

MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA MODELU PIERWSZEGO OKRESU
SUSZENIA DO OKREŚLANIA ZMIENNOŚCI PRZEBIEGU SKURCZU
SUSZARNICZEGO PODCZAS SUSZENIA WARZYW

A. Kaleta, K. Górnicki

Katedra Podstaw Inżynierii, Wydział Inżynierii Produkcji SGGW
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa
e-mail: gornicki@alpha.sggw.waw.pl

Streszczenie. Pokazano możliwość wykorzystania modelu pierwszego okresu suszenia do określania zmienności przebiegu skurczu suszarniczego podczas suszenia warzyw. W modelu tym występuje parametr N , którego wartość zależy od tego jak materiał kurczy się podczas suszenia. W pracy przyjęto, że parametr ten zmienia się podczas trwania procesu. Do empirycznej weryfikacji modelu posłużyły pomiary krzywej suszenia pojedynczych cząstek korzenia pietruszki o grubości 3 mm i plasterków porów o grubości 8 mm suszonych w warunkach konwekcji naturalnej w temperaturze 40-80°C. Z uzyskanych rezultatów wynika, że uogólniony model kinetyki suszenia warzyw ze zmiennym parametrem N dokładniej opisuje proces suszenia badanych warzyw w pierwszym okresie niż model ze stałym N . Stwierdzenie to dotyczy cząstek korzenia pietruszki w całym zakresie temperatur suszącego powietrza i plasterków porów w temperaturze 40 i 50°C. Możliwość wykorzystania omawianego modelu do określania zmienności przebiegu skurczu suszarniczego podczas suszenia warzyw, których cząstki są bryłą zwartą została potwierdzona.

Słowa kluczowe: suszenie, skurcz, matematyczne modelowanie, warzywa.

WSTĘP

Zjawisko skurczu rozpoczyna się praktycznie wraz z rozpoczęciem procesu suszenia warzyw. Podczas suszenia tych produktów będących materiałami kapilarno-porowatymi występują trzy rodzaje deformacji: deformacja związana ze zmianą zawartości wody (zasadnicza), deformacja związana ze zmianą temperatury i deformacja mechaniczna spowodowana pojawieniem się napięć wewnętrznych [7]. Na wielkość skurczu wpływają warunki prowadzenia procesu suszenia

takie, jak temperatura i prędkość przepływu powietrza [8,13]. Początkowa struktura materiału, budowa morfologiczna tkanki roślinnej i jej skład chemiczny determinują zmiany wymiarów i kształtu [9,11]. Duża zawartość nierozpuszczalnych składników w materiale ogranicza skurcz, a związki rozpuszczalne sprzyjają zmianom objętości i kształtu. Jednocześnie charakter przebiegu skurczu suszarniczego zmienia się podczas suszenia. W początkowym okresie warstwy powierzchniowe nie różnią się znacznie od warstw wewnętrznych i można przyjąć, że ilość odparowanej wody odpowiada zmianie objętości [15]. Dalszy przebieg suszenia powoduje, że powierzchnia suszonego materiału usztywnia się, zaś skurcz nie odpowiada ilości odparowanej wody [10]. Jednocześnie we wnętrzu materiału mogą tworzyć się szczeliny [4].

Przebieg skurczu suszarniczego jest zjawiskiem na tyle skomplikowanym, że do chwili obecnej nie została opracowana w satysfakcjonujący sposób teoria skurczu suszarniczego materiałów biologicznych. Skurcz opisuje się w związku z tym najczęściej za pomocą formuły empirycznej, której parametry wyznacza się na podstawie pracochłonnych i często obciążonych dużym błędem pomiarów. Zestawienie proponowanych w literaturze modeli skurczu suszarniczego produktów rolniczych zostało przedstawione m.in. w [6].

Celem pracy jest pokazanie możliwości wykorzystania modelu pierwszego okresu suszenia [12] do określania zmienności przebiegu skurczu suszarniczego podczas suszenia warzyw.

MATERIAŁ I METODY

Uogólniony model kinetyki suszenia warzyw i owoców w pierwszym okresie suszenia sformułowany w pracy [12] zakłada, że głównym czynnikiem powodującym, iż szybkość suszenia tych produktów maleje w pierwszym okresie jest zmienność powierzchni wymiany ciepła i masy. W modelu [12] przyjęto, że powierzchnia ta zmienia się wraz ze zmianą zawartości wody, a więc zmienia się w czasie trwania procesu suszenia zgodnie z zależnością:

$$A(u) = A_0 \left[(1-b) \frac{u}{u_0} + b \right]^{\frac{2}{3n}} \quad (1)$$

gdzie wartość parametru b można oszacować na podstawie formuły:

$$b = \frac{0,85}{1 + u_0} \quad (2)$$

W związku z tym zmiany zawartości wody w czasie suszenia opisywane są w tym modelu za pomocą zależności:

$$u(\tau) = u_0 \left[\frac{1}{1-b} \left(1 - \frac{1-b}{Nu_0} k\tau \right)^N - \frac{b}{1-b} \right] \quad (3)$$

gdzie

$$N = \frac{3n}{3n-2} \quad (4)$$

Wartość parametru N należy wyznaczyć empirycznie w zakresie:

$$1 \leq N \leq 3 \quad (5)$$

Zależy ona od tego, jak materiał kurczy się podczas suszenia. Ze wzoru (4) wynika na przykład, że gdy $n = 1$ (wtedy $N = 3$), to próbka materiału nie zmienia swego kształtu podczas suszenia, co oznacza, że we wszystkich trzech wymiarach kurczy się w takim samym stopniu.

W pracy [3] przedstawiono metodę wyznaczania tego parametru dla ciał o kształcie prostopadłościanu w sposób analityczny uzależniając go od wymiarów początkowych i końcowych (po zakończeniu suszenia) suszonego ciała. Model ten został zweryfikowany empirycznie dla krajanki buraka ćwikłowego. W niniejszej pracy, biorąc natomiast pod uwagę, że charakter przebiegu skurczu suszarniczego warzyw z reguły zmienia się podczas suszenia, przyjęto w uogólnionym modelu kinetyki suszenia warzyw zmienny w czasie trwania procesu parametr N . Wartość tego parametru dobierano tak, aby dla każdego punktu pomiarowego na krzywej suszenia błąd względny zawartości wody obliczonej na podstawie modelu był najmniejszy. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia dla stałych wartości parametru N , który przyjmował kolejno wartości: 1, 1,5, 2, 2,5 i 3. Założono, że model (3) poprawnie opisuje krzywą suszenia, gdy wartość błędu względnego zawartości wody obliczonej na podstawie tego modelu nie przekroczy 5%. Przyjęto takie kryterium, gdyż trudno było precyzyjnie określić, kiedy pierwszy okres suszenia kończy się, bowiem w przypadku badanych w pracy warzyw nie charakteryzował się on, ze względu na występujący skurcz suszarniczy, stałą szybkością suszenia.

Do empirycznej weryfikacji modelu (3) posłużyły wyznaczone doświadczalnie krzywe suszenia pojedynczych plasterków (nie w warstwie):

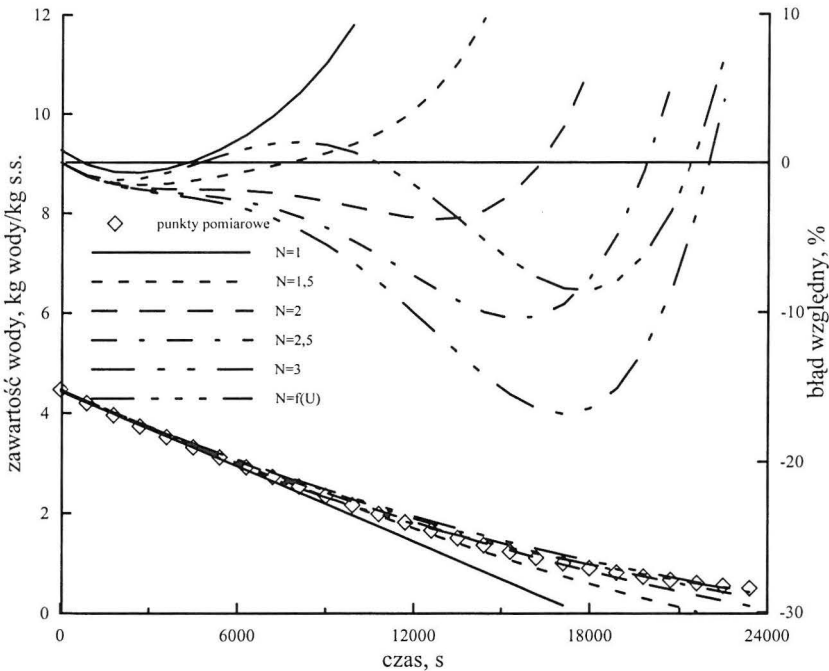
- a) cząstek korzenia pietruszki o grubości 3 mm (plasterki krojone w poprzek i wzdłuż korzenia oraz plasterki walca osiowego i pierścienie kory krojone w poprzek korzenia) [1,2],

b) porów o grubości 8 mm [5,14] suszonych w warunkach konwekcji naturalnej w temperaturze 40, 50, 60, 70 i 80°C.

Pomiar w każdej temperaturze suszącego powietrza powtarzany był czterokrotnie. Dla wyników pomiarów zmian zawartości wody w czasie (dla danej temperatury i danej cząstki) dobierano formuły empiryczne $u = f(\tau)$ w postaci wielomianów stopnia nie większego niż siódmy przy współczynniku korelacji $R > 0,960$.

WYNIKI I DYSKUSJA

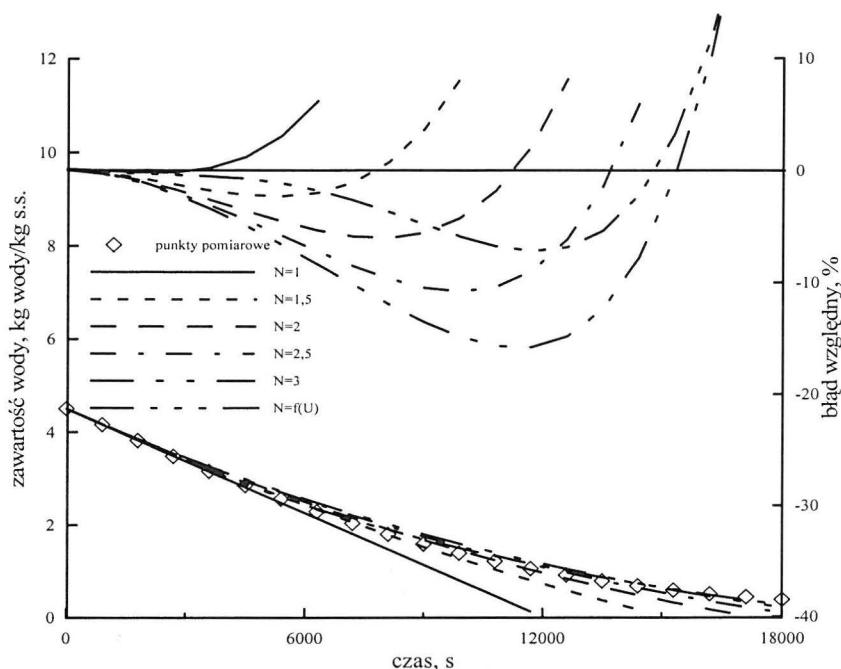
Na przykładowych Rys. 1, 2, 3 przedstawiono krzywe suszenia odpowiednio: plasterków pietruszki krojonych w poprzek korzenia, pierścieni z kory krojonych w poprzek korzenia pietruszki i plasterków porów uzyskane empirycznie oraz na



Rys. 1. Krzywa suszenia plasterków pietruszki krojonych w poprzek korzenia suszonych w temperaturze 50°C uzyskana empirycznie oraz na podstawie uogólnionego modelu kinetyki suszenia warzyw i odchylenie względne.

Fig. 1. Drying curve for crosswise cut parsley slices dried at 50°C obtained empirically and on the basis of the generalized model of vegetables drying kinetics and relative error.

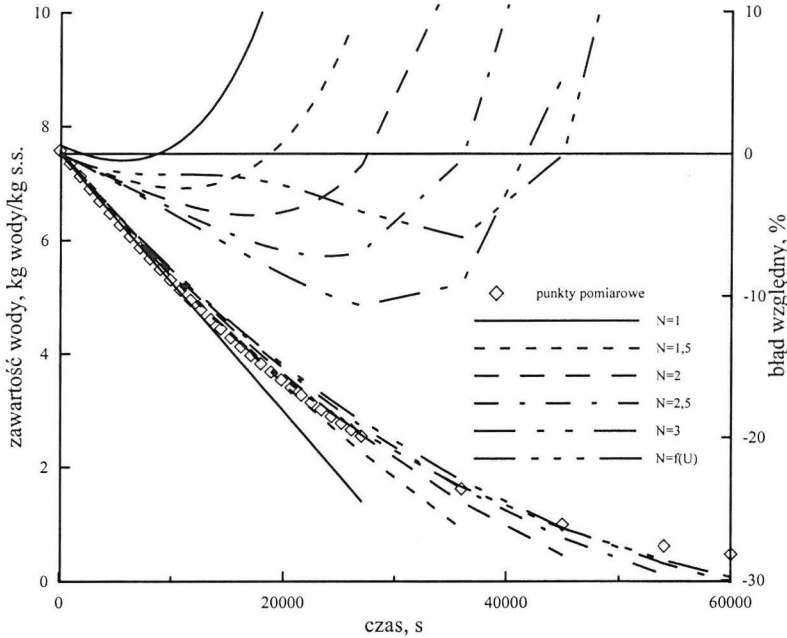
podstawie uogólnionego modelu kinetyki suszenia warzyw jak również błąd względny modelu. Dla pozostałych pomiarów przebiegu suszenia pietruszki oraz dla porów suszonych w temperaturze 50°C przebieg krzywych suszenia i błędów względnych jest analogiczny.



Rys. 2. Krzywa suszenia pierścieni kory krojonych w poprzek korzenia pietruszki suszonych w temperaturze 60°C uzyskana empirycznie oraz na podstawie uogólnionego modelu kinetyki suszenia warzyw i odchylenie względne.

Fig. 2. Drying curve for crosswise cut rings of parsley root bark dried at 60°C obtained empirically and on the basis of the generalized model of vegetables drying kinetics and relative error.

Analiza wyników empirycznej weryfikacji wskazuje na to, że model (3), w którym parametr N przyjmuje stałe wartości, opisuje przebieg suszenia z błędem względnym nie przekraczającym 5% w zakresie obniżenia zawartości wody rosnącym wraz ze wzrostem wartości tego parametru. Jednocześnie jednak wraz ze wzrostem wartości parametru N , rośnie wychylenie błędu względnego w stronę wartości ujemnych. Natomiast przyjęcie w modelu (3) zmiennej podczas trwania procesu wartości tego parametru poprawia dokładność opisu krzywej suszenia badanych warzyw w pierwszym okresie suszenia, przy czym wartość parametru N rośnie wraz z czasem trwania procesu czyli wraz ze spadkiem zawartości wody.



Rys. 3. Krzywa suszenia plasterków porów suszonych w temperaturze 40°C uzyskana empirycznie oraz na podstawie uogólnionego modelu kinetyki suszenia warzyw i odchylenie względne.

Fig. 3. Drying curve for leek slices dried at 40°C obtained empirically and on the basis of the generalized model of vegetables drying kinetics and relative error.

Dla cząstek korzenia pietruszki suszonych w warunkach opisanych w metodyce można przyjąć, iż zależność N od zredukowanej zawartości wody (obliczonej z empirycznej krzywej suszenia) jest następująca:

$$N(U) = 3,31 - 5,15U + 2,84U^2 \quad (6)$$

Zależność ta słuszna jest w zakresie zmian zawartości wody od początkowej do krytycznej, która umownie oddziela pierwszy okres suszenia od drugiego. Dokładniejsze oszacowanie krytycznej zawartości wody, niż przyjęte w pracy kryterium 5 - procentowego błędu względnego, z jakim model (3) opisuje krzywą suszenia, wymaga przeprowadzenia modelowania drugiego okresu suszenia, co będzie przedmiotem następnej publikacji.

Model (3), zarówno w przypadku, gdy parametr N przyjmuje stałą wartość jak i wtedy gdy jest zmienny, opisuje przebieg suszenia plasterków porów w temperaturze 60, 70 i 80°C w sposób niezadowolający. Spowodowane to jest zapewne

tym, że plasterki porów nie są zwartymi bryłami, ale składają się z wielu koncentrycznie ułożonych warstw stosunkowo luźno połączonych ze sobą. W wyższych temperaturach warstwy te wyraźnie oddzielają się od siebie. W związku z tym wymiana ciepła i masy może zachodzić nie tylko z powierzchni zewnętrznej plasterków, ale również częściowo z powierzchni między warstwami, czego model (3) nie uwzględnia. Równanie (1) również nie uwzględnia oddzielania się warstw w plasterkach porów.

WNIOSKI

1. Empiryczna weryfikacja potwierdziła możliwość wykorzystania modelu pierwszego okresu suszenia [12] do określania zmienności przebiegu skurczu suszarniczego podczas suszenia warzyw, których cząstki są bryłą zwartą.
2. Uzależnienie parametru N od zredukowanej zawartości wody umożliwia lepsze oszacowanie jak zmienia się powierzchnia wymiany ciepła i masy w czasie trwania procesu suszenia warzyw, których cząstki są bryłą zwartą.

WYKAZ OZNACZEŃ

$A = A(u)$ - powierzchnia suszonego produktu o zawartości wody równej $u < u_0$, m^2

A_0 - początkowa (dla $u = u_0$) powierzchnia suszonego produktu, m^2

b - parametr w równaniu skurczu

k - początkowa szybkość suszenia, s^{-1}

N - parametr

n - współczynnik empirycznie korygujący zależność powierzchni od zawartości wody w suszonym produkcie

$U = \frac{u - u_r}{u_0 - u_r}$ - zredukowana zawartość wody w suszonym produkcie

u - zawartość wody w suszonym produkcie, $kg\ H_2O \cdot kg^{-1}$ s.s.

u_0 - początkowa zawartość wody w suszonym produkcie, $kg\ H_2O \cdot kg^{-1}$ s.s.

u_r - równowagowa zawartość wody w suszonym produkcie, $kg\ H_2O \cdot kg^{-1}$ s.s.

τ - czas suszenia, s

PIŚMIENNICTWO

1. **Górnicki K.:** Modelowanie procesu konwekcyjnego suszenia korzeni pietruszki. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa, 2000.
2. **Górnicki K, Kaleta A.:** Kinetics of convection drying of parsley root particles. Pol. J. Food Nutr. Sci., 11/52, 2, 13-19, 2002.

3. **Jaros M., Pabis S.:** Wpływ liniowych suszarniczych skurczów i kształtów ciał stałych na kinetykę ich suszenia. *Inż. Rol.*, 8, 183-192, 2000.
4. **Jayaraman K.S., Das Gupta D.K., Babu Rao N.:** Effect of pre-treatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 25, 47-60, 1990.
5. **Kaleta A., Górnicki K., Stakun E.:** Współczynnik wnikania ciepła do plasterków porów suszonych w warunkach konwekcji naturalnej. *Probl. Inż. Rol.*, 7, 2(24), 47-53, 1999.
6. **Kaleta A., Górnicki K.:** Niektóre zagadnienia dotyczące modelowania procesu konwekcyjnego suszenia warzyw i owoców. *Post. Nauk Roln.*, 49/54, 4/298, 141-154, 2002.
7. **Kowalski S. J.:** Matematyczne modelowanie zjawiska skurczu materiału suszonego. VIII Sympozjum Suszarnictwa. Materiały konferencyjne, t. I. Warszawa, 121-136, 1994.
8. **Lewicki P.P., Witrowa D.:** Heat and mass transfer in externally controlled drying of vegetables. In: *Drying '92. Part A* (Ed. A. S. Mujumdar). Elsevier, Amsterdam, 884-891, 1992.
9. **Lewicki P.P., Witrowa D., Pomaranska-Łazuka W.:** Changes of physical properties of drying materials. In: *Developments in Food Engineering* (Eds T. Yano, R. Matsuno, K. Nakamura). Blackie Academic & Professional, London, 137-139, 1994.
10. **Lewicki P.P., Witrowa-Rajchert D., Mariak J.:** Changes of structure during rehydration of dried apples. *J. Food Engng.*, 32, 347-350, 1997.
11. **Nowak D., Witrowa-Rajchert D., Lewicki P.P.:** Skurcz objętościowy i zmiana gęstości marchwi i ziemniaka podczas suszenia konwekcyjnego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 454, 461-468, 1998.
12. **Pabis S.:** The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage. *J. Agric. Engng Res.*, 72, 187-195, 1999.
13. **Ratti C.:** Shrinkage during drying of foodstuffs. *J. Food Engng.*, 23, 91-105, 1994.
14. **Stakun E.:** Badanie kinetyki suszenia porów w warunkach konwekcji naturalnej. Praca magisterska. SGGW, Warszawa, 1998.
15. **Witrowa-Rajchert D., Turek W.:** Wpływ metody suszenia na skurcz i porowatość jabłek. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn*, 5, 301-312, 1998.

POSSIBILITY OF USING OF THE FIRST PERIOD DRYING MODEL
FOR VARIABILITY DETERMINATION OF SHRINKAGE COURSE
DURING VEGETABLES DRYING

A. Kaleta, K. Górnicki

Department of Fundamental Engineering, Faculty of Production Engineering,
Warsaw Agricultural University (SGGW)

ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa, e-mail: gornicki@alpha.sggw.waw.pl

Abstract. The possibility of using of the first period drying model for variability determination of shrinkage course during vegetables drying was discussed. The model contains parameter N , which value depends on the way of material shrinkage during drying. It was assumed

in this paper that N is changeable during drying. For the model empirical verification the measurements of drying kinetics of single particles were used. 3 mm thick crosswise and lengthwise cut parsley slices, crosswise cut slices of parsley axial cylinder and crosswise cut rings of parsley root bark and 8 mm thick leek slices were dried at the temperature range of 40-80°C under conditions of natural convection. It turned out from the obtained results that the generalized model of vegetables drying kinetics with changeable parameter N describes the investigated process better than the model with constant N . This statement concerns the parsley root particles dried in air temperature range from 40 to 80°C and leek slices dried at 40 and 50°C. The obtained results confirmed the possibility of using of the first period drying model for variability determination of shrinkage course during drying of vegetables which particles are compact solid.

Key words: drying, shrinkage, mathematical modelling, vegetables.