniowa prędkość przepływu powietrza przez suszoną warstwę w 3 doświadczeniach wynosiła 0,08 [m·s<sup>-1</sup>], natomiast w 3 pozostałych 0,06 [m·s<sup>-1</sup>]. Czas trwania suszenia wynosił od 79-103 godzin. Wilgotność względna i temperatura powietrza zasysanego przez wentylator zmieniały się w sposób

przypadkowy jak w typowym procesie suszenia niskotemperaturowego. Powietrze suszące czerpano z zewnątrz budynku. Aby nie nastąpiło przypadkowe nawilżenie ziarna zastosowano najprostszy elektroniczny humidostat sterujący podgrzewaczem powietrza, który czuwał, aby wilgotność względna powietrza wdmuchiwanego do masy ziarna nie przekroczyła 53%. Zamontowany system akwizycji danych zbierał dane na temat zmian wilgotności i temperatury powietrza oraz ziarna.

## Metody

Związki korelacyjne badano pomiędzy następującymi zbiorami zmiennych: (a) temperatura ziarna i powietrza w miejscach pomiarowych, (b) różnica temperatury między warstwami suszonego ziarna, (c) zawartość wody w warstwach ziarna, w których mierzono temperaturę, (d) różnica zawartości wody między warstwami ziarna, (e) wilgotność względna powietrza w miejscach pomiarowych, (e) różnica wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z komory suszenia.



Rys. 1. Schemat warstw jęczmienia z naniesionymi symbolami współczynników korelacji  $\rho_1 \div \rho_9$

Fig. 1. Barley layer diagram with marked symbols of correlation coefficients  $\rho_1 \div \rho_9$

Współczynniki korelacji wyznaczano korzystając z programu Microsoft Excel (wersja 7.0) jako zależności pomiędzy dwoma zbiorami parametrów  $p_1$  i  $p_2$  skalowanymi niezależnie od jednostek pomiarowych, wyrażające ilorz kowariancji dwóch zbiorów danych i iloczynu odchyłeń standardowych dla tych zbiorów:

$$\rho_{p_1,p_2} = [\text{Cov}(p_1,p_2)] / (\sigma_{p_1} \cdot \sigma_{p_2}) \quad (1)$$

gdzie:

$\text{Cov}(p_1,p_2)$  – kowariancja dwóch zbiorów parametrów  $p_1$  i  $p_2$ ;

$\sigma_{p_1}, \sigma_{p_2}$  – odchylenia standardowe dla zbiorów parametrów  $p_1$  i  $p_2$ .

## Wyniki i dyskusja

W tabeli 1 przedstawiono zakresy temperatur i wilgotności powietrza suszącego wprowadzanego do komory suszenia w poszczególnych doświadczeniach. Jak wynika z przedstawionych danych podczas prowadzonych badań temperatura powietrza suszącego wprowadzanego do komory wahała się między 18-28°C, natomiast wilgotność względna powietrza suszącego od 22 do 53%.

Tabela 1. Zakres temperatur i wilgotności powietrza suszącego  
Table 1. Range of drying air temperature and humidity

Doświadczenie	Pozorna liniowa prędkość przepływu powietrza [m·s <sup>-1</sup> ]	Temperatura powietrza suszącego [°C]	Wilgotność powietrza suszącego [%]
1	0,08	19-22	22-34
2		18-24	29-50
3		19-28	43-63
4	0,06	20-24	32-47
5		19-25	27-44
6		18-24	32-53

Na rysunku 1 przedstawiono oznaczenia dziewięciu najsilniejszych związków korelacyjnych pomiędzy parametrami ziarna i powietrza, a ich wartości liczbowe zebrano w tabeli 2. Przedstawiono je w zależności od zastosowanej pozornej liniowej prędkości przepływu powietrza przez warstwę suszonego jęczmienia. Współczynniki korelacji pozwalają stwierdzić, czy dwa zakresy danych zmieniają się w podobny sposób. Wcześniejsze wykonane badania dla zastosowanej prędkości przepływu powietrza 0,1 [m·s<sup>-1</sup>], wykazały największe wartości współczynników korelacji między zmianami wilgotności względnej powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych a zmianami zawartości wody w górnej warstwie nasion ( $\rho_3$  i  $\rho_4$ ).

Wartość średnia  $\rho_3$  dla trzech doświadczeń wynosiła 0,976 przy niskim odchyleniu standardowym, równym 0,012. Wartość  $\rho_4$  wynosiła 0,98 przy odchyleniu standardowym 0,013 [Gawrysiak- Witulska, Ryniecki 2006]. W przeprowadzonych doświadczeniach dla prędkości 0,8 i 0,6 m·s<sup>-1</sup> korelacje  $\rho_3$  i  $\rho_4$  były także bardzo wysokie. W przypadku zastosowania prędkości 0,08 m·s<sup>-1</sup>, wartość średnia  $\rho_3$  dla trzech doświadczeń wynosiła 0,916 przy odchyleniu standardowym, równym 0,082 natomiast  $\rho_4$  wynosiła 0,986 przy niskim odchyleniu standardowym 0,010. Wartości średnie tych korelacji obliczone dla danych otrzymanych podczas suszenia z pozorną liniową prędkością przepływu powietrza 0,06

Badanie wpływu prędkości...

[m·s<sup>-1</sup>], wynosiły odpowiednio  $\rho_3$  - 0,971 przy odchyleniu standardowym równym 0,014 oraz  $\rho_4$  - 0,983 przy odchyleniu standardowym 0,014. Wskazuje to na istnienie silnej zależności pomiędzy zawartością wody w poszczególnych warstwach jęczmienia a wilgotnością względną powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych. We wszystkich prowadzonych doświadczeniach temperatura powietrza suszącego zmieniała się, jednak korelacje  $\rho_3$  i  $\rho_4$  występowały na wysokim poziomie niezależnie od prędkości przepływu powietrza przez warstwę ziarna. Oznacza to, że nie stwierdzono wpływu zmian temperatury powietrza suszącego na związki korelacyjne między wilgotnością ziarna i wilgotnością względną powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych. Obie te wielkości związane są ze sobą zależnością tworzącą tzw. krzywe desorpcji. Tak wysokie korelacje wskazująca na silną zależność, którą prawdopodobnie będzie można w przyszłości wykorzystać w celu określenia zawartości wody w ziarnie na podstawie pomiaru wilgotności względnej powietrza.

Tabela 2. Wartości współczynników korelacji oznaczonych na rys. 1  
Table 2. Values of correlation coefficients marked on fig. 1

a) pozorna liniowa prędkość przepływu czynnika suszącego: 0,08 [m·s<sup>-1</sup>]  
a) apparent linear flow velocity of drying medium: 0,08 [m·s<sup>-1</sup>]

Korelacja	Doświadczenie 1	Doświadczenie 2	Doświadczenie 3	Średnia	Odchylenie standardowe
$\rho_1$	0,743	0,619	0,732	0,698	0,069
$\rho_2$	0,926	0,954	0,882	0,921	0,037
$\rho_3$	0,948	0,822	0,977	0,916	0,082
$\rho_4$	0,975	0,993	0,990	0,986	0,010
$\rho_5$	-0,176	0,534	0,135	0,164	0,356
$\rho_6$	0,796	0,921	0,924	0,880	0,073
$\rho_7$	0,875	0,935	0,938	0,916	0,036
$\rho_8$	0,918	0,909	0,948	0,925	0,020
$\rho_9$	0,934	0,864	0,914	0,904	0,036

b) pozorna liniowa prędkość przepływu czynnika suszącego: 0,06 [m·s<sup>-1</sup>]  
b) apparent linear flow velocity of drying medium: 0,06 [m·s<sup>-1</sup>]

Korelacja	Doświadczenie 4	Doświadczenie 5	Doświadczenie 6	Średnia	Odchylenie standardowe
$\rho_1$	0,468	0,582	0,500	0,517	0,059
$\rho_2$	0,962	0,944	0,950	0,952	0,009
$\rho_3$	0,973	0,984	0,956	0,971	0,014
$\rho_4$	0,995	0,985	0,968	0,983	0,014
$\rho_5$	-0,151	-0,322	-0,262	-0,245	0,087
$\rho_6$	0,914	0,944	0,957	0,938	0,022
$\rho_7$	0,979	0,956	0,978	0,971	0,013
$\rho_8$	0,956	0,962	0,885	0,934	0,043
$\rho_9$	0,936	0,960	0,933	0,943	0,015

Wysokie wartości współczynników korelacji zanotowano także między różnicami temperatury i zawartości wody w 10 i 12 warstwie ziarna o grubości 1,0 m i 1,2 m ( $\rho_6$ ,  $\rho_7$ ,  $\rho_8$  i  $\rho_9$ ). Jest to zrozumiałe ponieważ intensywniejszemu odparowaniu wody z danej warstwy ziarna musi towarzyszyć większe obniżanie temperatury ziarna i powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych.

## Wnioski

1. Wartości współczynników korelacji między zmianami wilgotności względnej powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych a zmianami zawartości wody w nieruchomej warstwie ziarna jęczmienia o grubości 1,2 m są wysokie niezależnie od zastosowanej poziomej liniowej prędkości przepływu powietrza przez suszoną warstwę (w typowym dla praktyki zakresie od 0,06 do 0,10 m·s<sup>-1</sup>).
2. Wysokie wartości współczynników korelacji między zmianami wilgotności względnej powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych a zmianami zawartości wody w ziarnie jęczmienia suszonym metodą niskotemperaturową, niezależne od prędkości czynnika suszącego, potwierdzają możliwość opracowania algorytmu automatycznej identyfikacji frontu suszenia.

## Bibliografia

- Gawrysiak-Witulska M., Ryniecki A.** 2001. Korelacje między wybranymi parametrami powietrza i ziarna pszenicy suszonej metodą niskotemperaturową w grubej nieruchomej warstwie. *Inżynieria Rolnicza* nr 10(30). s. 135-143.
- Gawrysiak-Witulska M., Ryniecki A.** 2006. Związki korelacyjne między wybranymi parametrami powietrza i ziarna jęczmienia suszonego metodą niskotemperaturową w grubej nieruchomej warstwie. *Inżynieria Rolnicza* nr 7(82). s. 173-180.
- Kaleta A.** 1996. Modelowanie procesu konwekcyjnego suszenia ziarna w silosach – rozprawa habilitacyjna. Fundacja „Rozwój SGGW”. Warszawa. ISBN 83-86980-03-6.
- Kisiel.** 1996. Rynek zbóż. Raporty rynkowe MRiGŻ. Nr 11. Warszawa.
- Łukasiewicz M.** 1998. Wpływ wybranych czynników na proces przechowywania ziarna w silosach metalowych w kontrolowanej atmosferze dwutlenku węgla. Praca doktorska. IBMER. Warszawa
- Nellist M.E.** 1998. Bulk storage drying in theory and practice. *Journal of the Royal Agricultural Society of England*. Nr 159. s. 120-135.
- Ryniecki A., Gawrysiak-Witulska M.** 2005. Automatyczna identyfikacja zakończenia procesu suszenia nasion rzepaku w grubej nieruchomej warstwie. *Inżynieria Rolnicza* nr 5(60). s. 313-322.

Badania finansowane przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji. Grant nr 2 P06T 062 28.

## **TESTING THE INFLUENCE OF VELOCITY OF DRYING MEDIUM ON CORRELATION BETWEEN SELECTED PARAMETERS OF AIR AND BARLEY GRAIN DRIED USING LOW-TEMPERATURE METHOD**

**Summary.** Effect of drying medium velocity on correlations between air parameters in the selected layers of barley grain mass and barley moisture during low-temperature drying process were tested when moisture and drying air temperature changed in a stochastic way. Barley grain was dried in a layer with a thickness of 1.2 m. It was demonstrated that linear apparent velocity of drying medium in grain mass within ( $0.06-0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) had no significant effect on strong correlations between changes of air relative humidity in space between grains and changes of water content in dried grain. This had confirmed the possibility of developing an algorithm of the automatic identification of drying endpoint in low-temperature drying process in thick stationary layer.

**Key words:** barley drying, low-temperature drying, post-harvest grain maintenance

**Adres do korespondencji:**

Marzena Gawrysiak-Witulska; e-mail: wima@au.poznan.pl  
Instytut Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego  
Akademia Rolnicza w Poznaniu  
ul. Wojska Polskiego 28  
60-637 Poznań