

**Artur Wiktor, Małgorzata Nowacka, Magdalena Śledź,
Magdalena Selke, Dorota Witrowa-Rajchert**

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
artur_wiktor@sggw.pl

KINETYKA SUSZENIA KONWEKCYJNEGO WSPOMAGANEGO OGRZEWANIEM MIKROFALOWYM MIĄŻSZU JABŁKA – DOBÓR MODELU MATEMATYCZNEGO

Streszczenie: Celem badania było modelowanie matematyczne kinetyki suszenia konwekcyjnego, mikrofalowo-konwekcyjnego oraz dwustopniowego (hybrydowego) miąższu jabłka. Suszenie dwustopniowe realizowano metodą konwekcyjną z dosuszaniem metodą mikrofalowo-konwekcyjną lub mikrofalowo-konwekcyjnie z dosuszaniem metodą konwekcyjną. Suszenie konwekcyjne odbywało się w temperaturze powietrza 70 °C i prędkości jego przepływu 2,5 m/s. Suszenie mikrofalowo-konwekcyjne prowadzono w temperaturze powietrza 40 °C, przy prędkości jego przepływu 3,5 m/s oraz przy mocy mikrofal 300 W. Zastosowanie metod hybrydowych skróciło czas procesu nawet o 48% w porównaniu do techniki konwekcyjnej. Spośród 9 modeli służących do opisu kinetyki suszenia, model Midillego i in. [2002] najlepiej opisywał przebieg procesu suszenia konwekcyjnego, mikrofalowo-konwekcyjnego oraz dwustopniowego.

Słowa kluczowe: suszenie dwustopniowe, kinetyka suszenia, modelowanie matematyczne.

1. Wstęp

Całkowite zużycie energii na świecie wzrosło od 4676 Mtoe w 1973 r. do 8428 Mtoe w 2008 r.. Oznacza to, że wzrost wynosił 80%. Mimo że udział przemysłu w ogólnej konsumpcji energii zmalał w tym okresie, to wynosi on ciągle ponad 27% [International Energy Agency 2010]. Przemysł spożywczy jest znaczącą częścią gospodarki na świecie i w Polsce. W Polsce zużycie energii przez przemysł spożywczy szacuje się na ok. 10% bezpośredniej konsumpcji energii. Tak wysoka energochłonność związana jest także z bardzo dużą emisją dwutlenku węgla, jednego z najważniejszych gazów cieplarnianych, która w 2008 r. wynosiła 29 381 Mt CO₂ [International Energy Agency 2010]. Od wielu lat podejmuje się liczne działania mające na celu zredukowanie energochłonności oraz zredukowanie emisji gazów cieplarnianych, wprowadzając w życie założenia koncepcji zrównoważonego rozwoju. Podejmowa-

ne działania można podzielić na działania pośrednie, związane przykładowo z tworzeniem nowych regulacji prawnych (np. ratyfikowanego przez wszystkie państwa członkowskie Unii Europejskiej Protokołu z Kioto) oraz działania bezpośrednie, związane z tworzeniem i wykorzystywaniem nowych technologii wspomagających procesy i operacje jednostkowe. Jedną z najczęściej stosowanych w przemyśle spożywczym operacji jednostkowych jest suszenie, będące jednocześnie operacją bardzo energochłonną. Wśród metod mających na celu przyspieszenie tego procesu oraz obniżenie jego energochłonności można wymienić zastosowanie ultradźwięków [Kobus 2005; Fernandes i in. 2008], pulsacyjnego pola elektrycznego [Gachovska i in. 2009; Shynkaryk i in. 2008] czy wysokich ciśnień [Yucel i in. 2010].

Innym podejściem jest zastosowanie niekonwencjonalnych lub kombinowanych (hybrydowych) technik suszenia, np. suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego czy promiennikowo-konwekcyjnego [Kowalski, Rajewska 2009]. Działania tego typu, poprzez kształtowanie kinetyki procesu oraz właściwości fizykochemicznych produktu, najczęściej pozytywnie wpływają na rachunek ekonomiczny suszenia. Interesującym rozwiązaniem, wykazującym duży potencjał związany z redukcją czasu suszenia jest hybrydowe suszenie dwustopniowe. Technologia ta polega na usunięciu wody z materiału do pewnej wilgotności przy użyciu jednej metody (np. konwekcyjnie), a następnie dosuszeniu przy użyciu innej techniki (np. mikrofalowo). Działanie tego typu nie tylko może prowadzić do wyeliminowania wad niektórych metod suszenia, ale także umożliwia stworzenie żywności, charakteryzującej się określoną jakością, tzw. żywności projektowanej [Witrowa-Rajchert 2011]. Przykładowo jedną z głównych wad suszenia konwekcyjnego jest wspomniana energochłonność, co się wiąże z koniecznością ogrzania powietrza, będącego medium, a dopiero później materiału. W przypadku techniki zarówno suszenia mikrofalowego, jak i suszenia podczerwonego energia potrzebna do odparowania wody dostarczana jest poprzez fale elektromagnetyczne o wysokiej częstotliwości bezpośrednio do surowca [Lewicki 2006]. Z kolei niewłaściwie prowadzone suszenie mikrofalowe może powodować lokalne przypiekanie materiału [Zhang i in. 2006]. Fakty te jednoznacznie wskazują nie tylko to, że wybór odpowiedniej techniki suszenia powinien być dokonany w oparciu o bardzo wiele czynników, często o zmiennym charakterze, ale także na celowość stosowania technik hybrydowych lub dwustopniowych.

Ważnym aspektem w przypadku każdej operacji jednostkowej jest modelowanie matematyczne. Umożliwia ono nie tylko ilościowe opisanie otrzymanych danych, ale także prognozowanie przebiegu procesu. Odpowiednio dobrany model, charakteryzujący się dużą dokładnością, może być wykorzystywany jako jeden z instrumentów ułatwiających technologowi podjęcie kluczowych decyzji związanych z czasem suszenia materiału do odpowiedniej wilgotności oraz z optymalizacją procesu [Corzo i in. 2008]. W związku z tym proces podejmowania decyzji o zastosowaniu odpowiedniej techniki suszenia, poza analizą technologiczno-ekonomiczną, powinien uwzględniać także wybór odpowiedniego modelu matematycznego.

Celem pracy było modelowanie matematyczne procesu suszenia dwustopniowego miąższu jabłka, z zastosowaniem techniki konwekcyjnej i mikrofalowo-konwekcyjnej, oraz wybór modelu najlepiej opisującego dany proces.

2. Metodyka

2.1. Materiał

Materiał do badań stanowiły nieuszkodzone jabłka odmiany Idared, pochodzące z Pola Doświadczalnego Wydziału Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Surowiec przechowywano w komorze chłodniczej w temperaturze 4–5 °C i wilgotności względnej 80–90%. Przed każdym eksperymentem surowiec wyjmowano z chłodni, a następnie rozdrabniano przy użyciu krawalnicy mechanicznej Robot Coupe typu CL50 do postaci plastrów o grubości $2,5 \pm 0,1$ mm. Następnie, przy użyciu korkoboru, z miąższu wycinano cylindry o średnicy 30 mm. Tak przygotowany materiał umieszczano na 10 min w 0,1-procentowym wodnym roztworze kwasu cytrynowego, w celu ograniczenia procesu enzymatycznego brunatnienia.

2.2. Suszenie

Suszenie konwekcyjne prowadzono w suszarce laboratoryjnej, przy równoległym do warstwy materiału przepływie powietrza suszącego o temperaturze 70 °C i prędkości 2,5 m/s. Materiał układano na sitach przy obciążeniu 1,92 kg/m². Zmiany masy materiału rejestrowano przy użyciu oprogramowania POMIAR, sprzężonego z wagą typu A 5000 firmy AXIS, z dokładnością $\pm 0,1$ g. Proces trwał do uzyskania równowagowej zawartości wody (uzyskania stałej masy). Suszenie wykonano w dwóch powtórzeniach.

Suszenie mikrofalowo-konwekcyjne prowadzono w suszarce laboratoryjnej, przy prostopadłym do warstwy materiału przepływie powietrza suszącego o temperaturze wynoszącej 40 °C, prędkości $3,5 \pm 0,2$ m/s, mocy mikrofal 300 W, przy obciążeniu sita wynoszącym 24 kg/m². Zmiany masy suszonego materiału rejestrowano przy użyciu oprogramowania PROMIS, sprzężonego z wagą typu A 5000 firmy AXIS z dokładnością $\pm 0,1$ g. W trakcie trwania procesu za pomocą pirometru rejestrowano temperaturę. Pomiar masy i temperatury następował w momencie wyłączenia mikrofal i przepływu powietrza, Proces trwał do uzyskania suszu o zawartości wody ok. 10%. Suszenie wykonano w dwóch powtórzeniach.

Suszenie dwustopniowe prowadzono z zastosowaniem techniki mikrofalowo-konwekcyjnej i konwekcyjnej. Pierwszy stopień realizowany był konwekcyjnie lub mikrofalowo-konwekcyjnie do osiągnięcia przez materiał zawartości wody 30 lub 50%. Drugi stopień prowadzono odpowiednio techniką mikrofalowo-konwekcyjną lub konwekcyjną. Parametry suszenia konwekcyjnego wynosiły: 70 °C, 2,5 m/s,

a mikrofalowo-konwekcyjnego 300 W, 40 °C i 3,5 m/s. Proces trwał do uzyskania równowagowej zawartości wody (uzyskania stałej masy). Suszenie wykonano w dwóch powtórzeniach.

2.3. Oznaczanie zawartości suchej substancji

Suchą substancję oznaczano zgodnie z normą PN-90/A-75104. Masę naważki określano przy użyciu wagi analitycznej z dokładnością do 0,0001 g i suszono w temperaturze 95 °C do uzyskania stałej masy.

2.4. Obliczanie zredukowanej zawartości wody

W celu przedstawienia kinetyki procesu suszenia obliczono zredukowaną zawartość wody (względną zawartość wody) MR z następującego wzoru:

$$MR = \frac{u_\tau - u_r}{u_0 - u_r},$$

gdzie: MR – zredukowana zawartość wody [–],

u_r – równowagowa zawartość wody [g H₂O/g s.s.],

u_0 – początkowa zawartość wody [g H₂O/g s.s.],

u_τ – zawartość wody po czasie τ [g H₂O/g s.s.],

2.5. Modelowanie matematyczne

W celu matematycznego opisu przebiegu krzywych suszenia zastosowano 9 często spotykanych w literaturze różnych modeli, przedstawionych w tab. 1. Analizę regresji krzywych suszenia i szybkości suszenia przeprowadzono z wykorzystaniem programów Table Curve 2D v 5.01.

Tabela 1. Modele matematyczne użyte do opisania przebiegu kinetyki procesu suszenia mięszu jabłka

Numer	Nazwa modelu	Równanie	Źródło
1	Newtona	$MR = \exp(-k \cdot \tau)$	[Demir i in. 2004]
2	Pagea	$MR = \exp(-k \cdot \tau^a)$	[Sarimeseli 2011]
3	Hendersona i Pabisa	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau)$	[Rahman i in. 1997]
4	Logarytmiczny	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b$	[Sarimeseli 2011]
5	Midillego i in.	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau^c) + b \cdot \tau$	[Midilli i in. 2002]
6	Wanga i Singha	$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$	[Wang, Singh 1978]
7	Logistyczny	$MR = \frac{b}{(1 + a \cdot \exp(k \cdot \tau))}$	[Soysal i in. 2006]
8	Dwuczynnikowy	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b \cdot \exp(-k, \cdot \tau)$	[Arslan i in. 2010]
9	Uproszczone II prawo Ficka	$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \tau}{4 \cdot L^2}\right)$	[Ramaswamy, Nsonzi 1998]

Źródło: opracowanie własne.

2.6. Wyznaczanie efektywnego współczynnika dyfuzji wody

Efektywny współczynnik dyfuzji wody D_{eff} wyznaczono metodą regresji na podstawie równania (numer 9, tab. 1), opierającego się na II prawie Ficka, które opisuje dyfuzję nieustaloną w płycie nieskończonej. Równanie to jest prawdziwe przy założeniu, że efektywny współczynnik dyfuzji jest stały podczas procesu suszenia oraz że skurcz suszarniczy jest nieistotny [Ramaswamy, Nsonzi 1998; Zawiślak, Lisowa 2002].

2.7. Analiza statystyczna

W celu wyboru modelu najlepiej opisującego uzyskane dane wyznaczono średni błąd kwadratowy RMSE, wartości zredukowanego testu χ^2 oraz współczynniki zmienności resztowej V_e , korzystając z zależności:

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

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

$$V_e = \frac{\sqrt{\chi^2}}{Y} \cdot 100\%,$$

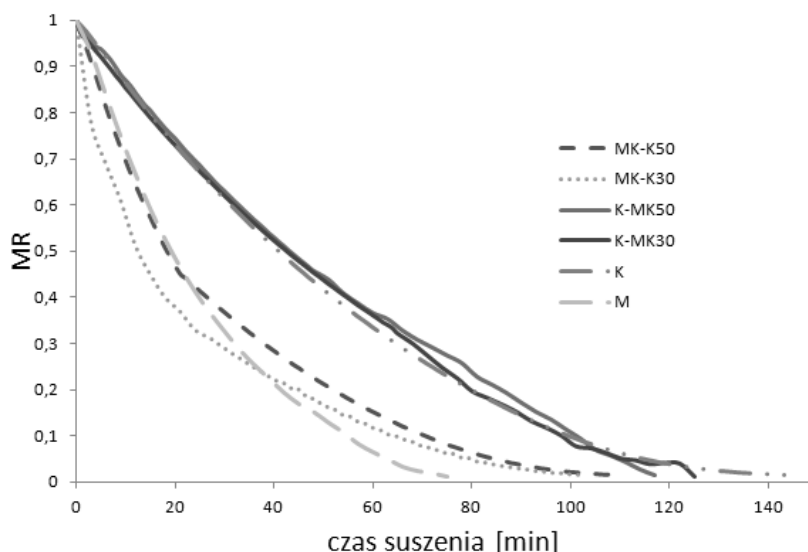
gdzie: $MR_{i,p}$ – wyliczona (przewidywana) wartość względnej zawartości wody,
 $MR_{i,e}$ – eksperymentalna wartość względnej zawartości wody,
 N – liczba obserwacji,
 n – liczba parametrów w równaniu modelu,
 Y – średnia eksperymentalna wartość względnej zawartości wody MR .

3. Wyniki i dyskusja

Rysunek 1 przedstawia kinetykę procesu suszenia mięszu jabłka, w zależności od zastosowanej metody. Można zaobserwować, że zastosowanie zarówno suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego, jak i metody dwustopniowej, w różnej kombinacji, istotnie wpływało na przebieg procesu. Najkrótszym czasem suszenia charakteryzowała się próbka suszona metodą mikrofalowo-konwekcyjną (rys. 2). Proces trwał 75 min, co oznacza, że był krótszy o ponad 48% w porównaniu z czasem suszenia konwekcyjnego. Spośród operacji realizowanych metodami dwustopniowymi, zastosowanie metody mikrofalowo-konwekcyjnej w pierwszej części skutkowało większą redukcją czasu suszenia. Wśród nich krócej suszyły się próbki oznaczone

jako MK-K30, czyli suszone w pierwszym etapie do 30% wilgotności materiału metodą mikrofalowo-konwekcyjną, a następnie dosuszane konwekcyjnie. W tym przypadku proces trwał 104 min i był krótszy o 28% w porównaniu z metodą konwencjonalną. Badania przeprowadzone przez Therdtthai i Zhou [2009] również wskazują, że zastosowanie mikrofal skraca czas suszenia nawet o 85–95% w porównaniu z metodą tradycyjną.

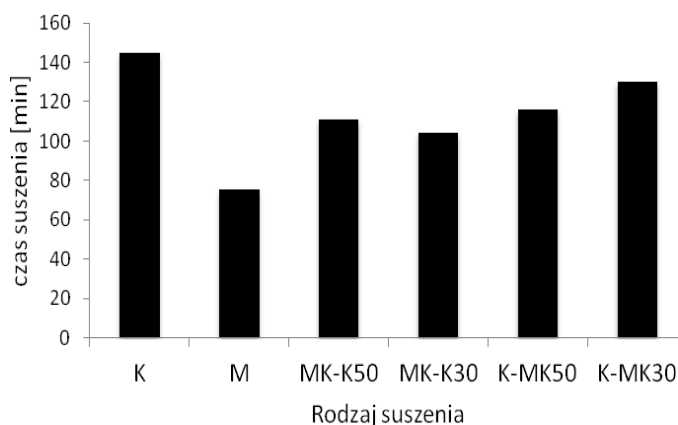
W tabeli 2 przedstawiono wyniki analizy regresji przeprowadzonej w przypadku różnych metod suszenia, w zależności od zastosowanego modelu matematycznego. Większość ocenianych modeli wykazywała dobre dopasowanie do danych empirycznych, o czym świadczą wysokie wartości współczynnika determinacji R^2 , którego wartość zawiera się pomiędzy 0,965 a 0,999.



Rys. 1. Kinetyka procesu w zależności od metody suszenia (K – suszenie konwekcyjne; M – suszenie mikrofalowo-konwekcyjne; MK-K50 – suszenie mikrofalowo-konwekcyjne do 50% wilgotności, a następnie dosuszanie konwekcyjne; MK-K30 – suszenie mikrofalowo-konwekcyjne do 30% wilgotności, a następnie dosuszanie konwekcyjne; K-MK50 – suszenie konwekcyjne do 50% wilgotności, a następnie dosuszanie mikrofalowo-konwekcyjne; K-MK30 – suszenie konwekcyjne do 30% wilgotności, a następnie dosuszanie mikrofalowo-konwekcyjne)

Źródło: opracowanie własne.

Wartości RMSE oraz χ^2 wahały się odpowiednio w granicach 0,0028–0,0436 oraz 0,00003–0,00180, przy czym niskie wartości tych współczynników świadczą o dobrym dopasowaniu modelu oraz o małych różnicach pomiędzy danymi uzyskanymi empirycznie a wyliczonymi na podstawie modelu. Współczynnik zmienności resztowej V_e informuje z kolei, o ile procent średniej arytmetycznej doświadczalnej zredukowanej zawartości wody MR wartości przewidywane danym modelem odchylają się od doświadczalnej wartości zredukowanej zawartości wody. Jeżeli obli-



Rys. 2. Czas suszenia miąższu jabłka w zależności od metody suszenia

Źródło: opracowanie własne.

czone wartości V_e zawierają się w granicach od 0 do 20%, można uznać dany model za dopuszczalny do stosowania. W omawianych doświadczeniach wartości V_e wynosiły od 1,4 do 19,7%, co potwierdza możliwość zastosowania wybranych modeli matematycznych do opisu kinetyki procesu suszenia.

Tabela 2. Wyniki analizy statystycznej modelowania matematycznego suszenia miąższu jabłka

Numer	Metoda	R^2	RMSE	χ^2	V_e
1	2	3	4	5	6
1	M	0,991	0,0148	0,00085	8,7
	K	0,978	0,0436	0,00089	9,1
	MK-K30	0,965	0,0328	0,00109	19,7
	MK-K50	0,993	0,0167	0,00028	8,3
	K-MK30	0,979	0,0367	0,00153	7,8
	K-MK50	0,976	0,0361	0,00180	7,9
2	M	0,998	0,0067	0,00016	3,8
	K	0,996	0,0165	0,00027	5,0
	MK-K30	0,991	0,0164	0,00027	9,9
	MK-K50	0,994	0,0160	0,00026	8,0
	K-MK30	0,991	0,0243	0,00060	4,9
	K-MK50	0,988	0,0275	0,00094	5,8
3	M	0,994	0,0126	0,00057	7,2
	K	0,985	0,0355	0,00128	10,8
	MK-K30	0,984	0,0222	0,00050	13,4
	MK-K50	0,993	0,0161	0,00026	8,0
	K-MK30	0,982	0,0359	0,00132	7,2
	K-MK50	0,978	0,0368	0,00169	7,7

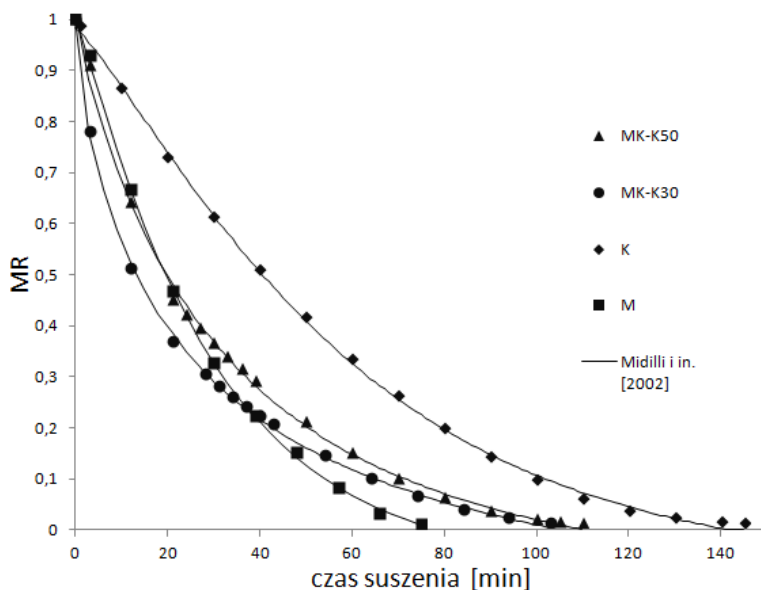
Tabela 2, cd.

1	2	3	4	5	6
4	M	0,994	0,0127	0,00061	7,4
	K	0,984	0,0375	0,00143	11,5
	MK-K30	0,984	0,0221	0,00050	13,4
	MK-K50	0,994	0,0155	0,00022	7,4
	K-MK30	0,982	0,0361	0,00135	7,3
	K-MK50	0,978	0,0370	0,00173	7,8
5	M	0,999	0,0028	0,00003	1,9
	K	0,999	0,0074	0,00005	2,3
	MK-K30	0,998	0,0075	0,00006	4,6
	MK-K50	0,997	0,0095	0,00009	4,8
	K-MK30	0,999	0,0075	0,00006	1,7
	K-MK50	0,999	0,0061	0,00005	1,4
6	M	0,995	0,0115	0,00049	6,7
	K	–	–	–	–
	MK-K30	–	–	–	–
	MK-K50	–	–	–	–
	K-MK30	0,998	0,0106	0,00011	2,1
	K-MK50	0,996	0,0153	0,00029	3,2
7	M	0,994	0,0126	0,00060	7,4
	K	0,985	0,0355	0,00128	10,9
	MK-K30	0,984	0,0222	0,00051	13,5
	MK-K50	0,994	0,0222	0,00051	8,1
	K-MK30	0,982	0,0161	0,00026	2,2
	K-MK50	0,978	0,0368	0,00172	7,8
8	M	0,994	0,0126	0,00063	7,5
	K	0,985	0,0355	0,00129	10,9
	MK-K30	0,995	0,0120	0,00015	7,4
	MK-K50	0,994	0,0161	0,00027	8,1
	K-MK30	0,982	0,0359	0,00135	7,3
	K-MK50	0,978	0,0368	0,00174	7,8
9	M	0,994	0,0126	0,00057	7,2
	K	0,985	0,0355	0,00128	10,8
	MK-K30	0,984	0,0222	0,00050	13,4
	MK-K50	0,994	0,0159	0,00026	8,0
	K-MK30	0,972	0,0359	0,00132	7,2
	K-MK50	0,978	0,0368	0,00025	7,7

Źródło: opracowanie własne.

Warto zauważyć, że model nr 6, czyli model Wanga i Singha [1978], pomimo wysokiego współczynnika determinacji oraz niskich RMSE i χ^2 , w trzech przypadkach (K, MK-K30 oraz MK-K50) niewłaściwie opisywał dane eksperymentalne. W wyliczonym przebiegu krzywej suszenia obserwowano jej ekstremum (mini-

mum), co oznaczało, że szybkość suszenia przybierałaby wartości niedodatnie. Spośród wszystkich modeli najwyższymi wartościami R^2 , najniższymi RMSE, χ^2 i V_e wyróżnił się model nr 5, opisany równaniem zaproponowanym przez Midillego i in. [2002]. Jakubczyk [2009], badając charakterystykę suszenia konwekcyjno-mikrofalowego spienionego przecieru jabłkowego, również uznała model Midillego i in. [2002] za model najlepiej opisujący przebieg suszenia. W tabeli 3 podano wyliczone współczynniki modelu Midillego i in. [2002], a na rys. 3 porównano wybrane krzywe suszenia empiryczne oraz przewidywane na podstawie równania modelu Midillego i in. [2002].



Rys. 3. Wybrane doświadczalne oraz teoretyczne (przewidywane na podstawie modelu Midillego i in. [2002]) krzywe suszenia mięszu jabłka

Źródło: opracowanie własne.

Model ten posłużył także do wyliczenia szybkości suszenia badanych próbek mięszu jabłka, w zależności od zastosowanej metody (rys. 4). Największą szybkość suszenia w początkowym okresie procesu zaobserwowano w przypadku zastosowania metody dwustopniowej MK-K30. Jabłka wysuszone przy użyciu tej metody charakteryzowały się również największą wartością współczynnika suszarniczego k ($0,1219 \text{ min}^{-1}$), występującym w równaniu Midillego i in. [2002], który to współczynnik również może być powiązany z szybkością suszenia.

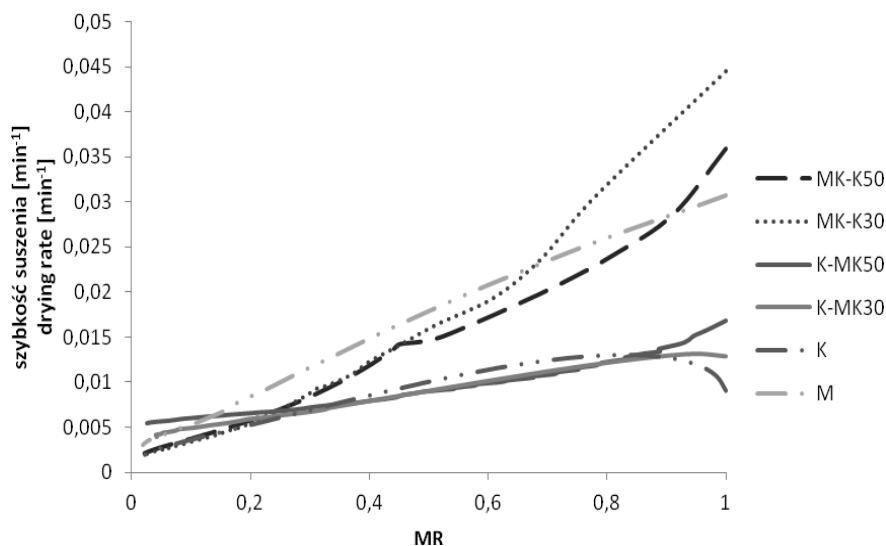
Szybkość suszenia, w przypadku metody zarówno MK-K30 jak i MK-K50, malała znacznie odpowiednio przy $MR = 0,7$ i $MR = 0,5$. Fakt ten wiąże się ze zmianą technologii (stopnia suszenia) z mikrofalowo-konwekcyjnego na konwekcyjny przy podanych powyżej bezwymiarowych zawartościach wody. Analiza krzywych szyb-

Tabela 3. Współczynniki równania modelu 5 [Midilli i in. 2002] opisującego przebieg suszenia miększu jabłka w zależności od metody

Metoda	a	k	c	b
MK-K30	1,0046	0,1219	0,6656	-0,0006
MK-K50	1,0212	0,0580	0,8302	-0,0005
K-MK30	0,9855	0,0113	1,0435	-0,0013
K-MK50	0,9873	0,0159	0,9120	-0,0026
K	0,9839	0,0074	1,2065	-0,0004
M	1,0107	0,0286	1,0639	-0,0006

Źródło: opracowanie własne.

kości suszenia pozwala także wnioskować, że zastosowanie techniki mikrofalowo-konwekcyjnej na początku procesu (w miejsce techniki konwekcyjnej) bardziej modyfikuje przebieg suszenia niż sytuacja odwrotna.



Rys. 4. Szybkość suszenia miększu jabłka w zależności od metody

Źródło: opracowanie własne.

Krzywe szybkości suszenia jabłek suszonych najpierw konwekcyjnie, a następnie dosuszanych mikrofalowo-konwekcyjnie tylko nieznacznie różnią się od krzywych uzyskanych dla jabłek suszonych wyłącznie konwekcyjnie, a największą różnicę obserwuje się pod koniec trwania procesu. Ten fakt oczywiście wiąże się z aplikacją energii mikrofalowej, wspomagającej usuwanie wody z produktu. Osiąg-

nięcie lepszych rezultatów w przypadku zastosowania techniki mikrofalowo-konwekcyjnej jako pierwszego stopnia procesu niż w przypadku dosuszania tą techniką, można wytłumaczyć mechanizmem oddziaływania energii mikrofalowej na materiał dielektryczny, jakim jest m.in. miąższ jabłka. Ekspozycja żywności na działanie fal mikrofalowych wiąże się z jej ogrzaniem wskutek tarcia, będącego konsekwencją dwubiegunowej rotacji dipoli wody oraz przewodnictwa jonowego [Pijanowski i in. 2004]. Wielkością fizyczną determinującą zachowanie się żywności w obecności energii mikrofalowej jest przenikalność elektryczna ε^* , której najważniejszym składnikiem jest stała dielektryczna ε' , odnosząca się do pojemności elektrycznej danej substancji. ε' wpływa także na głębokość penetracji materiału przez mikrofałe o określonej długości. Wartość stałej dielektrycznej w dużym stopniu zależy od zawartości wody w materiale – im większa wilgotność materiału tym większa wartość ε' . Wpływ na właściwości dielektryczne materiału ma również temperatura. Zależność ta ma jednak charakter złożony. Można jednak stwierdzić, że przy częstotliwościach fal występujących w reaktorach mikrofalowych występujących w przemyśle spożywczym (915 MHz – 2425 MHz) [Pijanowski i in. 2004], stała dielektryczna wraz ze wzrostem temperatury maleje [Jakubczyk 2010]. Odnosząc powyższe do warunków w omawianym doświadczeniu, można stwierdzić, że w przypadku metod dwustopniowych rozpoczynających się od techniki mikrofalowo-konwekcyjnej warunki działania energii mikrofalowej były korzystniejsze. Fakt ten wynikał z wyższej zawartości wody w materiale oraz jego niższej temperatury na początku procesu suszenia (niższej niż temperatura medium), w porównaniu do sytuacji z zastosowaniem tej techniki do dosuszania produktu w stopniu drugim analizowanej technologii.

Współczynnik dyfuzji wody D_{eff} suszonego mięszu jabłka charakteryzuje jego właściwości dyfuzyjne, wpływające na przebieg wymiany masy w układzie. Z danych umieszczonych w tab. 4 wynika, że materiał suszony techniką mikrofalowo-konwekcyjną charakteryzował się najwyższą wartością tego współczynnika.

Najniższy współczynnik dyfuzji wody otrzymano w przypadku jabłek suszonych metodą dwustopniową z wykorzystaniem techniki konwekcyjnej w stopniu

Tabela 4. Wartości współczynnika dyfuzji wody w mięszu jabłka w zależności od zastosowanej metody suszenia

Metoda	$D_{\text{eff}} \cdot 10^9$ [m ² /s]
MK-K30	1,491
MK-K50	1,366
K-MK30	0,776
K-MK50	0,791
K	0,883
M	1,701

Źródło: opracowanie własne.

pierwszym. Wartości te nie różnią się jednak znacząco od współczynnika dyfuzji wody jabłek suszonych konwekcyjnie. Wytlumaczeniem tego może być to, że pierwszy stopień suszenia realizowany konwekcyjnie doprowadził do większego skurczu materiału i częściowego „zapieczenia” powierzchni próbki, przez co transport wody i pary wodnej wewnątrz materiału i z materiału do otoczenia był utrudniony. Aplikacja mikrofal na początku suszenia zwiększyła współczynnik dyfuzji wody od 55 do 69% w porównaniu z suszami uzyskanymi na drodze suszenia konwekcyjnego.

4. Wnioski

1. Przebieg suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego, konwekcyjnego oraz dwustopniowego miąższu jabłka (przy zastosowaniu badanych parametrów) najlepiej opisywał model Midillego i in. [2002].

2. Zastosowanie hybrydowej, dwustopniowej technologii suszenia miąższu jabłka (w badanym zakresie parametrów) umożliwia skrócenie całkowitego czasu procesu o maksymalnie 48%, w porównaniu z metodą konwencjonalną.

3. Zastosowanie metody konwekcyjno-mikrofalowej, jako pierwszego stopnia suszenia, przyspiesza proces suszenia miąższu jabłka w większym stopniu niż odpowiednie zastosowanie suszenia konwekcyjnego, a współczynniki dyfuzji wody w miąższu jabłka osiągają prawie dwukrotnie większe wartości.

Literatura

- Arslan D., Özcan M.M., Okyay Mengeş H., *Evaluation of drying methods with respect to drying parameters, some nutritional and colour characteristics of peppermint (Mentha × piperita L.)*, „Energy Conversion and Management” 2010, vol. 51, s. 2769–2775.
- Corzo O., Bracho N., Alvarez C., *Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages*, „Journal of Food Processing and Preservation” 2010, vol. 34, s. 993–1008.
- Demir V., Gunhan T., Yagcioglu A.K., Degirmencioglu A., *Mathematical modeling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves*, „Biosystems Engineering” 2004, vol. 88, s. 325–335.
- Fernandes F.A.N., Oliveira F.I.P., Rodrigues S., *Use of ultrasound for dehydration of papayas*, „Food Bioprocess Technology” 2008, vol. 4, s. 339–345.
- Gachovska T.K., Simpson M.V., Ngadi M.O., Raghavan G.S.V., *Pulsed electric field treatment of carrots before drying and rehydration*, „Journal of the Science of Food and Agriculture” 2009, vol. 89, s. 2372–2376.
- International Energy Agency, *Key World Energy Statistics*, Paris 2010.
- Jakubczyk E., *Charakterystyka suszenia konwekcyjno-mikrofalowego spienionego przecieru jabłkowego*, „Żywność. Nauka. Technologia. Jakość” 2009, vol. 62, s. 109–118.
- Jakubczyk E., *Właściwości elektryczne*, [w:] Z. Pałacha, I. Sitkiewicz (red.), *Właściwości fizyczne żywności*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.
- Kobus Z., *Zastosowanie obróbki ultradźwiękowej w procesie tłoczenia soku winogronowego*, „Acta Agrophysica” 2005, vol. 6, s. 125–131.
- Kowalski S.J., Rajewska K., *Effectiveness of hybrid drying*, „Chemical Engineering and Processing” 2009, vol. 48, s. 1302–1309.

- Lewicki P.P., *Design of hot air drying for better foods*, „Trends in Food Science and Technology” 2006, vol. 17, s. 153–163.
- Midilli A., Kucuk H., Yapar Z., *A new model for single layer drying*, „Drying Technology” 2002, vol. 20, s. 1503–1513.
- Pijanowski E., Dłużewski M., Dłużewska A., Jarczyk A., *Ogólna technologia żywności*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- Rahman M.S., Perera C.O., Thebaud C., *Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas*, „Food Research International” 1997, vol. 30, s. 485–491.
- Ramaswamy H.S., Nsonzi F., *Convective air drying kinetics of osmotically pre-treated blueberries*, „Drying Technology” 1998, vol. 16, s. 743–759.
- Sarimeseli A., *Microwave drying characteristics of coriander (Coriandrum sativum L.) leaves*, „Energy Conversion and Management” 2011, vol. 52, s. 1449–1453.
- Shynkaryk M.V., Lebovka N.I., Vorobiev E., *Pulsed electric field and temperature effects on drying and rehydration of red beetroots*, „Drying Technology” 2008, vol. 26, s. 696–704.
- Soysal Y., Öztekin S., Eren Ö., *Microwave drying of parsley: Modeling, kinetics, and energy aspects*, „Biosystems Engineering” 2006, vol. 93, s. 403–413.
- Therdthai N., Zhou W., *Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (Mentha cordifolia Opiz ex Fresen)*, „Journal of Food Engineering” 2009, vol. 91, s. 482–489.
- Wang C.Y., Singh R.P., *Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying*, „Transactions of the American Society of Agricultural Engineers” 1978, vol. 11, s. 668–672.
- Witrowa-Rajchert D., *Nietermiczne techniki utrwalania stosowane do produkcji żywności projektowanej*, [w:] M. Walczycka, A. Duda-Chodak, G. Jaworska, T. Tarko (red.), *Żywność projektowana*, Oddział Małopolski PTTŻ, Kraków 2011.
- Yucel U., Alpas H., Bayindirli A., *Evaluation of high pressure pretreatment for enhancing the drying rates of carrot, apple, and green bean*, „Journal of Food Engineering” 2010, vol. 98, s. 266–272.
- Zawiślak R., Lisowa H., *Wpływ stopnia rozdrobnienia jabłka na wartość efektywnego współczynnika dyfuzji wody podczas suszenia w warunkach konwekcji wymuszonej*, „Technica Agraria” 2002, nr 1, s. 33–41.
- Zhang M., Tang J., Mujumdar A.S., Wang S., *Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables*, „Trends in Food Science and Technology” 2006, vol. 17, s. 524–534.

KINETICS OF MICROWAVE-ASSISTED DRYING OF APPLE – SELECTION OF SUITABLE MATHEMATICAL MODEL

Summary: The aim of this work was mathematical modeling of kinetics of convectonal, microwave-convectonal and two-steps (hybrid) drying of apple tissue. Hybrid drying was performed by convectonal method and microwave-convectonal method in the first and second step, respectively, or by microwave-convectonal method and convectonal method in the first and second step, respectively. Convectonal drying was carried out at air temperature of 70 °C and air velocity of 2.5 m/s. In turn, microwave-convectonal drying was performed at air temperature of 40 °C, air velocity 3.5 m/s and microwave power of 300 W. It was stated that the utilization of hybrid drying techniques reduced the drying time even by 48% in comparison to convectonal method. Out of 9 models, the model by Midilli et al. [2002] was the best to describe the course of the convectonal, microwave-convectonal and two-steps process.

Keywords: two-steps drying, drying kinetics, mathematical modeling.