

EWA JAKUBCZYK

## CHARAKTERYSTYKA SUSZENIA KONWEKCYJNO- MIKROFALOWEGO SPIENIONEGO PRZECIERU JABŁKOWEGO

### Streszczenie

Celem pracy było określenie wpływu mocy generatora mikrofal na kinetykę suszenia konwekcyjno-mikrofalowego i barwę spienionego przecieru jabłkowego oraz zaproponowanie modelu opisującego kinetykę procesu suszenia. Przecier jabłkowy spieniano z dodatkiem 2 % albuminy i 0,5 % metylocelulozy w ciągu 5 min. Uzyskaną pianę suszono w suszarce konwekcyjno-mikrofalowej przy prędkości powietrza 1,8 m/s w temperaturze 40 °C i przy grubości warstwy 4 mm. Moc generatora mikrofal wynosiła odpowiednio: 0, 80, 120, 180, 250 W. Po suszeniu określano zawartość wody oraz barwę powierzchni piany za pomocą chromometru firmy Minolta w systemie CIE L\*a\*b\*. Analiza kinetyki suszenia konwekcyjno-mikrofalowego wykazała brak okresu stałej szybkości suszenia. Obserwowano głównie okres malejącej szybkości suszenia. Moc mikrofal istotnie wpływała na skrócenie czasu suszenia spienionego przecieru. Przy zastosowaniu mocy 250 W czas suszenia był 5-krotnie krótszy w porównaniu z suszeniem wyłącznie konwekcyjnym. Suszenie przy 180 W umożliwia otrzymanie produktu o jaśniejszej barwie, a jednocześnie szybkość suszenia przy zawartości wody 1 kg/kg s.s. jest tylko o 15 % niższa od wartości uzyskanych przy 250 W.

**Słowa kluczowe:** suszenie pianowe, moc mikrofal, kinetyka suszenia, barwa

### Wprowadzenie

Suszenie pianowe nie jest nową techniką suszarniczą, ale w ostatnich latach podejmowane są próby ponownego jej wykorzystania [15]. Suszenie spienionych materiałów o otwartej porowatej strukturze umożliwia zachowanie dużych szybkości przenoszenia masy i skrócenie czasu trwania procesu [6]. Jednym z istotnych wyróżników jakościowych produktów suszonych jest ich aromat. W wyniku suszenia pianowego uzyskuje się produkty w formie instant o dobrej jakości oraz o wysokim stopniu zachowania związków lotnych i korzystnych właściwościach rekonstrykcyjnych. Technika pianowa może być z powodzeniem stosowana np. do materiałów o dużej zawartości cukrów, które trudno jest wysuszyć innymi metodami [15].

---

*Dr inż. E. Jakubczyk, Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydz. Nauk o Żywności, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159C, 02-776 Warszawa*

Suszenie pianowe składa się z trzech etapów: formowanie stabilnej piany zawierającej produkt, który ma być suszony, suszenie piany do formy cienkiej warstwy (marty) oraz kompresja wysuszonego materiału poprzez rozdrobnienie do sypkiego proszku [5]. Piana jest układem dwufazowym powstającym wskutek zdyspergowania pęcherzyków powietrza w fazie ciekłej [7]. Stabilność pian odgrywa kluczową rolę w przebiegu procesu suszenia, dlatego niezbędne jest stosowanie substancji powierzchniowo czynnych, które m.in. poprzez wzrost lepkości fazy wodnej wpływają na trwałość pian [2].

Suszone owoce, jak i przeciera owocowe, są szeroko stosowane jako składniki wielu produktów spożywczych, takich jak: lody, jogurty, puddingi, wyroby cukiernicze i piekarskie [8]. Suszenie pianowe znalazło zastosowanie w suszeniu soków owocowych, ale również pulp owocowych i warzywnych. Pulpy mango [14] i banana [19] spieniano z zastosowaniem m.in. metylocelulozy, białka jaja kurzego czy monostearynianu glicerolu jako środków spieniających, a następnie suszono owiewowo.

Suszenie mikrofalowe lub konwekcyjne wspomagane mikrofalami umożliwia ogrzewanie surowca i równomierne odparowanie wody we wnętrzu materiału. Zastosowanie mikrofal pozwala na uzyskanie suszu o wysokiej jakości odżywczej i sensorycznej [18], przy jednoczesnym skróceniu czasu suszenia w porównaniu z innymi metodami.

Celem pracy było określenie wpływu mocy generatora mikrofal na kinetykę suszenia konwekcyjno-mikrofalowego i barwę spienionego przeciera jabłkowego oraz zaproponowanie modelu opisującego procesu suszenia.

### **Materiał i metody badań**

Materiał badawczy stanowił przecier jabłkowy (16,5 Brix) (Barbara S.C., Narty) spieniany z dodatkiem 2 % albuminy i 0,5 % metylocelulozy. Materiał spieniano przy użyciu miksera laboratoryjnego w ciągu 5 min. Uzyskaną pianę o gęstości  $0,31 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  nakładano na szalkę Petriego o średnicy 166 mm i suszono w suszarce konwekcyjno-mikrofalowej przy prędkości powietrza 1,8 m/s w temp. 40 °C i grubości warstwy 4 mm. Moc generatora mikrofal wynosiła odpowiednio: 0, 80, 120, 180, 250 W. Suszenie prowadzono do uzyskania stałej masy; masę suszonego materiału rejestrowano z dokładnością do 0,1g. Każdy eksperyment wykonywano w trzech powtórzeniach.

Na podstawie ubytków masy w czasie suszenia wykreślano krzywe suszenia, w funkcji względnej zawartości wody w czasie.

$$MR = \frac{u - u_r}{u_o - u_r}$$

gdzie:  $MR$  – bezwymiarowa względna zawartość wody,  $u$  – zawartość wody w czasie suszenia [kg/kg s.s.],  $u_o$  – początkowa zawartość wody [kg/kg s.s.],  $u_r$  – równowagowa zawartość wody [kg/kg s.s.].

W materiale mokrym i suszu określano zawartość wody (metodą suszenia pod obniżonym ciśnieniem w 70 °C przez 24 h).

Tabela 1

Modele matematyczne zastosowane do opisu krzywych suszenia.  
Mathematical models applied to drying curves.

Numer modelu Number of model	Nazwa modelu Name of model	Równanie modelu Equation of model
1	Newtona [3, 11] / Newton's	$MR = \exp(-k \cdot t)$
2	Page'a [3] / Page's	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
3	Hendersona i Pabisa [4] of Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
4	Logarytmiczny [3] Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$
5	Midilliego i wsp. [9] of Midillie & Co.	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$
6	Wanga i Singha [20] of Wang and Singh	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$
7	Logistyczny [17] / Logistic	$MR = b / (1 + \exp(k \cdot t))$
8	Dwuskładnikowy [17] Two factor Model	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_i \cdot t)$

Objaśnienia /Explanatory notes:

$MR$  – względna zawartość wody / moisture ratio;  $k$  i  $k_i$  – współczynniki suszarnicze / drying coefficients ( $\text{min}^{-1}$ );  $n$  – eksponent / exponent;  $t$  – czas/ time, min;  $a$  i  $b$  – współczynniki równania / coefficients of the equation.

Jednoczynnikową analizę wariancji współczynników charakteryzujących barwę materiału suszonego przy różnej mocy mikrofal przeprowadzono stosując testu Tukeya, przy  $\alpha = 0,05$ . Analizę regresji krzywych suszenia i szybkości suszenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programów Table Curve 2D i Statgraphics Plus 5.0. Porównano 8 różnych modeli stosowanych przez innych autorów do opisu krzywych suszenia materiałów w warstwie (tab. 1) w celu wyboru równania najlepiej opisującego dane eksperymentalne. Analiza statystyczna obejmowała również wyznaczenie wartości zredukowanego testu  $\chi^2$  oraz średniego błędu kwadratowego (RMSE) jako parametrów stanowiących główne kryterium w wyborze optymalnego modelu. Niskie wartości  $\chi^2$  cha-

rakteryzowały dobre dopasowanie modelu, a bliskie zero wartości RMSE wskazywały na małe różnice między wartościami wyliczonymi a eksperymentalnymi. Parametry statystyczne wyliczono z zależności:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,p} - MR_{i,e})^2}{N}}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,e} - MR_{i,p})^2}{N - n}$$

gdzie:  $MR_{i,p}$  - wyliczona (przewidywana) wartość względnej zawartości wody,  $MR_{i,e}$  - eksperymentalna wartość względnej zawartości wody,  $N$  - liczba obserwacji,  $n$  - liczba stałych w równaniu modelu.

Barwę powierzchni suszonego materiału określano za pomocą chromometru typu CR-300 firmy Minolta w systemie CIE  $L^*a^*b^*$ . Oznaczano również barwę materiału wysuszonego i rozdrobnionego do formy proszku.

## Wyniki i dyskusja

W tab. 2. przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy regresji zmian względnej zawartości wody w czasie suszenia charakteryzujące dopasowanie 9 modeli, których równania zestawiono w tab. 1.

Większość badanych modeli, w różnych warunkach suszenia charakteryzowała się wysokimi wartościami  $R^2$  od 0,920 do 0,999 z wyjątkiem modelu 1. (Newtona) zastosowanego do opisu suszenia konwekcyjno-mikrofalowego przy mocy 80 W. Porównano również średni błąd kwadratowy RMSE, który przyjmował wartości niższe niż  $5,75 \cdot 10^{-3}$  (z wyjątkiem modelu 1.). Na podstawie wyliczonych parametrów statystycznych wybrano model 5., który charakteryzował się najniższymi wartościami  $\chi^2$  ( $1 \cdot 10^{-5} \div 3,3 \cdot 10^{-4}$ ) i RMSE ( $0,0013 \div 0,0152$ ) oraz najwyższymi wartościami  $R^2$ . Model Midilliego i wsp. [9] doskonale opisywał dane eksperymentalne uzyskane podczas suszenia konwekcyjno-mikrofalowego, jak i konwekcyjnego (które w pracy oznaczono jako 0 W) spienionego materiału.

W tab. 3. zamieszczono wyliczone wartości współczynników modelu 5. suszenia spienionego przecieru w zależności od zastosowanej mocy generatora mikrofal. Na rys. 1a przedstawiono zarówno dane eksperymentalne (średnie wartości wraz z odchyleniami standardowymi), jak i krzywe regresji, które w nieznacznym stopniu odbiegają od wartości doświadczalnych.

Tabela 2

Wyniki analizy statystycznej modeli kinetyki suszenia konwekcyjno-mikrofalowego pian.

Results obtained from the statistical analysis of the models of convection-microwave drying kinetics for foams.

Numer modelu Number of model	Moc [W] Power [W]	RMSE	$\chi^2$	R <sup>2</sup>
1	0	0,0249	0,00063	0,990
	80	0,1549	0,02504	0,720
	120	0,0855	0,00767	0,935
	180	0,0587	0,00391	0,990
	250	0,0543	0,00383	0,974
2	0	0,0133	0,00018	0,997
	80	0,0217	0,00051	0,995
	120	0,0208	0,00048	0,996
	180	0,0148	0,00026	0,968
	250	0,0196	0,00045	0,997
3	0	0,0172	0,00031	0,995
	80	0,0342	0,00127	0,986
	120	0,0721	0,00575	0,954
	180	0,0495	0,00320	0,999
	250	0,0511	0,00308	0,979
4	0	0,0173	0,00031	0,995
	80	0,0014	0,00000	0,999
	120	0,0347	0,00140	0,989
	180	0,0328	0,00131	0,999
	250	0,0261	0,00089	0,995
5	0	0,0041	0,00002	0,999
	80	0,0013	0,00001	0,999
	120	0,0142	0,00025	0,998
	180	0,0103	0,00012	0,998
	250	0,0152	0,00033	0,998
6	0	0,0685	0,00502	0,920
	80	0,0135	0,00020	0,998
	120	0,0347	0,00133	0,989
	180	0,0304	0,00112	0,997
	250	0,0092	0,00010	0,999
7	0	0,0173	0,00031	0,995
	80	0,0175	0,00035	0,996
	120	0,0151	0,00026	0,998
	180	0,0171	0,00035	0,998
	250	0,0222	0,00064	0,996
8	0	0,0105	0,00012	0,998
	80	0,0342	0,00140	0,986
	120	0,0721	0,00642	0,954
	180	0,0587	0,00366	0,990
	250	0,0565	0,00461	0,979

Analiza krzywych suszenia wskazuje na istotny wpływ zastosowania mikrofal. Spieniony materiał był suszony wyłącznie konwekcyjnie (0W) 125 min do zawartości wody 0,0453 kg/kg s.s., podczas gdy przy mocy mikrofal – 80 W obserwowano 2,5-krotne skrócenie czasu suszenia. Wzrost mocy mikrofal do 120 W wpływał na dalsze skrócenie czasu suszenia do 36 min i zmniejszenie zawartości wody do 0,0134 kg/kg s.s. Spieniony przecier przy mocy 180 i 250 W suszono odpowiednio 29 i 24 min, osiągając średnią zawartość wody 0,012 kg/kg s.s.. Wang i wsp. [21] podczas suszenia konwekcyjno-mikrofalowego wyłoków jabłkowych w warstwie obserwowali 4-krotne skrócenie czasu suszenia przy wzroście mocy ze 150 do 600 W, jednocześnie analiza kinetyki suszenia wskazywała na brak obecności pierwszego okresu suszenia. W badaniach wstępnych suszenia spienionego przecieru zastosowano również moc 300 W, ale wyników tego suszenia nie zaprezentowano ze względu na dyskwalifikujące przypalenie materiału, szczególnie w jego środku.

Tabela 3

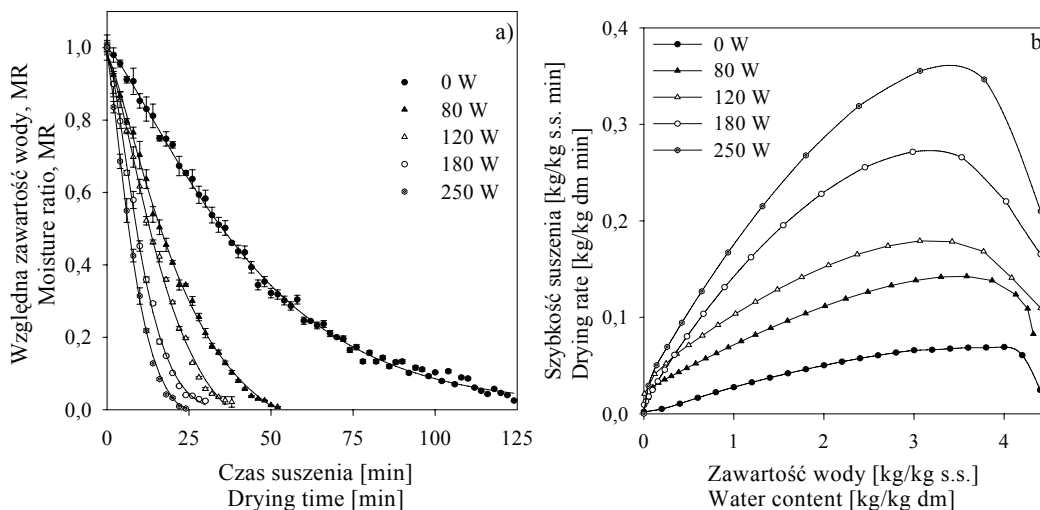
Współczynniki modelu 5. suszenia konwekcyjno-mikrofalowe spienionego przecieru.  
Coefficients of Model 5 of the convection-microwave drying of foamed pulp.

Moc [W] Power [W]	a	K	n	b
0	0,998	0,008	1,254	0,0001
80	0,985	0,020	1,242	-0,0014
120	0,976	0,018	1,376	-0,0018
180	0,987	0,028	1,437	-0,0006
250	0,987	0,056	1,305	-0,0016

W procesie suszenia spienionego przecieru jabłkowego po krótkim okresie nagrzewania materiału, w początkowej fazie suszenia obserwowano wyższe szybkości suszenia niż pod koniec procesu (rys. 1b). Najmniejszą początkową szybkością suszenia w ciągu pierwszych 5 min procesu charakteryzował się materiał suszony konwekcyjnie (0 W) 0,069 kg/kg s.s.min, a przy zastosowaniu mocy 250 W wodę usuwano z szybkością 0,271 kg/kg s.s.min. Rajkumar i wsp. [14] podczas suszenia konwekcyjnego spienionego przecieru z mango nie obserwowali pierwszego okresu suszenia i praktycznie cały proces suszenia przebiegał w okresie malejących szybkości suszenia, co jest charakterystyczne dla materiałów o wysokiej zawartości wody.

Przy wysokiej wilgotności absorpcja energii mikrofal jest wysoka, co prowadzi do uzyskania wyższych szybkości suszenia ze względu na większą dyfuzję wilgoci. Przy kontynuowaniu suszenia utrata wilgoci wpływa na zmniejszenie absorpcji mikrofal, a w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia szybkości suszenia w końcowym jego

etapie [10]. Moc mikrofal podczas suszenia istotnie wpływała na szybkość usuwania wody, przy zawartości wody 1,0 kg/kg s.s. i przy mocy 120 W przecier był suszony z prędkością o ~70 % i 30 % większą od szybkości uzyskanych odpowiednio przy mocy mikrofal 0 i 80 W. Wzrost o 15 % szybkości suszenia obserwowano przy zwiększeniu mocy z 180 do 250 W.



Rys. 1. Wpływ mocy mikrofal na przebieg: a) krzywych suszenia, b) krzywych szybkości suszenia spienionego przecieru jabłkowego.

Fig. 1. Effect of microwave power on: a) drying curves, b) drying rate curves of foamed apple pulp.

Wyznaczony parametr  $k$  modelu 5. (tab. 3) jest współczynnikiem charakteryzującym szybkość procesu usuwania wody. Zwiększenie mocy mikrofal wpływało na wzrost wartości stałej suszarniczej  $k$ . Analogiczną tendencję obserwowano podczas suszenia konwekcyjno-mikrofalowego materiałów biologicznych w warstwie. Znajomość parametru  $k$  posłużyła do wyliczenia energii aktywacji  $E_a$  na podstawie zmodyfikowanego równania Arrhenniusa, przedstawiającego zależność między kinetyką szybkości suszenia a mocą mikrofal ( $P$ ) w stosunku do masy ( $m$ ) suszonej próby [10]:

$$k = k_o \exp\left(\frac{-E_a \cdot m}{P}\right)$$

gdzie  $k_o$  – stała równania [ $\text{min}^{-1}$ ].

Przeprowadzając analizę regresji zależności między współczynnikiem  $k$  a mocą odniesioną do ilości próby wyznaczono energię aktywacji  $E_a = 6,89 \text{ W/g}$  i stałą  $k_o = 0,17 \text{ min}^{-1}$ . Energia aktywacji wskazuje na szybkość procesu, w przypadku innych materiałów biologicznych suszonych konwekcyjno-mikrofalowo obserwowano zbliżony poziom energii aktywacji w zakresie 5 - 13 W/g [1, 10].

Tabela 4

Wyniki pomiaru barwy pian suszonych konwekcyjno-mikrofalowo.

Measuring results of colour of foams dried using a convection-microwave proces

Moc [W] Power [W]	L*	a*	b*
0	82,83 ± 0,78	+2,37 ± 0,07	+13,86 ± 0,62
80	80,57 ± 0,15	+0,86 ± 0,08	+13,49 ± 0,77
180	80,94 ± 0,22	+0,85 ± 0,04	+13,64 ± 0,99
250	73,81 ± 0,34	+1,47 ± 0,02	+16,92 ± 1,22

Analiza statystyczna barwy materiału rozdrobnionego i powierzchni wysuszonej pian nie wykazała istotnych różnic, stąd w tab. 4. przedstawiono wyniki jasności i współczynników chromatycznych powierzchni suszu. Zastosowana moc mikrofal wpływała istotnie na parametr jasności; wraz ze wzrostem mocy powierzchnia materiału stawała się nieznacznie ciemniejsza. W zakresie mocy mikrofal od 80 do 180 W nie obserwowano istotnych statystycznie różnic barwy materiału. Przy czym największe zmiany parametrów barwy obserwowano przy wzroście mocy mikrofal ze 180 do 250 W. Rząca i Witrowa-Rajchert [16] podczas suszenia konwekcyjno-mikrofalowego obserwowały zmniejszenie parametru L wraz ze wzrostem mocy ze 150 do 300 W. Nieznaczne zmiany jasności podczas suszenia obserwowano również podczas suszenia borówek, również nasycenie barwy ulegało zmniejszeniu [12]. Podobną tendencję obserwowano podczas suszenia mikrofalowo-próżniowego truskawek, gdyż proces wpływał na pociemnienie barwy w porównaniu z owocami świeżymi przy niezmiennych parametrach a\* i b\* [13]. Piany suszone konwekcyjnie-mikrofalowo charakteryzowały się niższymi wartościami parametru a\* charakteryzującego barwę czerwoną. Zaremba i wsp. [22] podczas suszenia konwekcyjnego jabłek różnych odmian negatywnie oceniali owoce o zbyt wysokich wartościach a\*, co wskazywać mogło na zachodzące podczas suszenia procesy brunatnienia. Moc zastosowanych mikrofal nie wpływała istotnie na wartość parametru b\*.

## Wnioski

1. Proces suszenia konwekcyjnego, jak i konwekcyjno-mikrofalowego spienionego przecieru jabłkowego może być z powodzeniem opisany modelem Midilliego i wsp., który uwzględnia również opis krzywych suszenia przy różnej mocy generatora mikrofal.
2. Moc mikrofal istotnie wpływała na skrócenie czasu suszenia spienionego przecieru; 2,5-krotnie przy mocy 80 W i aż 5-krotnie przy 250 W. Proces suszenia, po krótkim 5-minutowym etapie nagrzewania przebiegał w okresie malejących szyb-



- kości suszenia, co związane było z redukcją wilgoci w materiale i mniejszą zdolnością pochłaniania energii mikrofalowej.
3. Szybkość suszenia przecieru była istotnie zależna od mocy mikrofal. Wzrost mocy generatora z 80 do 250 W wpływał na ponad 2-krotne zwiększenie szybkości suszenia przy zawartości wody 1,0 kg/kg s.s.
  4. Wyniki analizy barwy wskazują na obniżenie wartości parametru  $L^*$  materiału suszonego przy mocy mikrofal wynoszącej 250 W. Stosowanie zbyt wysokich mocy mikrofal, powyżej 250 W, może prowadzić do miejscowego przypalenia materiału.
  5. Ze względu na ciemnienie materiału, w trakcie suszenia konwekcyjno-mikrofalowego przy 250 W, wskazane jest stosowanie niższych mocy nieobniżających jakości suszu. Suszenie przy 180 W umożliwia otrzymanie produktu o jaśniejszej barwie, a jednocześnie szybkości suszenia przy średniej zawartości wody w materiale są tylko o 15 % niższe od wartości uzyskanych przy 250 W.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007-2009 jako projekt badawczy nr N312 2478 33; była prezentowana podczas I Sympozjum Żywności z okazji 30-lecia powołania specjalizacji Inżynieria Żywności na Wydziale Nauk o Żywności SGGW, Warszawa, 5 - 6 czerwca 2008 r.*

### Literatura

- [1] Dadali G., Apar D. K., Özbek B.: Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technol.*, 2007, **25**, 917-924.
- [2] Darewicz M., Dziuba J.: Struktura a właściwości funkcjonalne białek mleka. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2005, **2 (43)**, 47-60.
- [3] Ertekin C., Yaldiz O.: Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. Food Eng.*, 2004, **63**, 349-359.
- [4] Henderson S. M., Pabis S.: Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. *J. Agric. Eng. Res.*, 1961, **6**, 169-174.
- [5] Karim A.A., Wai C.C.: Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola L.*) puree. Stability and air drying characteristics. *Food Chem.*, 1999, **64**, 337-343.
- [6] King C.J.: Nowe techniki odwadniania. W: Nowe metody zagęszczania i suszenia żywności – pod. red. A Spicera. WNT, Warszawa 1980, ss. 428-486.
- [7] Koch R., Noworyta A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej. WNT, Warszawa 1998.
- [8] Komes D., Lovrić T., Kovačević Ganić K.: Aroma of dehydrated pear products. *LWT*, 2007, **40**, 1578-1586.
- [9] Midilli A., Kucuk H., Yapar Z.: A new model for single layer drying. *Drying Technol.*, 2002, **20**, 1503-1513.
- [10] Özbek B., Dadali G.: Thin-layer drying characteristics and modeling of mint leaves undergoing microwave treatment. *J. Food Eng.*, 2007, **83**, 541-549.

- [11] Pangavhane D.R., Sawhney R.L., Sarsavadia P.N.: Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson seedless grapes. *J. Food Eng.*, 1999, **39**, 211-216.
- [12] Paślawska M.: Zmiany barwy suszonych borówek i malin zachodzące podczas przechowywania. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2006, **1 (46)**, 86-92.
- [13] Paślawska M., Pełka A.: Właściwości rekonstrykcyjne i barwa suszu truskawkowego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2006, **1 (46)**, 93-99.
- [14] Rajkumar P., Kailappan R., Viswanathan R., Raghavan G.S.V.: Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. *J. Food Eng.*, 2007, **79**, 1452-1459.
- [15] Ratti C., Kudra T.: Drying of foamed biological materials: opportunities and challenges. *Drying Technol.*, 2006, **24**, 1101-1108.
- [16] Rząca M., Witrowa-Rajchert D.: Wpływ techniki suszenia oraz warunków przechowywania na właściwości rekonstrykcyjne i higroskopijne suszu jabłkowego, *Acta Agrophys.*, 2007, **9 (2)**, 471-479.
- [17] Soysal Y.: Mathematical modeling and evaluation of microwave drying kinetics of mint. *J. Appl. Sci.*, 2005, **5 (7)**, 1266-1274.
- [18] Szarycz M., Jałoszyński K., Pełka A., Ostrowska M., Świerk B.: Wpływ parametrów mikrofalowo-próżniowego suszenia truskawek na przebieg procesu i skurcz suszarniczy. *Inż. Roln.*, 2006, **4 (79)**, 229-237.
- [19] Thuwapanichayanan R., Prachayawarakorn S., Soponronnarit S.: Drying characteristics and quality of banana foam mat. *J. Food Eng.*, 2008, **86**, 573-583.
- [20] Wang C.Y., Singh, R.P.: Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 1978, **11**, 668-672.
- [21] Wang Z., Sun J., Chen F., Liao X., Hu X.: Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *J. Food Eng.*, 2007, **80**, 536-544.
- [22] Zaremba R., Biller E., Ekielski A.: Zmiany barwy jabłek w czasie przebiegu procesu suszenia konwekcyjnego. *Inż. Roln.*, 2007, **5 (93)**, 429-435.

## CONVECTION-MICROWAVE DRYING PROFILE OF FOAMED APPLE PULP

### Summary

The objective of this study was to determine the effect of output power of a microwave generator on the kinetics of convection-microwave drying process and on the colour of foamed apple pulp, as well as to suggest a model describing the drying process kinetics. The apple pulp was foamed with 2 % albumin and 0.5 % methylcellulose during a 5 minute period. A 4 mm thick layer of the foamed pulp produced was dried in a combined convection-microwave system at 60 °C, at an air speed of 1.8 m/s. The output power of the microwave generator was: 0, 80, 120, 180, and 250 W, respectively. After the drying process was completed, the moisture content and the surface colour of samples were determined in CIEL\*a\*b\* system using a Minolta chromameter. The analysis of kinetics of the convective-drying process showed that there was no period of a constant drying rate. For the most part, only a period of falling drying rate was found. The microwave output power significantly impacted the decrease in the drying period of foamed apple pulp. At a power of 250 W applied, the drying period was 5 times shorter compared to the drying using solely convection. When drying at 180 W, it was possible to obtain a product of a lighter colour, and, at the same time, the drying rate at a water content of 1.0 kg/kg d.m. was 15 % lower than the respective values obtained at 250 W.

**Key words:** foam drying, microwave power, drying kinetics, colour 