

Magdalena Zielińska

Katedra Inżynierii i Aparatury Procesowej oraz Gospodarki Energią

Ireneusz Białobrzewski, Marek Markowski, Ryszard Myhan

Katedra Inżynierii Procesów Rolniczych

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

WYKORZYSTANIE MODELU QUASI - STACJONARNEGO DO OPISU KINETYKI SUSZENIA MARCHWI W ZŁOŻU FLUIDALNO-FONTANNOwym

Streszczenie

Przedstawiono weryfikację sformułowanych przez Kudrê i Efre-mova [2003] quasi- stacjonarnych modeli kinetyki suszenia. Wyniki weryfikacji modeli zilustrowano wykresami modeli i dla porównania wynikami pomiarów kinetyki suszenia kostki marchwi w złożu fluidalno-fontannowym. Niskie wartości bezwzględne lokalnego błędu aproksymacji quasi - stacjonarnego modelu zmian temperatury materiału w procesie suszenia kostki marchwi w złożu fluidalno-fontannowym, świadczą o zadowalającym dopasowaniu modelu do danych eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: marchew, suszenie, złoż fluidalno-fontannowe, model quasi-stacjonarny

Oznaczenia

t_p	- temperatura powietrza suszącego, °C
t_m	- temperatura materiału, °C
t_M	- temperatura mokrego termometru, °C
u	- zawartość wody, kg wody/kg s.s.
u_r	- równowagowa zawartość wody, kg wody/kg s.s.
u_0	- początkowa zawartość wody, kg wody/kg s.s.
U_R	- zredukowana zawartość wody opisana równaniem (1)
D	- współczynnik dyfuzji masy [m^2/s]
k	- kinetyczny współczynnik desorpcji [m/s]
K	- współczynnik suszarniczy [min^{-1}]
n	- parametr w formule empirycznej (1)
σ	- parametr w formule empirycznej (1), min
ψ	- znormalizowana szybkość suszenia

τ	- czas, min
err	- lokalny bezwzględny błąd aproksymacji, °C
emp	- empiryczne
mod	- modelowe

Wprowadzenie

Wśród nowoczesnych metod suszarniczych metoda suszenia fluidalno-fontannowego zajmuje ważną pozycję. Proces suszenia marchwi był przedmiotem badań wielu autorów [Lin i in. 1998; Litvin i in. 1998; Sanga i in. 2002; Mulet i in. 1989]. Jednakże analiza aktualnego stanu wiedzy na temat suszenia surowców spożywczych wskazuje na brak informacji dotyczących suszenia marchwi w zwoju fluidalno-fontannowym. W literaturze przedstawiane są trzy rodzaje modeli kinetyki konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych: teoretyczne, empiryczne oraz semi-empiryczne. Pewne ograniczenia związane z zastosowaniem empirycznych modeli do opisu kinetyki suszenia mogą być wyeliminowane przez wykorzystanie modeli semi-empirycznych.

Teoretyczne podstawy modelowania pierwszego okresu suszenia warzyw, owoców i grzybów z uwzględnieniem skurczu suszarniczego opracowano w ostatnim dziesięcioleciu [Pabis 1994, 1999; Pabis, Jaros 2002; Markowski 1995, 1998]. W literaturze można znaleźć prace dotyczące interpretacji danych doświadczalnych, z których wynika, że równania wyprowadzone przy zastosowaniu założenia quasi-stacjonarności procesu dobrze opisuje eksperyment [Kudra i in. 2003]. Przydatność równań wyprowadzonych przy zastosowaniu założenia quasi-stacjonarności procesu została potwierdzona dla takich materiałów, jak cegła, wena, bawełna, polietylen, pszenica, kukurydza, seler. Materiały te były suszone w różnych warunkach hydrodynamicznych m.in. jako materiał nieruchomy, w zwoju fontannowym, w zwoju wirującym czy zwoju pulsacyjno-fluidalnym. Jednakże brak w literaturze informacji dotyczących przydatności tych równań dla materiałów o dużym skurczu.

Celem pracy było sprawdzenie, czy równania wyprowadzone na podstawie założenia quasi-stacjonarności procesu suszenia mogą być przydatne do opisu zmian zawartości wody i temperatury materiału w czasie suszenia w zwoju fluidalno-fontannowym materiałów o dużym skurczu.

Materiał i metodyka

Do modelowania procesu suszenia kostki marchwi w zwoju fluidalno-fontannowym wykorzystano następujące równania wyprowadzone przy założeniu qu-

asi-stacjonarności procesu [Kudra i in. 2003], które opisują zmiany zawartości wody i temperatury materiału w czasie suszenia:

$$U_R = \frac{u(\delta) - u_r}{u_o - u_r} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\delta}{\delta_0}\right)^n} \quad (1)$$

$$t_m = t_p - \check{r} (t_p - t_M) \quad (2)$$

Zastosowano tu quasi-stacjonarne podejście do problemu, które polega na potraktowaniu procesu nieustalonego jako ustalonego w pewnych warunkach. Jednym z przykładów w suszeniu jest założenie, że nieustalona wymiana ciepła między gazem a materiałem jest opisana równaniem Newtona, które dotyczy procesu ustalonego. Zaletą tych równań jest prostota i łatwość zastosowania. Pozwalają one na dokładny opis kinetyki suszenia na podstawie niewielkiej ilości danych eksperymentalnych.

Empiryczna interpretacja parametru δ [Efremov 2002] jest następująca:

$$\delta = \frac{D}{\sqrt{k}} \quad (3)$$

Wartość znormalizowanej szybkości suszenia można obliczyć według formuły:

$$\check{r} = \frac{N}{N_0} = \exp(-K\delta) \quad (4)$$

gdzie:

$$N = \frac{dU_R}{d\delta} \quad (5)$$

Do badań użyto przemysłowej odmiany marchwi Macon, pochodzącej z uprawy Zakładu Warzywniczego w Skierniewicach. Bezpośrednio po zbiorze marchew poddano procesowi suszenia. Marchew wstępnie blanszowano w wodzie z dodatkiem trójfosforanu sodowego. Proces prowadzono przez 4 minuty w temperaturze 95°C. Materiał krojono w kostki o boku 10 mm i suszono w złożu fluidyzacyjnym. Poczłtkowa zawartość wody w materiale wynosiła około 7 kg wody/kg s.s. Temperatura czynnika suszącego wynosiła 60°C, 70°C, 80°C i 90°C, a prędkość przepływu powietrza 4,5 m/s. Poczłtkowa wysokość nieruchomego złoża wynosiła 0,1 m, wysokość warstwy fontannującej 0,5 m.

Za pomocą termopar mierzono: temperaturę czynnika suszącego na wlocie, w zóu oraz temperaturę materiau, z 30-sekundowym krokiem czasowym. Rejestrowano pomiar wilgotności powietrza otaczającego, gdzie krok czasowy wynosi 10 minut. Temperaturę materiau mierzono termoparą umieszczoną w kostce marchwi zawieszony w zóu. Podczas procesu suszenia obserwowano nierównomierne mieszanie zóu w zależności od odległości od ścian bocznych komory suszenia. Struktura fontannującego zóu zmienia się w sposób przypadkowy, co było spowodowane nieregularną chwilową prędkością przepływu powietrza w przekroju poprzecznym.

Jako kryterium oceny wybranych modeli przyjęto współczynnik determinacji oraz wartość lokalnego bezwzględnego błędu estymacji temperatury, gdzie błąd zdefiniowany był według formuły:

$$\text{err}(\tau) = t(\tau)_{\text{emp}} - t(\tau)_{\text{mod}} \quad (6)$$

Do wyznaczenia temperatury mokrego termometru zastosowano empiryczny model opisujący zależność temperatury mokrego termometru od temperatury powietrza i zawartości wody w powietrzu [Weiss, 1977]. Do utworzenia regresyjnego modelu wilgotności zastosowano model neuronowy zbudowany przy wykorzystaniu pakietu MATLAB TOOLBOX NEURAL NETWORKS (Demuth, Beale 2001).

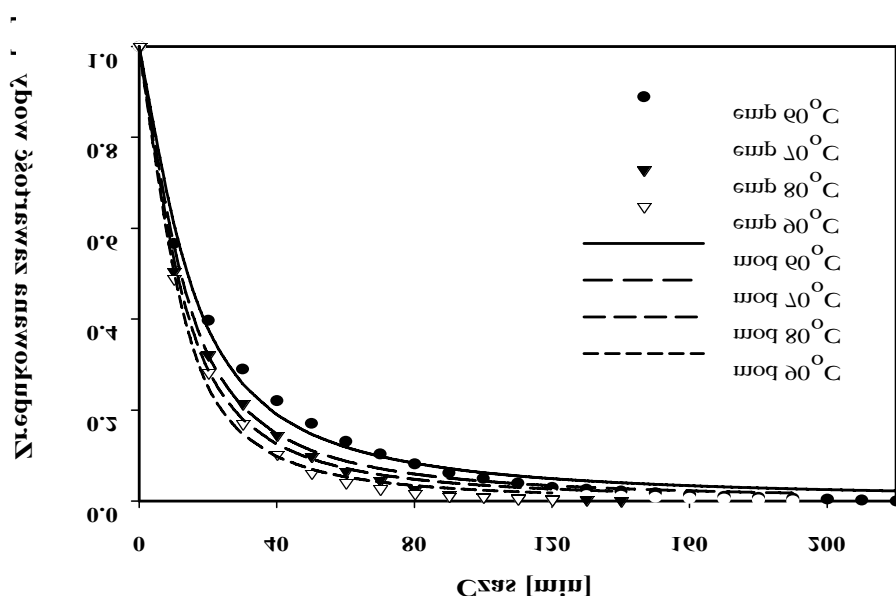
Wyniki i dyskusja

Rysunek 1 przedstawia kinetykę zmian zredukowanej zawartości wody wyliczoną z równania (1) oraz dane eksperymentalne. Wysoka wartość współczynnika determinacji quasi-stacjonarnego modelu zredukowanej zawartości wody świadczy o tym, że wartości parametru n otrzymane dla poszczególnych temperatur zostały poprawnie oszacowane. Maksymalną wartość współczynnika determinacji 0,996 uzyskano dla temperatury 90°C, natomiast minimalną 0,992 dla temperatury 60°C. Powyższe obserwacje pozwalają na stwierdzenie, że zastosowanie quasi-stacjonarnego modelu zredukowanej zawartości wody pozwala na prawidłowy opis kinetyki suszenia kostki marchwi w danych warunkach prowadzenia procesu.

Charakterystyczne parametry uzyskane dla kostki marchwi suszonej w zóu fontannowym powietrzem o temperaturze 60°C, 70°C, 80°C i 90°C przedstawiono w tabeli 1. Zmniejszanie się σ ze wzrostem temperatury powietrza suszącego jest uzasadnione zwiększaniem się szybkości suszenia. Zaobserwowano wyraźny wzrost parametru n wraz ze wzrostem temperatury.

Jest to sprzeczne z obserwacją niezależności wartości parametru n od temperatury, opisaną przez Kudrę i Efremova [2003] dla plasterków korzenia selera suszonego w zwoju pulso-fluidalnym [Glaser 1993]. Kudra i Efremov [2003] stwierdzili, że prędkość względna między czynnikiem suszącym a suszonym materiałem nie jest jedyną wielkością wpływającą na wartość n . W pracy stwierdzono, że parametr n rośnie proporcjonalnie ze wzrostem temperatury czynnika suszącego. Powodem wzrostu wartości parametru n może być pulsująca prędkość przepływu powietrza w przekroju poprzecznym. Jest to prawdopodobnie związane ze skurczem materiału, który zależy m.in. od temperatury czynnika suszącego i szybkości suszenia.

Podczas procesu obserwowano gwałtowne fluktuacje prędkości powietrza spowodowane lokalną niestabilnością przepływu czynnika suszącego. Uzasadniona jest więc hipoteza, że parametr n jest zwojną funkcją innych parametrów, które wpływają na hydrodynamikę zwoja, np. temperatura, skurcz, gęstość materiału. W celu określenia tej zależności należałoby przeprowadzić dalsze badania.



Rys.1. Wyniki pomiarów (emp) i symulacji (mod) zredukowanej zawartości wody w kostce marchwi suszonej w zwoju fontannowym w temperaturze 60°C, 70°C, 80°C i 90°C

Fig. 1. Results of measurements (emp) and simulation (mod) of the moisture ratio in carrot slices dried in a fountain bed at the temperature of 60, 70, 80 and 90 deg C

Tabela 1. Charakterystyczne parametry uzyskane dla kostki marchwi suszonej w złożu fontannowym powietrzem o temperaturze 60°C, 70°C, 80°C i 90°C.

Table 1. Characteristic parameters obtained at drying of carrot slices in a fountain bed at air temperatures 60, 70, 80 and 90 deg C

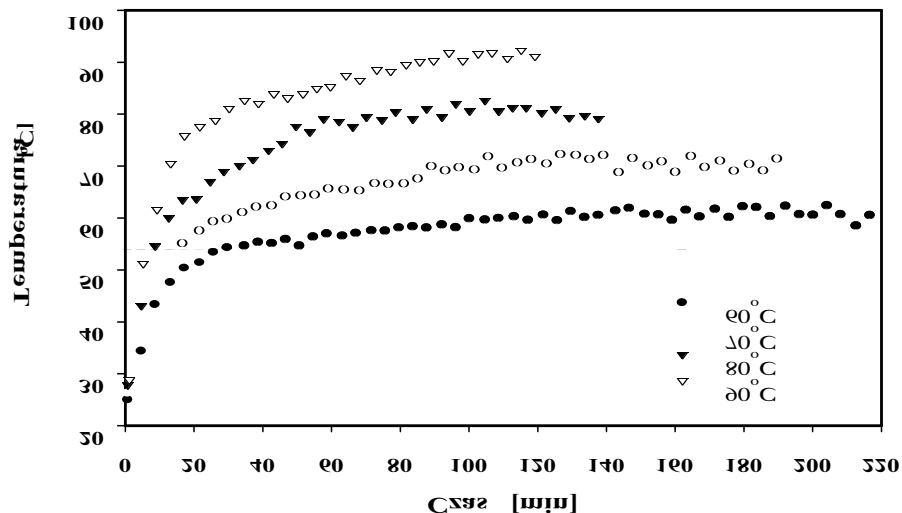
	$t_p = 60^\circ\text{C}$	$t_p = 70^\circ\text{C}$	$t_p = 80^\circ\text{C}$	$t_p = 90^\circ\text{C}$
u_o	7,14	6,97	6,80	6,44
x_r	0,11	0,08	0,02	0,013
n	1,38	1,46	1,51	1,63
σ	13,95	12,02	11,02	10,23

Rysunek 2 przedstawia wyniki pomiarów temperatury kostki marchwi suszonej w złożu fontannowym. Na rysunku 3 przedstawiono symulowane wartości temperatury materiału wyliczone z równania (2), natomiast rozkład lokalnego bezwzględnego temperatury materiału przedstawiono na rysunku 4.

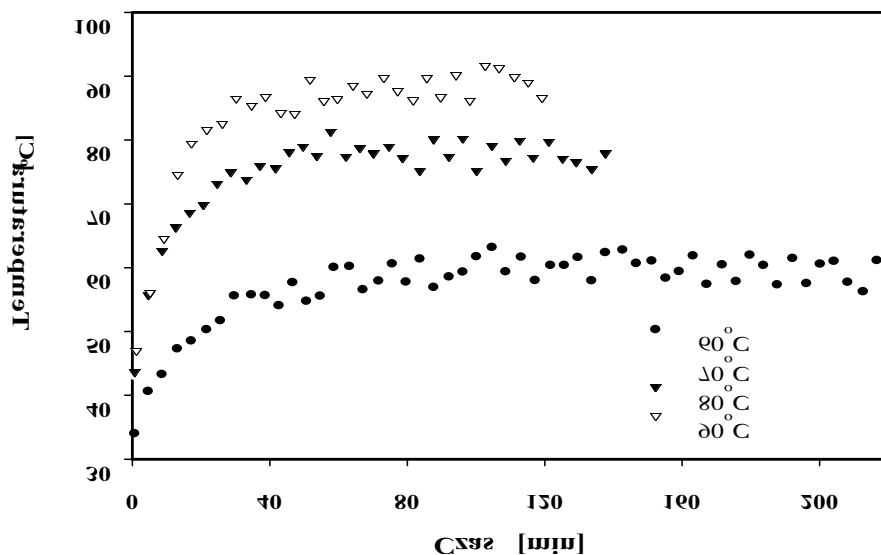
Maksymalny, lokalny bezwzględny aproksymacji temperatury materiału zaobserwowano na początku procesu suszenia. Był on prawdopodobnie spowodowany tym, że temperatura materiału oraz temperatura czynnika suszącego nie były stałe. Wartość tego bezwzględnego temperatury materiału wynosiła 19,5°C dla temperatury czynnika suszącego 90°C, natomiast dla temperatury czynnika suszącego 60°C wyniosła 9°C. Można zatem stwierdzić, że im wyższa temperatura czynnika suszącego tym wyższa była początkowa wartość maksymalnego lokalnego bezwzględnego temperatury materiału.

W początkowym okresie suszenia obserwowano intensywny wzrost temperatury materiału, przy czym czas nagrzewania materiału wzrastał wraz ze wzrostem temperatury czynnika suszącego. Temperatura złoża była niższa niż temperatura czynnika suszącego i osiągała wartości zbliżone do temperatury czynnika suszącego po 13, 17, 20 i 26 minutach odpowiednio dla temperatury 60°C, 70°C, 80°C, 90°C.

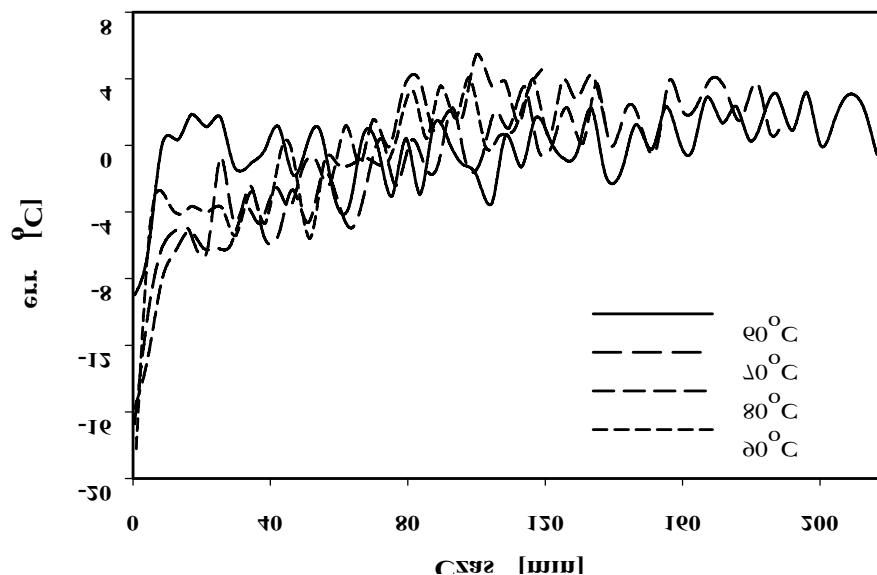
Wyścigając wstępny okres nagrzewania materiału średni lokalny bezwzględny bezwzględny aproksymacji temperatury materiału wynosił 2°C. Zatem można wnioskować, że poza wstępnym okresem procesu suszenia quasi-stacjonarny model w zadowalający sposób opisuje temperaturę cząstek materiału suszonych w złożu fluidalno-fontannowym. Jest to szczególnie ważne w przypadku suszenia materiałów wrażliwych na działanie temperatury.



Rys.2. Zmierzona temperatura kostki marchwi suszonej w złożu fontannowym w temperaturze 60°C, 70°C, 80°C, 90°C
 Fig. 2. Measured temperature of carrot slices dried in a fountain bed at the temperature of 60, 70, 80 and 90 deg C



Rys.3. Symulowana temperatura kostki marchwi suszonej w złożu fontannowym w temperaturze 60°C, 70°C, 80°C, 90°C
 Fig. 3. Simulated temperature of carrot slices dried in fountain bed at the temperature of 60, 70, 80 and 90 deg C



Rys.4. Rozkład lokalnego bezwzględnego błędu aproksymacji temperatury materiału
 Fig. 4. Distribution of local absolute error of approximation for material temperature

Wnioski

Równania wyprowadzone według zmodyfikowanej quasi-stacjonarnej metody mogą być wykorzystane do modelowania zmian wilgotności i temperatury materiału podczas suszenia kostki marchwi w zwoju fluidalno-fontannowym. Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu można stwierdzić, że parametr n w modelu quasi-stacjonarnym, odzwierciedla intensywność kontaktu czynnika suszącego z materiałem, rośnie proporcjonalnie ze wzrostem temperatury czynnika suszącego.

Parametr n nie jest więc prostą funkcją prędkości czynnika suszącego, lecz zwojoną funkcją kilku parametrów, które wpływają na hydrodynamikę zwoja, np. temperatura, skurcz, gęstość materiału, kształt czwstki.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2005 jako projekt badawczy nr 2 P06T 024 26.

Bibliografia

Demuth H. Beale M. 2001. Neural network toolbox for use with MATLAB. The MathWorks, Inc

- Efremov G.I., 2001. Macrokinetics of transfer processes. MGTU, Moscow, s. 289
- Efremov G.I. 2002. Drying kinetics derived from diffusion equation with flux-type boundary conditions. *Drying Technology*, 20(1): 55-66
- Glaser R. 1993. Hydrodynamika i kinetyka w procesie suszenia w warstwie pulso-fluidalnej materia³ów trudnofluidyzuj¹cych (na przyk³adzie krajanek korzeni warzyw). *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 2; 407-422
- Kudra T., Efremov G.I. 2003. A quasi - stationary approach to drying kinetics of fluidized particulate materials. *Drying Technology*, Vol.21, No.6: 1077-1090
- Lin T.M., Durance T.D., Scaman C.H. 1998. Characterization of vacuum, microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31(2): 111-117
- Litvin S., Mannheim C.H., Miltz J. 1998. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 36: 103-111
- Markowski M. 1995. Matematyczne modelowanie procesów konwekcyjnego suszenia warzyw. *Acta Academiae Agriculturae AC Technicae Olstenensis, Agricultura*, 61, Supplementum A: 1-72
- Markowski M. 1998. Air drying of onion: some theoretical considerations. *Drying Technology*, 16: 877-888
- Mulet A., Berna A., Rosello S., Pinaga F. 1989. Drying of carrots. II. Drying models. *Drying Technology*, 7(4): 641-661
- Pabis S. 1994. Uogólniony model kinetyki suszenia warzyw i owoców w pierwszym okresie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 417,:15-34
- Pabis S. 1999. The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72: 187-195
- Pabis S., Jaros M. 2002. The first period of convection drying of vegetables and the effect of shape-dependent shrinkage. *Biosystems Engineering*, 81 (2): 201-211

Sanga E.C.M., Mujumdar A.S., Raghavan G.S.V. 2002. Simulation of convection - microwave drying for a shrinking material. *Chemical Engineering and Processing*, 41: 487-499

Weiss A. 1977. Algorithms for the calculation of moist air properties on a hand calculator. *Transactions of the ASAE*: 1133-1136

**APPLICATION OF A QUASI-STATIONARY MODEL
TO DESCRIBING THE KINETICS OF CARROT DRYING
IN FLUIDIZED-FOUNTAIN BED**

Summary

Paper presented the verification of quasi-stationary models of drying kinetics, formulated by Kudra and Efremov. The results of models' verification were illustrated by diagrams of the models, as well as - for comparison purposes - by the measurement results dealing with drying of carrot slices in a fluidized - fountain bed. Low values of local absolute error of approximation for quasi-stationary model of the dynamics in material temperature changes during drying of the carrot slices in a fluidized - fountain bed, showed satisfactory fitting of the model to experimental data.

Key words: carrot, drying, fluidized-fountain bed, quasi-stationary model

Recenzent: Stanisław Pabis

