

Alicja KIECA, Grzegorz MUSIELAK

e-mail: akieca@gmail.com

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

## Kinetyka suszenia mikrofalowego pod obniżonym ciśnieniem

### Wstęp

Proces suszenia mikrofalowo-próżniowego łączy w sobie zalety dwóch innych: suszenia mikrofalowego (szybka wymiana energii) oraz suszenia pod obniżonym ciśnieniem (niska temperatura przewodzenia procesu oraz szybka wymiana masy). Dzięki temu możliwe jest otrzymanie produktu o lepszej jakości np. w przypadku materiałów roślinnych [1], czy też leków [2].

Problematyka wspomnianego procesu pojawiła się już w wielu publikacjach. Jednakże niewiele jest informacji na temat kinetyki suszenia mikrofalowo-próżniowego. Oczywiście takie prace są [3, 4], lecz jest ich znacznie mniej niż prac dotyczących np. porównania różnych metod suszenia [5], czy traktujących suszenie mikrofalowo-próżniowe jako jeden z etapów dehydracji [6]. Dodatkową trudnością jest możliwość pomiaru ubytku masy próbki podczas prowadzenia procesu suszenia. W związku z tym podjęto prace mające na celu przeprowadzenie analizy kinetyki omawianego procesu oraz znalezienie najbardziej uniwersalnego opisu kinetyki suszenia mikrofalowo-próżniowego poprzez porównanie matematycznych modeli suszenia z danymi eksperymentalnymi.

### Przegląd modeli kinetyki suszenia

Matematyczne modele opisujące proces suszenia podzielić można na trzy grupy: teoretyczne, półteoretyczne i empiryczne [7, 8]. Modele teoretyczne bazują na modelu cienkowarstwowym. Modele półteoretyczne składają się z serii uproszczonych rozwiązań drugiego prawa Ficka [7], natomiast modele empiryczne podają bezpośrednią zależność zawartości wilgoci od czasu suszenia, lecz ich parametry nie mają znaczenia fizycznego [7]. W tab. 1 zestawiono matematyczne modele opisujące kinetykę suszenia, które dostępne są w literaturze [7, 8].

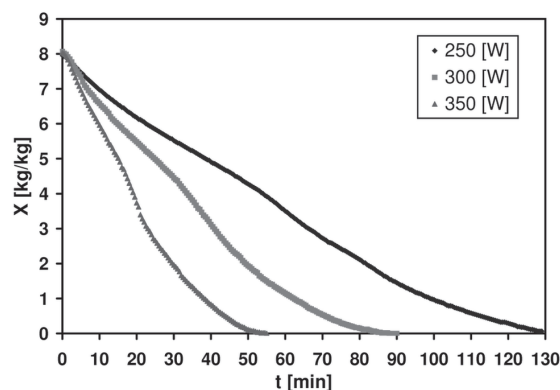
Tab. 1. Matematyczne modele suszenia [7, 8]

Lp.	Nazwa	Wzór
1	Lewis/Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
5	Two-Term Asymptotic	$MR = a \exp(bt) + c \exp(dt)$
6	Two-Term Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Approximation of Diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
9	Chavez-Mendez et al.	$MR = [1 - (1 - L_2)L_1t]^{1/(1-L_2)}$
10	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

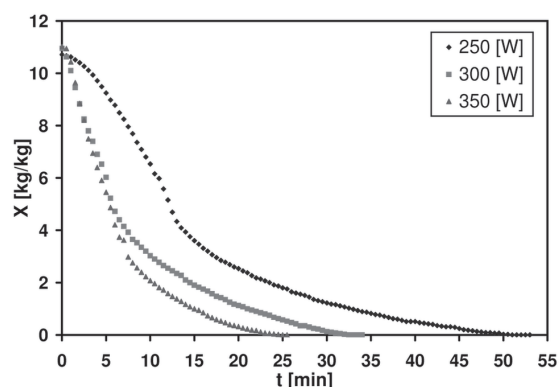
### Część doświadczalna

Badania przeprowadzono dla jabłka oraz marchwi. Materiały przechowywano w lodówce w temperaturze 4°C, zamknięte w plastikowych torbach. W celu przygotowania próbek pocięto rośliny na plastry o jednakowej grubości. Próbki umieszczano w komorze próżniowej wewnątrz suszarki mikrofalowej. Dodatkowo w części tej umieszczona została szalka wagi, co umożliwiło pomiar ubytku masy próbki w czasie trwania procesu suszenia. Do pomiaru ciśnienia zastosowano manometr firmy MKS Barton. Zastosowano trzy moce promieniowania mikrofalowego: 250, 300 i 350 W, a ciśnienie panujące w komorze suszarki wynosiło 23–25 kPa. Masę próbki rejestrowano co 0,5 min z dokładnością do 0,01 g. Wybór parametrów suszenia oparty został o wnioski z wcześniejszych badań [9].

Na rys. 1 i 2 przedstawiono krzywe suszenia dla wybranych materiałów. Kształt krzywych zależy od materiału. Zmniejszenie mocy promieniowania mikrofalowego skutkuje zawsze wydłużeniem czasu trwania procesu suszenia.



Rys. 1. Krzywe suszenia dla jabłka



Rys. 2. Krzywe suszenia dla marchwi

### Ocena dopasowania modeli

Ponieważ we wszystkich równaniach opisujących kinetykę procesu suszenia (Tab. 1) zawartość wilgoci jest wielkością bezwymiarową, dane eksperymentalne przekształcono zgodnie ze wzorem:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

gdzie:

$MR$  – bezwymiarowa zawartość wilgoci,

$X$  – zawartość wilgoci w czasie  $t$ ,

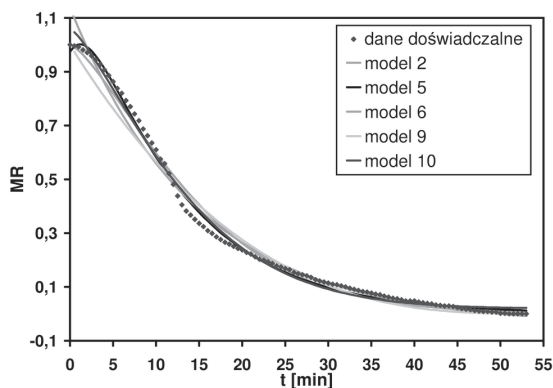
$X_0$  – początkowa zawartość wilgoci,

$X_e$  – równowagowa zawartość wilgoci, której założona wartość wynosi 0 [7].

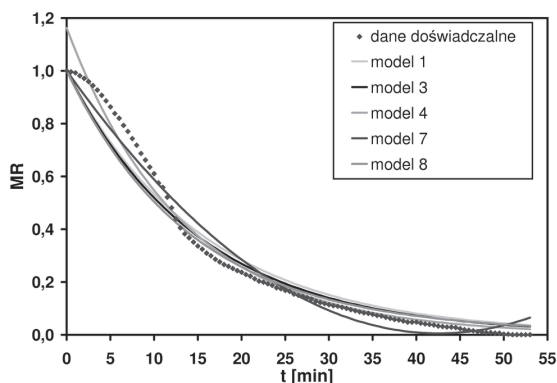
W celu znalezienia najlepszego opisu kinetyki procesu suszenia mikrofalowo-próżniowego dane doświadczalne dopasowywano do modeli literaturowych z tab. 1 wykorzystując metodę analizy nieliniowej. Do oszacowania dopasowania zastosowano pierwiastek ze średniej kwadratu błędów  $RMSE$  [8], którego wartości dla wszystkich analizowanych próbek zestawiono w tab. 3. Im mniejsza jego wielkość, tym lepsze jest dopasowanie.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane podczas suszenia jednej próbki marchwi z użyciem mikrofal o mocy 250 W. Porównanie krzywej doświadczalnej z teoretycznymi pozwala stwierdzić,

iz są trzy grupy modeli: dobrze opisujące początek krzywej (nr 2 i 5 na Rys. 3), dobrze opisujące koniec krzywej (nr 6, 9 i 10 na Rys. 3) oraz odbiegające od krzywej teoretycznej (Rys. 4). Wartości współczynnika *RMSE* dla tej próbki zestawiono w tab. 3. Wprawdzie model 10 dość dobrze oddaje charakter krzywej doświadczalnej, wydaje się być niewystarczający.



Rys. 3. Wyniki dla marchwi suszonej mocą 250 W, część 1

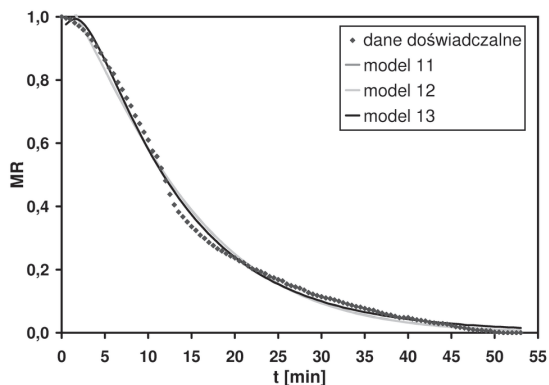


Rys. 4. Wyniki dla marchwi suszonej mocą 250 W, część 2

Ponieważ dotychczas dostępne w literaturze równania opisujące kinetykę procesu suszenia są niewystarczające zaproponowano nowe modele (Tab. 2), będące rozszerzeniem już istniejących modeli.

Tab. 2. Proponowane modele kinetyki suszenia

Lp.	Wzór
11	$MR = a \exp(-kt^n)$
12	$MR = (a + bt) \exp(-kt^n)$
13	$MR = (a + bt + ct^2) \exp(-kt^n)$



Rys. 5. Wyniki dla marchwi suszonej mocą 250 W, część 3

Wyniki uzyskane dla przykładowej próbki – marchwi suszonej z użyciem mikrofal o mocy 250 W przedstawiono na rys. 5. Lepsze przybliżenie danych doświadczalnych przez modele 11–13 potwierdzają dodatkowo wartości współczynnika *RMSE* (Tab. 3).

## Wyniki modelowania

W tab. 3 zestawiono wartości współczynnika *RMSE* uzyskane przez porównanie modeli ze wszystkimi danymi eksperymentalnymi. We wszystkich przypadkach najmniejsze wartości *RMSE* uzyskano dla modeli 10 i 13. Pozostałe równania wykazują gorsze dopasowanie do danych doświadczalnych, bądź pozwalają na opis tylko pewnej części próbek.

Tab. 3. Zestawienie wartości parametru *RMSE* dla jabłka (J) i marchwi (M)

Nr	J 1 <i>P</i> = 250 W	J 2 <i>P</i> = 300 W	J 3 <i>P</i> = 350 W	M 1 <i>P</i> = 250 W	M 2 <i>P</i> = 300 W	M 3 <i>P</i> = 350 W
1	0,078	0,074	0,071	0,059	0,020	0,032
2	0,039	0,066	0,037	0,029	0,032	0,023
3	0,072	0,074	0,073	0,058	0,020	0,032
4	0,064	0,064	0,057	<b>0,039</b>	<b>0,018</b>	<b>0,021</b>
5	0,064	0,064	0,057	<b>0,018</b>	<b>0,018</b>	<b>0,021</b>
6	<b>0,017</b>	<b>0,025</b>	<b>0,023</b>	<b>0,035</b>	<b>0,020</b>	<b>0,019</b>
7	<b>0,015</b>	<b>0,021</b>	<b>0,022</b>	0,047	0,069	0,050
8	0,049	0,061	0,083	0,061	0,025	0,027
9	<b>0,013</b>	<b>0,020</b>	<b>0,020</b>	0,044	0,020	0,025
10	<b>0,015</b>	<b>0,017</b>	<b>0,011</b>	<b>0,024</b>	<b>0,016</b>	<b>0,013</b>
11	<b>0,025</b>	<b>0,023</b>	<b>0,015</b>	<b>0,025</b>	<b>0,017</b>	<b>0,013</b>
12	<b>0,028</b>	<b>0,023</b>	<b>0,016</b>	<b>0,025</b>	<b>0,017</b>	<b>0,013</b>
13	<b>0,004767</b>	<b>0,006163</b>	<b>0,011</b>	<b>0,018</b>	<b>0,008527</b>	<b>0,006653</b>

## Wnioski

Suszenie mikrofalowo-próżniowe zostało zaproponowane jako proces pozwalający na skrócenie czasu suszenia przy jednoczesnym polepszeniu jakości otrzymanego produktu. Uzyskano kinetyki suszenia mikrofalowego pod obniżonym ciśnieniem dla różnych materiałów roślinnych. Przeanalizowano rezultaty modelowania kinetyki z zastosowaniem modeli literaturowych, z których model zaproponowany przez *Midilli* et al. [7] okazał się najlepszy. Jednakże przeważnie nie oddaje on w pełni początku procesu. Z tego względu zaproponowano nowe równania, które okazały się być lepsze niż te dotychczas dostępne. Model oznaczony numerem 13 pozwala na dokładniejszy opis tego okresu suszenia i dlatego okazał się w każdym przypadku lepszy od modelu nr 10 (*Midilli* et al. [7]).

## LITERATURA

- [1] *A.K.S. Chauhan, A.K. Srivastava*: *Drying Techn.* **27**, nr 6 (2009).
- [2] *A. Hegedus, K. Pintye-Hódi*: *Int. J. of Pharmaceutics* **330**, nr 1, 2 (2007).
- [3] *P. Mitra, V. Meda*: *Drying Techn.* **27**, nr 10 (2009).
- [4] *X.-J. Song, M. Zhang, A.S. Mujumdar, L. Fan*: *Drying Techn.* **27**, nr 9 (2009).
- [5] *S. Jaya, T.D. Durance*: *J. of Porous Materials* **16**, nr 1 (2009).
- [6] *A. Figiel*: *Journal of Food Eng.* **98**, nr 4 (2010).
- [7] *W.A.M. McMinn, G. Farrell, T.R.A. Magee*: *Drying Techn.* **25**, nr 9 (2007).
- [8] *P.P. Sutar, S. Prasad*: *Drying Techn.* **25**, nr 10 (2007).
- [9] *A. Kieca, G. Musielak*: *Proc. of the XII PDS, Łódź, Poland, (2009)*.

*Praca została wykonana w ramach badań statutowych nr DS 32-127/10 finansowanych przez Politechnikę Poznańską.*