

Marzena Gawrysiak-Witulska, Antoni Ryniecki, Jolanta Wawrzyniak,
Małgorzata Mocek
Instytut Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego
Akademia Rolnicza w Poznaniu

KORELACJE MIĘDZY WYBRANYMI PARAMETRAMI POWIETRZA I ZIARNA KUKURYDZY SUSZONEGO METODĄ NISKOTEMPERATUROWĄ

Streszczenie

Celem badań była analiza niskotemperaturowego suszenia ziarna kukurydzy podczas suszenia dwuetapowego oraz ustalenie współczynników korelacji między temperaturą i wilgotnością względną powietrza w warstwach masy ziarna a wilgotnością kukurydzy podczas trwania procesu. Znalezienie największych współczynników korelacji między badanymi wielkościami fizycznymi ma w konsekwencji umożliwić opracowanie algorytmu automatycznej identyfikacji zakończenia suszenia. Badania prowadzono w specjalnie zbudowanym stanowisku laboratoryjnym umożliwiającym dwuetapowe suszenie ziarna kukurydzy. Wykazano, że opracowanie algorytmu automatycznej identyfikacji zakończenia suszenia umożliwi silna korelacja między zmianami wilgotności względnej powietrza w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego a zmianami zawartości wody w górnej warstwie.

Słowa kluczowe: suszenie niskotemperaturowe, dwuetapowe suszenie kukurydzy, późniwna konserwacja ziarna

Wykaz oznaczeń

- t – temperatura, [°C, K],
- u – zawartość wody w nasionach, [kg/(kg s.m.)],
- φ – wilgotność względna powietrza, [%],
- ρ – współczynnik korelacji,
- τ – czas, [s, h].

Wprowadzenie

Ziarno kukurydzy po zbiorze posiada wilgotność rzędu 30%. Bywa jednak, że producenci są zmuszeni zbierać ziarno kukurydzy o wilgotności rzędu 40%, tak jak miało to miejsce w 2004 roku. Tak duża wilgotność ziarna wymaga natychmiastowej jego konserwacji. Najpopularniejszą metodą konserwacji jest suszenie. Aby prawidłowo zabezpieczyć ziarno należy je wysuszyć do wilgotności poniżej 15% i schłodzić do temperatury niższej niż 10°C. Suszenie kukurydzy można prowadzić metodą wysokotemperaturową lub dwuetapowo, wykorzystując w drugim etapie, oszczędną technikę niskotemperaturową. Podczas dwuetapowego suszenia kukurydzy, ziarno suszone jest wysokotemperaturowo do wilgotności około 20%. W celu podniesienia sprawności procesu w drugim etapie, ziarno kukurydzy, po przetransportowaniu do silosu lub magazynu płaskiego i kilku godzinach leżakowania, suszone jest metodą niskotemperaturową. Wprowadzenie w drugim etapie suszenia niskotemperaturowego pozwala efektywnie wykorzystać zgromadzone wcześniej w ziarniakach ciepło. Taki sposób suszenia kukurydzy wg poradników dla farmerów amerykańskich jest bardzo korzystny ze względu na podwyższenie wydajności suszarki wysokotemperaturowej do 50% i zmniejszenie kosztów suszenia o około 25%. Ponadto zabieg ten zmniejsza łamliwość okrywy ziarniaków i lepiej zachowuje naturalny kolor wysuszonej kukurydzy [Praca zbiorowa 1988].

Suszenie niskotemperaturowe polega na przedmuchiwanii grubej nieruchomej warstwy ziarna powietrzem o temperaturze zbliżonej do temperatury otoczenia [Kaleta 1996]. W typowym jednoetapowym suszeniu grubej nieruchomej warstwy podstawowych zbóż metodą niskotemperaturową, przepływ wilgoci od ziarniaków do powietrza ma miejsce zasadniczo tylko w warstwie o stosunkowo niewielkiej grubości zwanej strefą suszenia lub frontem suszenia [Ryniecki, Gawrysiak-Witulska 2002]. Strefa suszenia powoli przesuwa się zgodnie z kierunkiem ruchu powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych. Przepływające powietrze przed strefą suszenia posiada wilgotność względną niższą od wilgotności równowagowej. Gdy w strefie suszenia wilgotność względna powietrza zwiększy się do poziomu wilgotności równowagowej, wilgoć przestaje przepływać od ziarniaków do powietrza. Taka sytuacja ma miejsce w warstwach za strefą suszenia. Oznacza to, że w typowym jednoetapowym suszeniu metodą niskotemperaturową wilgotność ziarna w warstwach powyżej strefy suszenia utrzymuje się na poziomie zbliżonym do wilgotności początkowej.

Suszenie niskotemperaturowe trwa kilka dni i wiąże się z ryzykiem zepsucia ziarna. W związku z tym istnieje konieczność monitorowania stanu ziarna i pełnej automatyzacji procesu suszenia. Istniejące urządzenia kontrolno – pomiarowe do nadzoru procesu niskotemperaturowego suszenia zbóż nie posiadają możliwości automatycznej identyfikacji zakończenia procesu.

Cel i zakres pracy

Celem badań była analiza niskotemperaturowego suszenia ziarna kukurydzy podczas suszenia dwuetapowego oraz ustalenie współczynników korelacji między temperaturą i wilgotnością względną powietrza w warstwach masy ziarna a wilgotnością kukurydzy podczas trwania procesu. W czasie suszenia niskotemperaturowego parametry powietrza suszącego zmieniały się w sposób stochastyczny. Znalezienie największych współczynników korelacji między badanymi wielkościami fizycznymi ma w konsekwencji umożliwić opracowanie algorytmu automatycznej identyfikacji zakończenia suszenia.

Stanowisko badawcze i materiał

Badania wykonano dla ziarna kukurydzy, odmiany *Pionier A 37*, zebranego kombajnem w listopadzie 2004 roku w Gospodarstwie Doświadczalnym Złotniki należącym do Akademii Rolniczej w Poznaniu. Wilgotność początkowa ziarna wynosiła 34,5%.

Do suszenia wysokotemperaturowego wykorzystano komorę z podłogą perforowaną o powierzchni 1,44 m² i wysokości 0,23 m. Komorę suszenia niskotemperaturowego o powierzchni 0,071 m² zbudowano z 14 segmentów o całkowitej grubości 1,4 m. Segmenty, ułożone warstwowo można rozłączać w celu pomiaru ubytków wody i wyznaczania zmian zawartości wody w ziarnie w poszczególnych warstwach. Stanowiska badawcze do suszenia wysokotemperaturowego i niskotemperaturowego wyposażono w wentylator z płynną regulacją prędkości obrotowej oraz podgrzewacz z impulsową regulacją mocy, co umożliwiało dokładne sterowanie parametrami wdmuchiwanego powietrza. Temperaturę w warstwach ziarna mierzono przy użyciu termoelementów Cu-Konstantan. Wilgotność względną powietrza mierzono za pomocą sond z czujnikami pojemnościowymi firmy EE-21 Elektronik (Austria). Termoelementy i czujniki wilgotności podłączono do komputerowego systemu akwizycji danych, umożliwiającego rejestrację zmian temperatury i wilgotności względnej powietrza w trakcie prowadzenia doświadczeń.

Metodyka

Ziarno kukurydzy świeżo zebrane z pola kombajnem suszono metodą dwuetapową. W pierwszym etapie powietrze o wysokiej temperaturze 59±2°C wdmuchiwno do stosunkowo cienkiej nieruchomej warstwy o grubości 0,1 m. Suszenie wysokotemperaturowe zakończono po 8 godzinach, gdy wilgotność górnej warstwy wynosiła około 25,0%. Następnie kukurydżę wymieszano, wyznaczono wartość średniej jej wilgotności (17,1%), przesypano do 14 segmentów suszarki niskotemperaturowej

i pozostawiono do leżakowania. Po 5-ciu godzinach leżakowania rozpoczęto drugi etap suszenia metodą niskotemperaturową.

W drugim etapie suszenia kukurydza suszona była w nieruchomej warstwie o grubości 1,4 m. W procesie tym powietrze o temperaturze bliskiej temperaturze otoczenia (od 20 do 27°C), zdolne przejąć parę wodną (wilgotność względna zmieniała się od 25 do 35%), wdmuchiwane było do warstwy ziarna od spodu przez perforowaną podłogę. Wahania temperatury i wilgotności względnej powietrza suszącego wynikały zarówno ze stochastycznych zmian parametrów powietrza atmosferycznego zasysanego przez wentylator jak i zastosowania w układzie regulacji humidostatu, który czuwał by wilgotność względna powietrza wdmuchiwanego do masy ziarna nie zwiększyła się ponad 30%. Pozorna liniowa prędkość przepływu powietrza przez warstwę ziarna we wszystkich doświadczeniach była jednakowa i wynosiła $0,1 \pm 0,005$ m/s. W trakcie trwania procesu suszenia co 10 min rejestrowano temperaturę powietrza suszącego oraz temperaturę ziarna w 6, 8, 10, 12 i 14 warstwie ziarna jak również wilgotność względną powietrza na wlocie do komory suszenia oraz w 12 i 14 warstwie ziarna. Każdego dnia o godzinie 7, 14 i 21 ważono poszczególne segmenty komory suszenia niskotemperaturowego w celu określenia zmian wilgotności ziarna w kolejnych warstwach. Proces suszenia niskotemperaturowego prowadzono do uzyskania przez ziarno w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego (warstwa 14) wilgotności 14%, co nastąpiło po 56 godzinach od rozpoczęcia drugiego etapu suszenia.

W celu powtórzenia drugiego etapu suszenia tj. suszenia niskotemperaturowego kukurydzę przed drugim i trzecim doświadczeniem sztucznie nawilżano, aby nadać jej cechy ziarna wilgotnego. W tym celu ziarno zraszano wodą o określonej masie i pozostawiano w pomieszczeniu o temperaturze 8°C na okres 48h. Po tym zabiegu wilgotność ziarna w doświadczeniach wynosiła od 19,5 do 20%. Umożliwiło to badanie we wszystkich doświadczeniach relacji między parametrami powietrza opuszczającego górne warstwy ziarna kukurydzy a wilgotnością ziarna w typowym zakresie 20-14%. Zależności te opisano za pomocą związków korelacyjnych. Współczynniki korelacji pozwalają stwierdzić, czy dwa zakresy danych zmieniają się w podobny sposób.

Związki korelacyjne badano pomiędzy następującymi zbiorami zmiennych: (a) temperatura ziarna i powietrza w miejscach pomiarowych, (b) różnica temperatury między wybranymi warstwami suszonego ziarna, (c) zawartość wody w warstwach ziarna, w których mierzono temperaturę, (d) różnica zawartości wody między

wybranymi warstwami ziarna, (e) wilgotność względna powietrza w miejscach pomiarowych, (f) różnica wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z komory suszenia. 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 iloraz kowariancji dwóch zbiorów danych i iloczyn odchyleń standardowych dla tych zbiorów:

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

gdzie:

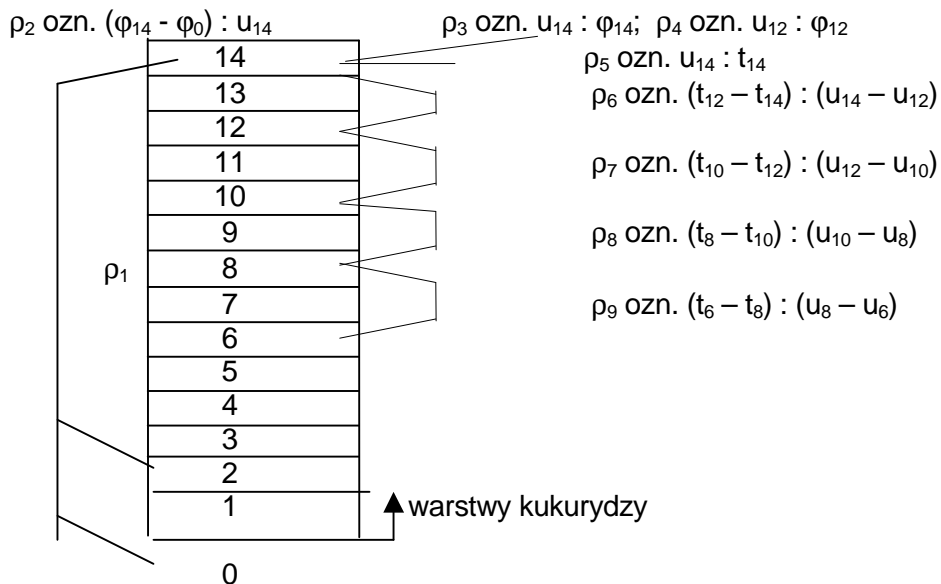
$\text{Cov}(p_1,p_2)$ jest kowariancją dwóch zbiorów parametrów p_1 i p_2 ;

σ_{p_1} , σ_{p_2} są odchyleniami standardowymi dla zbiorów parametrów p_1 i p_2 .

Wyniki i dyskusja

Proces niskotemperaturowego suszenia kukurydzy poprzedzonego suszeniem wysokotemperaturowym i leżakowaniem przebiega inaczej niż w typowym suszeniu jednoetapowym. W obserwowanym doświadczeniu wilgotność ziarna na wszystkich poziomach grubej warstwy o wysokości 1,4 m zmniejszała się już od pierwszych godzin suszenia niskotemperaturowego. W najbardziej interesującej nas warstwie wylotowej dla powietrza suszącego w ciągu pierwszych 8 godzin wilgotność ziarna zmniejszyła się o 1 % (rys. 2) i w kolejnych godzinach systematycznie malała. Analizując wyniki można zauważyć, że wewnątrz całej grubej warstwy ziarna, w tym w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego, wilgotność względna powietrza utrzymuje się poniżej poziomu wilgotności równowagowej powietrza (rys. 3). Jest to spowodowane między innymi tym, że nagrzane do temperatury około 45°C w pierwszym etapie suszenia, ziarniaki kukurydzy o stosunkowo dużej masie oddają ciepło do przepływającego wokół nich powietrza suszącego (o temperaturze około 22°C) zmniejszając jego wilgotność względną. Dodatkowym elementem sprzyjającym przepływowi wilgoci z wewnętrznych do zewnętrznych warstw w każdym pojedynczym ziarniaku kukurydzy i dalej do powietrza suszącego jest to, że temperatura wewnętrznych warstw ziarniaków jest wyższa od temperatury warstw zewnętrznych. Pomiedzy powietrzem suszącym a ziarniakami powstaje gradient temperatury zgodny z kierunkiem dyfuzji wody z kukurydzy, który ułatwia proces suszenia.

Na rys. 1 przedstawiono dziewięć analizowanych, najsilniejszych związków korelacyjnych pomiędzy parametrami ziarna kukurydzy i powietrza. Wyznaczone liczbowe wartości współczynników korelacji zebrano w tabeli 2.

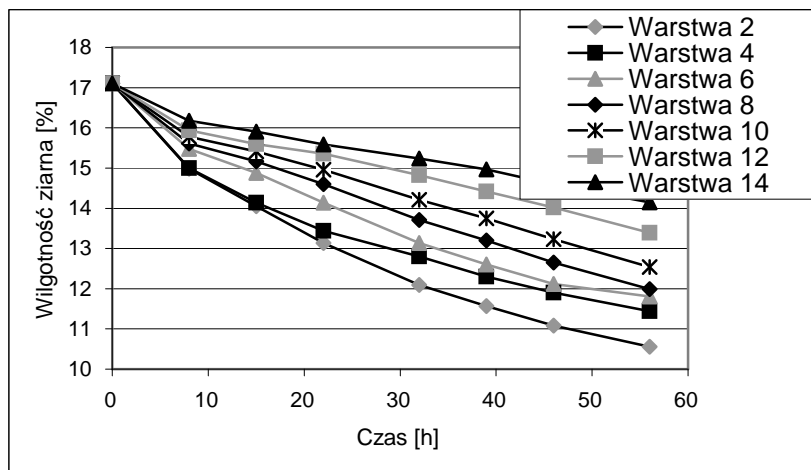


Rys. 1. Schemat warstw kukurydzy w suszeniu niskotemperaturowym z naniesionymi symbolami współczynników korelacji $\rho_1 \div \rho_9$

Fig. 1. Chart of maize layers in low-temperature drying with symbols of correlation coefficients $\rho_1 \div \rho_9$

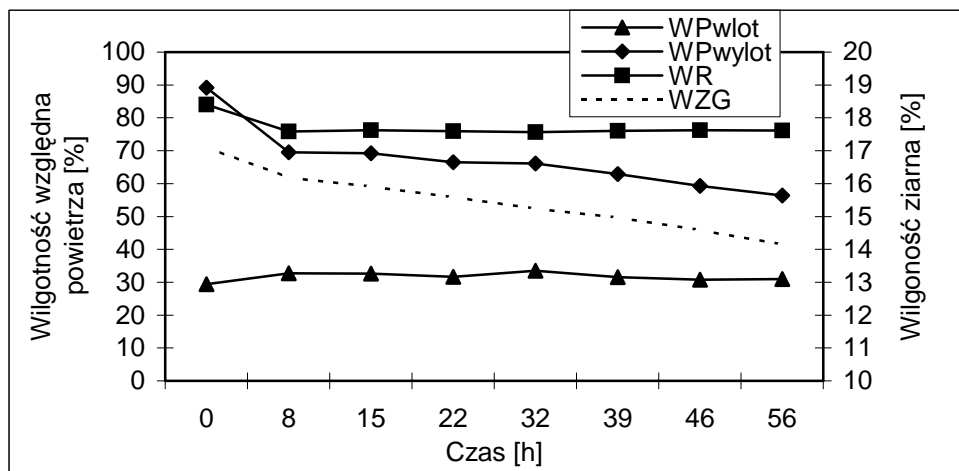
Tabela 2. Wartości współczynników korelacji oznaczonych na rysunku 1
 Table 2. Values of correlation coefficients marked on figure 1

Korelacja	Doświadczenie 1	Doświadczenie 2	Doświadczenie 3	Średnia	Odchylenie standardowe
ρ_1	0,89	0,88	0,89	0,89	0,01
ρ_2	0,96	0,79	0,89	0,88	0,09
ρ_3	0,96	0,97	0,97	0,97	0,01
ρ_4	0,93	0,95	0,94	0,94	0,01
ρ_5	0,68	-0,81	-0,80	-0,31	0,86
ρ_6	-0,05	0,93	0,95	0,61	0,57
ρ_7	0,42	0,92	0,89	0,74	0,28
ρ_8	0,21	0,79	0,89	0,63	0,37
ρ_9	0,98	0,92	0,92	0,94	0,03



Rys. 2. Zmiany wilgotności ziarna kukurydzy w różnych warstwach komory podczas suszenia niskotemperaturowego w doświadczeniu 1

Fig. 2. Changes of moistness of maize grains in various layers of the chamber during low-temperature drying in the experiment 1



Rys. 3. Zmiany wilgotności względnej powietrza w górnej warstwie (WPwylot) na tle zmian wilgotności powietrza suszącego (WPwlot) i wilgotności równowagowej (WR) oraz zmian wilgotności ziarna w górnej warstwie (WZG)

Fig. 3. Changes of relative humidity of air in the upper layer (WPwylot) in comparison with changes of drying air humidity (WPwlot) and equilibrium moisture (WR) and changes of air moisture in the upper layer (WZG)

Największą wartość współczynnika korelacji zanotowano między różnicami temperatury ziarna i zawartości wody w warstwach 6 i 8 (ρ_9) w doświadczeniu 1.

Natomiast we wszystkich doświadczeniach odnotowano wysoki współczynnik korelacji (ρ_3) między zawartością wody w warstwie 14 i wilgotnością względną powietrza w warstwie 14 oraz wilgotnością względną powietrza w warstwie 12 i zawartością wody w tejże warstwie (ρ_4). We wszystkich doświadczeniach współczynniki wynosiły powyżej 0,93. Średnie wartości korelacji (ρ_3) i (ρ_4) wynosiły 0,97 i 0,94 przy odchyleniu standardowym 0,01. Wysokie korelacje wskazują na silną zależność, którą można w przyszłości wykorzystać do celów praktycznych doskonalenia systemów sterowania procesem suszenia niskotemperaturowego

Należy zwrócić uwagę na fakt, że współczynnik korelacji w doświadczeniu 1 między różnicą temperatur w warstwach 12 i 14 oraz różnicą zawartości wody w tych warstwach (ρ_6) posiada niską i w dodatku ujemną wartość w przeciwieństwie do wartości tych współczynników w doświadczeniach 2 i 3. Wartość ujemną należy tłumaczyć tym, że w doświadczeniu 1 ziarno po suszeniu wysokotemperaturowym posiadało temperaturę około 46°C i przedmuchiwane powietrzem o parametrach powietrza atmosferycznego powodowało obniżanie jego temperatury. W doświadczeniach 2 i 3, kiedy ziarno było sztucznie nawilżone jego temperatura podczas suszenia rosła i w tych przypadkach korelacje posiadają wartość dodatnią.

Wnioski:

1. Suszenie niskotemperaturowe ziarna kukurydzy poprzedzone suszeniem wysokotemperaturowym i leżakowaniem różni się od typowego jednoetapowego suszenia ziarna podstawowych zbóż tym, że w pierwszych godzinach suszenia występuje gradient temperatury zgodny z kierunkiem dyfuzji wody z ziarniaków, co ułatwia i przyspiesza proces suszenia.
2. Charakter zmian wilgotności względnej powietrza w górnej warstwie suszarki niskotemperaturowej jest zgodny z przebiegiem zmian wilgotności ziarna kukurydzy w tej samej warstwie. Może to umożliwić automatyczną identyfikację zakończenia drugiego etapu suszenia.
3. Wysoka wartość współczynnika korelacji między zmianami wilgotności względnej powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych a zmianami zawartości wody w ziarnie suszonym metodą niskotemperaturową wskazuje na możliwość opracowania w przyszłości algorytmu automatycznej identyfikacji frontu suszenia.

Bibliografia

Kaleta A. 1996. Modelowanie procesu konwekcyjnego suszenia ziarna w silosach - rozprawa habilitacyjna, Fundacja "Rozwój SGGW", Warszawa.

Praca zbiorowa. 1988. Grain Drying, Handling and Storage Handbook, MWPS-13, Midwest Plan Service, Iowa State University, USA.

Ryniecki A., Gawrysiak-Witulska M. 2002. Automatyczna identyfikacja zakończenia procesu suszenia ziarna pszenicy w grubej nieruchomej warstwie. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. 486, 449-456.

CORELATION BETWEEN CHOSEN PARAMETERS OF AIR AND MAIZE GRAIN DRIED WITH LOW-TEMPERATURE METHOD

Summary

The aim of the research was an analysis of low-temperature drying of maize grain during two-stage drying and determination of correlation coefficients between temperature and relative humidity of air in grain mass layers and moistness of maize during the process. Determination of the highest correlation coefficients between researched physical values is to enable to formulate an algorithm for automatic identification of the end of drying. The research was done in a laboratory station, built for this purpose, allowing a two-stage drying of maize grain. It was proved that development of an algorithm for automatic identification of the end of drying will be allowed thanks to a strong correlation between changes of relative humidity of air in the outlet layer for drying air and changes of water content in the upper layer.

Key words: low-temperature drying, two-stage drying of maize, vacuum preservation of grain