

Dorota Witrowa-Rajchert\*, Anna Fabisiak\*, Jan Stawczyk\*\*, Sheng Li\*\*

\*Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

\*\*Katedra Procesów Cieplnych i Dyfuzyjnych  
Politechnika Łódzka

## WPLYW METODY SUSZENIA I TEMPERATURY PROCESU NA WŁAŚCIWOŚCI HIGROSKOPIJNE SUSZU JABŁKOWEGO

### Streszczenie

Celem badań była analiza właściwości sorpcyjnych jabłek suszonych sublimacyjnie, konwekcyjnie i niskotemperaturowo pod ciśnieniem atmosferycznym. Na właściwości sorpcyjne suszu jabłkowego miała wpływ metoda suszenia. Wyższa temperatura płyty grzejnej w czasie suszenia sublimacyjnego spowodowała wzrost ilości wchłanianej przez materiał pary wodnej. Dla suszu konwekcyjnego nie stwierdzono istotnego wpływu temperatury powietrza na kinetykę adsorpcji pary wodnej. Przebieg kinetyk adsorpcji pary wodnej dla suszy niskotemperaturowych wykazał, że prowadzenie całego procesu w temperaturach ujemnych wpływa na mniejszą zdolność adsorpcji. Zwiększenie temperatury powietrza w drugiej części procesu powodowało znaczne zwiększenie ilości wchłanianej przez susz pary wodnej.

**Słowa kluczowe:** suszenie konwekcyjne, suszenie sublimacyjne, suszenie niskotemperaturowe, właściwości sorpcyjne

### Wstęp

Suszenie żywności w znacznym stopniu ogranicza zakres przemian fizycznych i chemicznych wywołanych wysoką aktywnością wody, ale prowadzi do zmian właściwości materiału roślinnego. Higroskopijny charakter produktów suszonych związany jest ze zdolnością do pochłaniania wody w środowisku wilgotnym. Zdolność adsorpcji pary wodnej jest cechą charakterystyczną danego produktu i zależy od jego struktury i składu chemicznego [Khalloufi i in. 2000].

Przekroczenie krytycznej zawartości wody, odpowiadającej pojemności monowarstwy, prowadzi do niepożądanych zmian w produkcji [Päkkönen i in. 1991].

Określenie tej wartości w przypadku suszy zależy w dużym stopniu od charakteru zachodzących w nim zmian. Zmiany te zależą od metody suszenia oraz parametrów procesowych. Najmniejsze następują w czasie suszenia sublimacyjnego. Suszenie konwekcyjne prowadzi na ogół do znacznej degradacji materiału. Praktycznie niewielka zawartość wody produktów sublimacyjnych zwalnia szybkość reakcji biochemicznych, co prowadzi do poprawy cech jakościowych produktu końcowego. W wyniku suszenia konwekcyjnego znaczna zmiana właściwości fizycznych, w tym powierzchni przejawia się dużym skurczem materiału, co utrudnia migrację wody [Päkkönen i in. 1991].

Można przypuszczać, że metoda suszenia niskotemperaturowego w układzie zamkniętym z pompą ciepła, charakteryzująca się usuwaniem wody z zamrożonego materiału w stosunkowo niskich temperaturach za pomocą powietrza o bardzo małej wilgotności [Żyła i Witrowa-Rajchert 2004], będzie dawała produkt o właściwościach lepszych niż susz konwekcyjny.

### **Cel i zakres badań**

Celem badań była analiza właściwości sorpcyjnych suszonych jabłek, otrzymanych w wyniku suszenia konwekcyjnego, sublimacyjnego i niskotemperaturowego pod ciśnieniem atmosferycznym. Jednocześnie badano wpływ zróżnicowanej temperatury procesu usuwania wody na skurcz, gęstość oraz właściwości higroskopijne produktu.

### **Metodyka**

Surowcem do badań były jabłka odmiany Idared. Materiał krojono w kostki o boku 1 cm i poddano suszeniu.

Suszenie konwekcyjne prowadzono w suszarce laboratoryjnej, stosując temperaturę powietrza 70 i 60°C oraz prędkość przepływu powietrza wzdłuż warstwy materiału 2 m/s. Suszenie sublimacyjne wykonano w suszarce Christ LOC-1m firmy ALPHA1-4, w której kontaktowo ogrzewano próbki w temperaturze półki 30 oraz 40°C pod ciśnieniem 63 Pa (przed suszeniem materiał zamrożono konwekcyjnie przy użyciu powietrza o temperaturze -20°C przez 24 h). Suszenie niskotemperaturowe polegało na usuwaniu wody z zamrożonego materiału pod ciśnieniem atmosferycznym w układzie z pompą ciepła [Żyła i Witrowa-Rajchert 2004], stosując stałą temperaturę powietrza -12 i -4°C oraz zmienną temperaturę -15/15°C (początkowo prowadzono proces w temperaturze powietrza -15°C, a następnie w +15°C). Pompa ciepła była wykorzystywana do schładzania wilgotnego powietrza poniżej temperatury punktu lodu/rosy i usuwania wilgoci z obiegu.

Kinetykę adsorpcji pary wodnej oznaczano używając stanowiska zapewniającego ciągły pomiar zmian masy próbek. Kinetykę adsorpcji pary wodnej prowadzono przy aktywności wody środowiska 1, w temperaturze 25°C przez 24 h. Próbę do badań kinetycznych stanowiły 4 kostki suszonego jabłka. Przed każdym doświadczeniem próby dosuszano w suszarce próżniowej w temperaturze 70°C, pod ciśnieniem 0,27 kPa przez 9 h.

Pomiar objętości oznaczano metodą wyporu, wykorzystując różnice sił ciężkości i siły wyporu przy zastosowaniu wagi AXIS. Badaną kostkę mocowano na wysięgniku wagi, ważono, po czym zanurzano kostkę w glicerynie i ponownie ważono. Do obliczeń brano średnią z trzech wskazań wagi. Objętość obliczano jako:

$$V = \frac{m_o - w}{\rho};$$

gdzie:

- $m_o$  – masa początkowa kostki, g;
- $w$  – wskazania wagi, g;
- $\rho$  – gęstość gliceryny, 1,264 g/cm<sup>3</sup>.

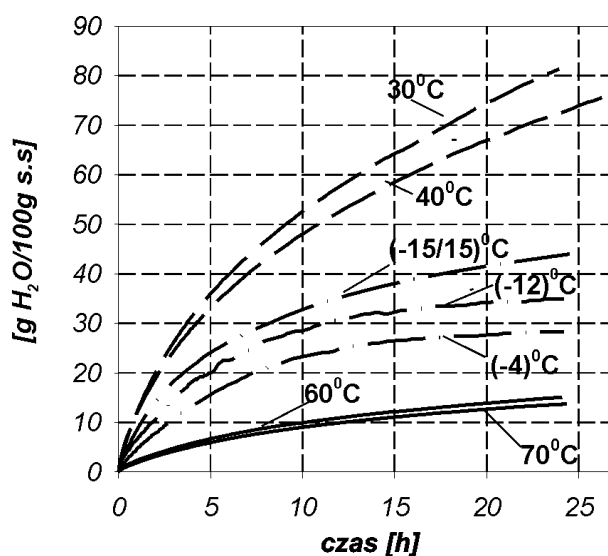
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów objętości kostek przed i po suszeniu obliczano skurcz.

## Wyniki badań

Właściwości higroskopijne suszy zależały od zastosowanej metody usuwania wody i temperatury procesu. Usunięcie wody w wyniku suszenia konwekcyjnego powoduje usztywnienie powierzchni suszonego materiału, co utrudnia proces chłonięcia pary wodnej [Witrowa–Rajchert 1999]. Ilości zaadsorbowanej wody w temperaturze 60 i 70°C różniły się nieznacznie, osiągając zawartość wody po 24 h procesu odpowiednio 15,7 i 13,2 g/100 g s.s (rys. 1).

Podczas suszenia liofilizacyjnego, w miejscach sublimacji kryształów lodu powstają puste pory [Moriera i in. 2000]. Porowata struktura wpływa na znaczną intensyfikację sorpcji pary wodnej. W temperaturach płyty grzejnej 30 i 40°C 100 g s.s. absorboowało w ciągu 24 h odpowiednio 81,3 i 73,4 g wody, czyli około pięciokrotnie więcej niż susz konwekcyjny (rys. 1). Temperatura usuwania wilgoci w czasie suszenia sublimacyjnego miała więc większy wpływ na przebieg procesu niż w przypadku suszenia konwekcyjnego. Podobnie jak dla jabłek, również w przypadku badania zdolności adsorpcji wody liofilizowanych truskawek, stwierdzono zmniejszenie ilości wchłanianej wody, gdy stosowano wyższą temperaturę płyty grzejnej w czasie sublimacji [Pääkkönen i in. 1991]. Przebieg kinetyki

sorpcji suszy niskotemperaturowych wskazuje, że charakteryzują się one lepszymi właściwościami higroskopijnymi niż susz konwekcyjny, ale gorszymi od produktu liofilizowanego. Susze niskotemperaturowe adsorbowały 2- 3-krotnie więcej wody niż jabłko suszone konwekcyjnie. Najwięcej wody chłonał materiał otrzymany w warunkach zmiennej temperatury. W czasie tego procesu, początkowo, usuwano wodę w temperaturze  $-15^{\circ}\text{C}$ , co zapewniało uzyskanie usztywnionej matrycy ograniczającej skurcz, a następnie podwyższano temperaturę powietrza do  $+15^{\circ}\text{C}$  i kontynuowano suszenie.



Rys. 1. Kinetyka sorpcji pary wodnej suszonych jabłek

Fig. 1. Kinetics of vapour sorption by dried apples

Otrzymane zależności znalazły potwierdzenie w pomiarach gęstości i skurczu produktów. Znacznym skurczem, dużą gęstością, a co za tym idzie mniejszą porowatością niż pozostałe susze charakteryzowały się susze konwekcyjne, absorbujące najmniej wody (tab. 1).

Susze sublimacyjne, o najmniejszym skurczu wykazywały najlepsze właściwości higroskopijne. Susze niskotemperaturowe, mimo że ich skurcz i gęstość nie różniły się istotnie od odpowiednich wartości produktów otrzymanych metodą konwekcyjną, wchłaniały więcej wody. Może to świadczyć o tym, że nie tylko porowatość decyduje o właściwościach sorpcyjnych materiału, ale również zmiany zachodzące w tkance w czasie usuwania wody. Prawdopodobnie w czasie suszenia niskotemperaturowego związki odpowiedzialne za wchłanianie wody uległy mniejszym zmianom destrukcyjnym niż podczas suszenia konwekcyjnego.

*Tabela 1. Skurcz i gęstość suszu jabłkowego oraz wartości równowagowe i błędy standardowe dopasowania równań opisujących kinetykę zmian zawartości wody (a, b., - doświadczenia oznaczone literami nie różnią się statystycznie istotnie*

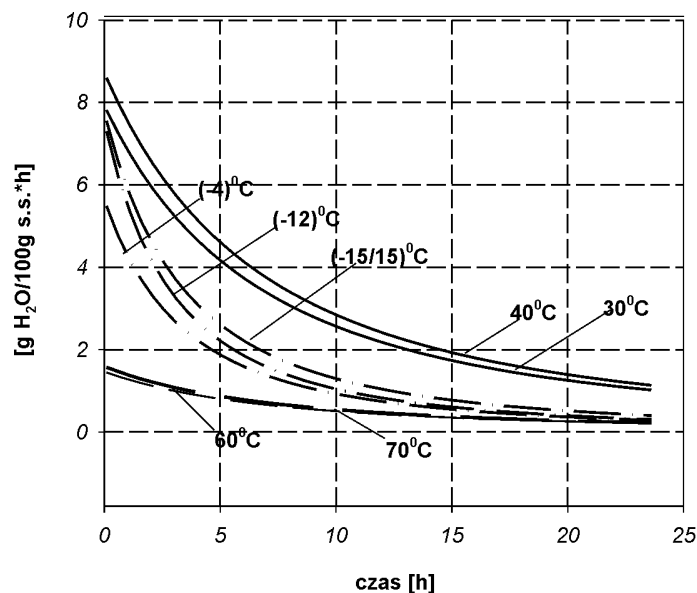
*Table 1. Contraction and density of dried apples, equilibrium values and standard errors of adjustment of equations which describe the kinetics of water content changes*

Rodzaj suszu	gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	skurcz [%]	równowagowa zawartość wody [g/100g s.s]	błąd standardowy
sublimacyjne 30°C	0,1716 <sup>a</sup> ±0,0186	33,7 <sup>a</sup> ±7,1	119,9	1,13
sublimacyjne 40°C	0,1773 <sup>b</sup> ±0,0300	42,8 <sup>b</sup> ±3,1	108,7	1,01
konwekcyjne 60°C	0,3671 <sup>c</sup> ±0,0652	72,8 <sup>c</sup> ±3,5	22,90	0,12
konwekcyjne 70°C	0,4529 <sup>d</sup> ±0,1245	73,2 <sup>d</sup> ±3,3	21,20	0,08
(-4)°C	0,4904 <sup>e</sup> ±0,1185	70,9 <sup>e</sup> ±1,0	37,80	0,58
(-12)°C	0,5448 <sup>f</sup> ±0,0325	72,2 <sup>f</sup> ±4,8	44,60	0,54
(-15/15)°C	0,4715 <sup>g</sup> ±0,0991	66,7 <sup>g</sup> ±9,1	55,10	0,37

Zmiany zawartości wody krzywych suszonych jabłkach opisano równaniami kinetycznymi postaci:

$$u = a + b \left( 1 - \frac{1}{1 + b * c * \tau} \right)$$

Na podstawie tych równań obliczono wartości równowagowe ilości wchłoniętej wody po nieskończenie długim czasie:  $u_{\infty} = a + b$ . Wartości równowagowe oraz błędy standardowe dopasowania krzywych kinetycznych zamieszczono w tabeli 1. Po nieskończenie długim czasie suszenia 100 g suchej substancji suszy sublimacyjnych zaadsorbujecie ponad 100 g wody, suszy konwekcyjnych jedynie ponad 20 g, a około dwukrotnie więcej produktu otrzymanego na drodze suszenia niskotemperaturowego. Różniczkowanie równań opisujących zmiany zawartości wody w suszach w czasie doprowadziło do wykreślenia krzywych szybkości adsorpcji pary wodnej (rys. 2). W zależności od metody usuwania wody, w początkowym okresie w ciągu godziny próbki wchłaniały od 8 do 1,5 g wody/100 g suchej substancji. Proces przebiegał bardzo intensywnie przez pierwsze 5 godzin, w czasie których jego szybkość zmniejszyła się około dwukrotnie, niezależnie od sposobu suszenia. Po 24 h susze sublimacyjne, których zawartość wody najbardziej odbiegała od wartości równowagowych, adsorbowały około 1 g wody/100 g suchej substancji w ciągu godziny. Szybkość wchłaniania pary wodnej dla pozostałych produktów wynosiła około 0,2 dla suszy konwekcyjnych do ok. 0,3-0,4 g wody/(100 g s.s\*h) dla niskotemperaturowych.



Rys. 2. Szybkość adsorpcji pary wodnej suszonych jabłek

Fig. 2. Velocity of vapour sorption by dried apples

## Wnioski

1. Na właściwości sorpcyjne suszu jabłkowego miała wpływ metoda suszenia. Najwyższą higroskopijnością charakteryzowały się susze liofilizowane, najniższą konwekcyjne.
2. Wyższa temperatura płyty grzejnej w czasie suszenia sublimacyjnego spowodowała wzrost ilości wchłanianej przez materiał pary wodnej. Dla suszu konwekcyjnego nie stwierdzono istotnego wpływu temperatury powietrza na kinetykę adsorpcji pary wodnej.
3. Przebieg kinetyk adsorpcji pary wodnej dla suszy niskotemperaturowych wykazał, że prowadzenie całego procesu w temperaturach ujemnych wpływa na mniejszą zdolność adsorpcji. Zwiększenie temperatury powietrza w drugiej części procesu powodowało znaczne zwiększenie ilości wchłanianej przez susz pary wodnej.

## Bibliografia

Khalloufi S., Glasson J., Ratti C. 2000. Water activity of freeze dried mushrooms and berries. C. Agric. Eng., 42(1), 1-13.

Moriera R., Fifueiredo A., Sereno A. 2000. Shrinkage of apple during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technol.*, 18(1, 2), 279-294.

Pääkkönen K., Mattyla M. 1991. Processing, packaging, and storage effects on quality of freeze – dried strawberries. *J. Food Sci.*, 5(56), 1389-1392.

Witrowa-Rajchert D. 1999. Rehydracja jako wskaźnik zmian zachodzących w tkance roślinnej w czasie suszenia. SGGW, Warszawa.

Żyła R., Witrowa-Rajchert D. 2004. Niskotemperaturowe suszenie produktów spożywczych pod ciśnieniem atmosferycznym. *Inż. Apar. Chem.*, 43(1), 3-6.

## **INFLUENCE OF THE METHOD OF DRYING AND PROCESS TEMPERATURE ON HYGROSCOPIC PROPERTIES OF DRIED APPLES**

### **Summary**

The aim of the study is an analysis of sorptive properties of apples dried by sublimation, convection and in low temperature under atmospheric pressure. The drying method influences sorptive properties of dried apples. Higher temperature of the heating plate during sublimation drying caused an increased amount of vapour absorbed by material. Air temperature did not have an important influence on kinetics of vapour absorption for convection dried apples. The kinetics of vapour absorption for low-temperature dried apples proved that when the process takes place in negative temperatures the ability to absorb is lower. An increase of air temperature in the second part of the process caused a considerable increase of the amount of vapour absorbed by dried apples.

**Key words:** Convection drying, sublimation drying, low-temperature drying, sorptive properties