

APROKSYMACJA KRZYWYCH KINETYCZNYCH SUSZENIA MIKROFALOWO-KONWEKCYJNEGO LIŚCI OREGANO WYBRANYMI RÓWNANIAM I

Artur Wiktor, Karina Łuczywek, Dorota Witrowa-Rajchert,
Maria Hankus, Krzysztof Królikowski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Celem pracy był wybór odpowiedniego modelu matematycznego najlepiej opisującego kinetykę suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści oregano oraz wyznaczenie efektywnego współczynnika dyfuzji wody tego procesu. Proces realizowano przy zastosowaniu mocy mikrofal 150–300 W oraz temperatury powietrza 20–40°C. W celu matematycznego opisu otrzymanych wyników zastosowano 9 często spotykanych w literaturze modeli. Efektywny współczynnik dyfuzji wody wyznaczono, korzystając z II prawa Ficka. Stwierdzono, że wzrost zarówno mocy mikrofal, jak i temperatury powietrza skracał czas trwania procesu. Podobną zależność, w większości eksperymentów, zaobserwowano w przypadku efektywnego współczynnika dyfuzji wody. Spośród zastosowanych modeli przebieg krzywych suszenia oregano najlepiej opisywał model Midilliego i innych.

Słowa kluczowe: oregano, suszenie mikrofalowo-konwekcyjne, modelowanie matematyczne

Wykaz używanych oznaczeń

◆ o_150_20 – oregano suszone mikrofalowo-konwekcyjnie przy mocy mikrofal 150 W i w temperaturze powietrza 20°C; ■ o_150_30 – oregano suszone mikrofalowo-konwekcyjnie przy mocy mikrofal 150 W i w temperaturze powietrza 30°C; ▲ o_150_40 – oregano suszone mikrofalowo-konwekcyjnie przy mocy mikrofal 150 W i w temperaturze powietrza 40°C; × o_200_20 – bazylia suszona mikrofalowo-konwekcyjnie przy

mocy mikrofal 200 W i w temperaturze powietrza 20°C; ✕ o_200_30 – oregano suszone mikrofalowo-konwekcyjnie przy mocy mikrofal 200 W i w temperaturze powietrza 30°C; ● o_200_40 – oregano suszone mikrofalowo-konwekcyjnie przy mocy mikrofal 200 W i w temperaturze powietrza 40°C; + o_300_20 – oregano suszone mikrofalowo-konwekcyjnie przy mocy mikrofal 300 W i w temperaturze powietrza 20°C; ▣ o_300_30 – oregano suszone mikrofalowo-konwekcyjnie przy mocy mikrofal 300 W i w temperaturze powietrza 30°C; ▤ o_300_40 – oregano suszone mikrofalowo-konwekcyjnie przy mocy mikrofal 300 W i w temperaturze powietrza 40°C

WSTĘP

Suszenie to jeden z najpopularniejszych i najbardziej energochłonnych procesów występujących w technologii żywności. Jednym z rozwiązań pozwalających na redukcję energochłonności, pozostającym w zgodzie z zasadami zrównoważonego rozwoju, jest zastosowanie niekonwencjonalnych metod suszenia, na przykład suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego. Ważnym aspektem jest także optymalizacja procesu suszenia, która może być realizowana m.in. dzięki odpowiedniej aproksymacji danych doświadczalnych z wykorzystaniem odpowiednich modeli matematycznych. Odpowiednio dobrane równanie matematyczne jest bardzo cennym instrumentem wspomagającym określenie właściwego czasu suszenia czy końcowej zawartości wody w materiale [Corzo i in. 2010].

Celem badań była aproksymacja krzywych kinetycznych procesu suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści oregano oraz wyznaczenie efektywnych współczynników dyfuzji wody.

MATERIAŁ I METODY

W eksperymencie wykorzystano świeże, zdrowe, całe, o jednakowym stopniu dojrzałości wegetacyjne liście lebidki pospolitej (oregano) *Origanum vulgare*, wyhodowane przez plantację Swedaponic Polska, mieszczącą się w Kraśniczej Woli koło Grodziska Mazowieckiego.

Proces suszenia przeprowadzono w prototypowej suszarce mikrofalowo-konwekcyjnej przy użyciu różnych wartości mocy mikrofal: 150, 200, 300 W (moc generatora). Temperatura powietrza suszącego wynosiła 20, 30 lub 40°C, a prędkość prostopadłego do materiału przepływu powietrza – 0,5 m·s⁻¹. Surowiec układano w kilku warstwach na obrotowym sicie sprzężonym z wagą elektroniczną (AXIS), umożliwiającą pomiar masy. Obciążenie sita wynosiło 0,483 kg·m⁻². Co 3 minuty, przy użyciu oprogramowania PROMIS, rejestrowano masę i temperaturę materiału podczas suszenia. Podczas dokonywania pomiarów pole mikrofalowe było wyłączane na maksymalnie 5 sekund. Proces kończono, gdy masa surowca nie zmieniała się.

Zawartość suchej substancji oznaczono zgodnie z normą PN-91/R-87019, poprzez wysuszenie określonej naważki w temperaturze 80°C do uzyskania stałej masy.

W celu przedstawienia kinetyki procesu suszenia obliczono względną zawartość wody:

$$MR = \frac{u_{\tau}}{u_0}$$

gdzie: MR – względna zawartość wody [-],

u_0 – początkowa zawartość wody [g H₂O·(g s.s.)⁻¹],

u_{τ} – zawartość wody po czasie τ [g H₂O·(g s.s.)⁻¹].

W celu aproksymacji krzywych suszenia zastosowano 9 często spotykanych w literaturze modeli przedstawionych w tabeli 1. Modele opisujące krzywe miały postać: funkcji wykładniczej (model nr 1, 2, 3, 9), sumy funkcji wykładniczej z wyrazem stałym (model nr 4), sumy funkcji wykładniczej z funkcją liniową (model nr 5), sumy funkcji wykładniczej z funkcją wykładniczą (model nr 8), ilorazu wyrazu stałego i funkcji wykładniczej z wyrazem stałym (model nr 7) oraz wielomianu drugiego stopnia (model nr 6). Analizę regresji krzywych suszenia oraz wyliczenie szybkości suszenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programów Table Curve 2D v 5.01 oraz arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel 2007.

Tabela 1. Modele matematyczne użyte do opisanie przebiegu kinetyki procesu suszenia oregano
Table 1. Mathematical models used to evaluate the drying kinetics of oregano

Numer modelu Number of model	Nazwa modelu Name of model	Równanie Equation	Źródło Source
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	Midilliego i innych	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau^c) + b \cdot \tau$	Midilli i in. 2002
6	Wanga i Singha	$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$	Wang i Singh 1978
7	Logistyczny	$MR = \frac{b}{1 + a \cdot \exp(k \cdot \tau)}$	Soysal i in. 2006
8	Dwuczynnikowy	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b \cdot \exp(-k_i \cdot \tau)$	Arslan i in. 2010
9	Uprozczone 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 i Nsonzi 1998

Objaśnienia: k, k_i – współczynniki suszarnicze [min⁻¹]; a, b, n – parametry modelu; τ – czas [s]; D_{eff} – efektywny współczynnik dyfuzji wody [m²·s⁻¹]; L – połowa grubości materiału [m].

Współczynnik dyfuzji wody (D_{eff}) wyznaczono metodą regresji na podstawie równania (nr 9, tab. 1.), które opisuje dyfuzję nieustaloną w płycie nieskończonej na podstawie II prawa Ficka. Równanie zakłada, że efektywny współczynnik dyfuzji jest stały podczas procesu suszenia oraz że skurcz suszarniczy jest nieistotny [Ramaswamy i Nsonzi 1998].

W celu wyboru modelu, który najlepiej opisuje uzyskane dane, wyznaczono średnie błędy kwadratowe ($RMSE$), wartości zredukowanego testu χ^2 oraz współczynniki zmienności resztowej (V_e), korzystając z zależności:

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

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

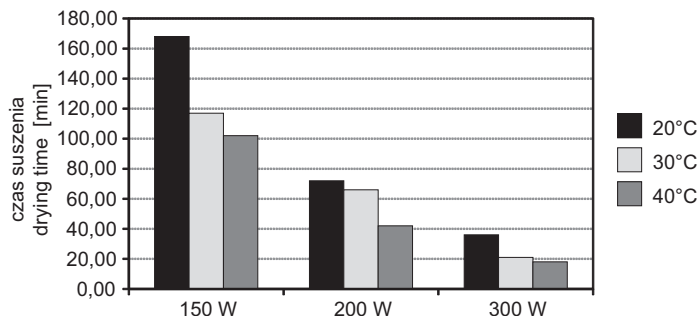
gdzie: $MR_{i,p}$ – wyliczona (przewidywana) wartość względnej zawartości wody,
 $MR_{i,e}$ – eksperymentalna wartość względnej zawartości wody,
 N – liczba obserwacji,
 n – liczba parametrów w równaniu modelu,
 Y – średnia eksperymentalna wartość względnej zawartości wody MR .

Dwuczynnikową analizę wariancji bez powtórzeń wykonano w celu określenia wpływu mocy mikrofal i temperatury powietrza suszącego na: wartość parametrów występujących w modelu wybranym do opisu kinetyki suszenia, wartość efektywnego współczynnika dyfuzji wody oraz czas suszenia. Analizę tę wykonano, korzystając z arkusza kalkulacyjnego MS Excel 2007, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

WYNIKI I DYSKUSJA

Czas suszenia liści oregano, do tej samej wartości względnej zawartości wody, wyniósł od 168 do 18 minut (rys. 1), przy czym najdłuższy czas zanotowano w przypadku zastosowania temperatury 20°C i mocy mikrofal 150 W. Oznacza to, że dwukrotny wzrost zarówno temperatury, jak i mocy mikrofal skrócił czas suszenia o 89% w porównaniu z procesem charakteryzującym się najdłuższym czasem suszenia. Zwiększenie mocy mikrofal z poziomu 150 do 200 W, przy tej samej temperaturze powietrza suszącego (20°C), pozwoliło skrócić czas suszenia o 57%, natomiast podwyższenie temperatury z poziomu 20 do 30°C, przy tej samej mocy mikrofal, skróciło czas suszenia od 8 do 46% w przypadku gdy moc mikrofal wynosiła odpowiednio 200 i 150 W. Dwuczynnikowa analiza wariancji bez powtórzeń wykazała istotny wpływ mocy mikrofal (p -value = 0,002), natomiast nie wykazała statystycznie istotnego wpływu temperatury powietrza suszącego (p -value = 0,079) na czas suszenia.

Wyniki analizy regresji przeprowadzonej dla każdego przypadku badanych parametrów suszenia zostały przedstawione w tabeli 2. Wartości współczynników R^2 mieściły się w zakresie od 0,168 do 0,999. Najmniejszą wartość zanotowano w przypadku



Rys. 1. Czas suszenia oregano w zależności od parametrów procesu

Fig. 1. Drying time of oregano leaves depending on the parameters of the process

modelu nr 4 użytego do opisanego procesu suszenia w temperaturze 40°C i przy mocy mikrofal 300 W. Z kolei wartości $RMSE$ oraz χ^2 wahały się w granicach odpowiednio od 0,0086 do 0,3147 oraz od 0,0001 do 0,1733. Największe wartości zanotowano także w przypadku procesu suszenia oznaczonego jako o_300_40. Współczynnik zmienności resztowej przyjmował wartości w granicach 2,14–108,43%. Także w tym przypadku największą wartość zaobserwowano dla kinetyki suszenia oregano w temperaturze 40°C i przy mocy mikrofal 300 W. Po kompleksowej analizie wartości współczynników R^2 , $RMSE$, χ^2 oraz V_e uznano, że model nr 5 [Midilli i in. 2002] najlepiej nadawał się do opisu danych doświadczalnych. We wszystkich przypadkach model ten charakteryzował się dużymi wartościami R^2 (0,991–0,999) oraz małymi wartościami $RMSE$ (0,0086–0,0030), χ^2 (0,0001–0,0009) oraz V_e (2,14–8,53). W przypadku modelu nr 6, który również charakteryzował się podobnymi wartościami tych współczynników, w niektórych analizowanych przypadkach (o_150_20, o_150_40, o_200_30 i o_300_30) obserwowano ujemną przewidywaną zawartość wody lub ekstremum, co wykluczało jego praktyczne zastosowanie.

Tabela 2. Wyniki analizy statystycznej matematycznego modelowania kinetyki suszenia liści oregano

Table 2. Statistic analysis of mathematical modeling of oregano's drying kinetics

Numer modelu Number of model	Metoda Method	R^2	$RMSE$	χ^2	V_e
1	o_150_20	0,994	0,060268	0,003697	14,13
	o_150_30	0,967	0,052057	0,002779	12,90
	o_150_40	0,963	0,059817	0,003683	18,20
	o_200_20	0,983	0,039008	0,001585	10,63
	o_200_30	0,969	0,056928	0,003549	19,80
	o_200_40	0,954	0,070515	0,005328	19,53
	o_300_20	0,961	0,063457	0,004362	18,00
	o_300_30	0,978	0,049782	0,002832	14,09
	o_300_40	0,975	0,054407	0,003454	15,31

Tabela 2, cd.
Table 2, cont.

Numer modelu Number of model	Metoda Method	R ²	RMSE	χ^2	V _e
2	o_150_20	0,994	0,041266	0,001765	9,76
	o_150_30	0,985	0,035649	0,001338	8,95
	o_150_40	0,995	0,02311	0,000566	7,14
	o_200_20	0,993	0,024483	0,000652	6,81
	o_200_30	0,999	0,009667	0,000107	3,45
	o_200_40	0,994	0,025892	0,000774	7,44
	o_300_20	0,983	0,041357	0,002021	15,12
	o_300_30	0,995	0,024572	0,000805	7,51
3	o_300_40	0,997	0,019896	0,000554	6,13
	o_150_20	0,994	0,056463	0,003304	13,36
	o_150_30	0,972	0,048572	0,002483	12,19
	o_150_40	0,973	0,051162	0,002776	15,80
	o_200_20	0,987	0,034092	0,001263	9,49
	o_200_30	0,981	0,044925	0,002321	10,24
	o_200_40	0,964	0,06267	0,004532	18,01
	o_300_20	0,963	0,061128	0,004416	18,11
4	o_300_30	0,98	0,047325	0,002986	14,47
	o_300_40	0,978	0,050916	0,003629	15,69
	o_150_20	0,995	0,056576	0,003379	13,51
	o_150_30	0,971	0,04883	0,002578	12,42
	o_150_40	0,973	0,051369	0,002886	16,11
	o_200_20	0,987	0,034202	0,001329	9,73
	o_200_30	0,961	0,063316	0,004853	23,15
	o_200_40	0,896	0,106155	0,014086	31,75
5	o_300_20	0,809	0,139691	0,025368	43,40
	o_300_30	0,98	0,047578	0,003622	15,93
	o_300_40	0,168	0,314708	0,173322	108,43
	o_150_20	0,997	0,015669	0,00025	3,67
	o_150_30	0,999	0,008643	0,0001	2,14
	o_150_40	0,996	0,019257	0,000382	5,86
	o_200_20	0,998	0,012452	0,000162	3,39
	o_200_30	0,999	0,009615	0,000101	3,34
5	o_200_40	0,997	0,018311	0,000359	5,07
	o_300_20	0,991	0,030073	0,00098	8,53
	o_300_30	0,997	0,017609	0,000354	4,98
	o_300_40	0,998	0,015215	0,00027	4,28

Tabela 2, cd.
Table 2, cont.

Numer modelu Number of model	Metoda Method	R^2	$RMSE$	χ^2	V_e
6	o_150_20	–	–	–	–
	o_150_30	0,996	0,017048	0,000314	4,34
	o_150_40	–	–	–	–
	o_200_20	0,995	0,021234	0,000512	6,04
	o_200_30	–	–	–	–
	o_200_40	0,995	0,02236	0,000625	6,69
	o_300_20	0,993	0,026031	0,000881	8,09
	o_300_30	–	–	–	–
	o_300_40	0,997	0,017831	0,000556	6,14
7	o_150_20	0,994	0,056463	0,003365	13,48
	o_150_30	0,972	0,048572	0,00255	12,35
	o_150_40	0,973	0,051162	0,002863	16,05
	o_200_20	0,987	0,034092	0,001321	9,70
	o_200_30	0,981	0,044925	0,002443	16,43
	o_200_40	0,964	0,06267	0,004909	18,75
	o_300_20	0,963	0,061128	0,004858	18,99
	o_300_30	0,98	0,047325	0,003584	15,85
	o_300_40	0,978	0,206655	0,074736	71,20
8	o_150_20	0,995	0,056465	0,003429	13,61
	o_150_30	0,972	0,048572	0,002621	12,52
	o_150_40	0,973	0,051162	0,002955	16,30
	o_200_20	0,987	0,034092	0,001384	9,93
	o_200_30	0,981	0,044926	0,002579	16,88
	o_200_40	0,964	0,06267	0,005356	19,58
	o_300_20	0,963	0,061128	0,005397	20,02
	o_300_30	0,98	0,047326	0,00448	17,72
	o_300_40	0,978	0,050916	0,006049	20,26
9	o_150_20	0,994	0,056463	0,003304	13,36
	o_150_30	0,972	0,048572	0,002483	12,19
	o_150_40	0,973	0,051162	0,002776	15,80
	o_200_20	0,987	0,034092	0,001263	9,49
	o_200_30	0,981	0,044925	0,002321	16,01
	o_200_40	0,964	0,06267	0,004532	18,01
	o_300_20	0,963	0,061128	0,004416	18,11
	o_300_30	0,98	0,047325	0,002986	14,47
	o_300_40	0,978	0,050916	0,003629	15,69

Otrzymane wyniki pozostają w zgodzie z wieloma publikacjami naukowymi, w których model Midilliego i innych [2002] uznano za optymalny w celu aproksymacji krzywych kinetycznych [Amiri Chayjan i in. 2011, Wiktor i in. 2013]. Warto jednak zauważyć, że we wcześniejszych pracach autorów w przypadku aproksymowania krzywych kinetycznych suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści bazylii za równanie optymalne wybrano model Pelega (nr 2) [Wiktor i in. 2012].

Wartości parametrów występujących w modelu nr 5, otrzymane na podstawie analizy regresji, przedstawia tabela 3. Na podstawie dwuczynnikowej analizy wariancji bez powtórzeń nie stwierdzono istotnego wpływu mocy mikrofal czy temperatury na wartości tych parametrów. Jednakże w przypadku współczynnika a , k oraz c mniejsze p -value otrzymano w odniesieniu do mocy mikrofal (odpowiednio: 0,518, 0,065, 0,233) niż do temperatury (odpowiednio: 0,547, 0,741, 0,356).

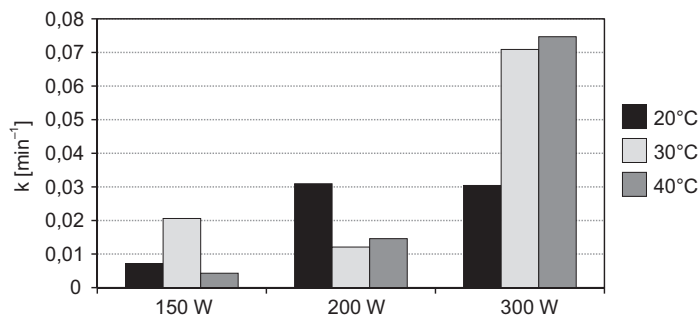
Tabela 3. Wartości parametrów występujących w modelu nr 5 opisującym przebieg suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego oregano

Table 3. 5th model parameters values describing the course of microwave convective drying of oregano

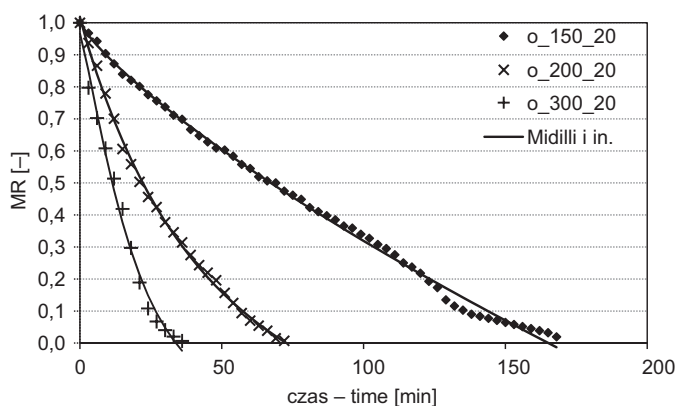
Temperatura – Temperature	150 W	200 W	300 W
20°C	$a = 0,9561$	$a = 1,0171$	$a = 0,9677$
	$k = 0,0072$	$k = 0,0309$	$k = 0,0304$
	$c = 1,1930$	$c = 1,4803$	$c = 1,2186$
	$b = 0,0004$	$b = -0,0019$	$b = -0,0031$
30°C	$a = 1,0067$	$a = 0,9994$	$a = 0,9934$
	$k = 0,0206$	$k = 0,0121$	$k = 0,0709$
	$c = 0,8329$	$c = 1,4460$	$c = 1,1829$
	$b = -0,0001$	$b = 0,0004$	$b = 0,0035$
40°C	$a = 0,9595$	$a = 0,9777$	$a = 1,0020$
	$k = 0,0043$	$k = 0,0146$	$k = 0,0747$
	$c = 1,4803$	$c = 1,4333$	$c = 1,2647$
	$b = -0,0001$	$b = -0,0014$	$b = -0,0028$

Wskazuje to, że współczynniki te w większym stopniu zależą od mocy mikrofal niż od temperatury. Warto także dodać, że parametr k , występujący w modelu Midilliego i innych [2002], rozumiany jest jako współczynnik suszarniczy i podobnie jak współczynnik k w pozostałych modelach uzależniony jest fizycznie od szybkości suszenia. W przypadku wcześniejszych badań prowadzonych przez autorów także stwierdzono, że parametr ten (wyznaczony na podstawie modelu nr 2) w większym stopniu zależy od mocy mikrofal aniżeli od temperatury powietrza suszącego (rys. 2) [Wiktor i in. 2012].

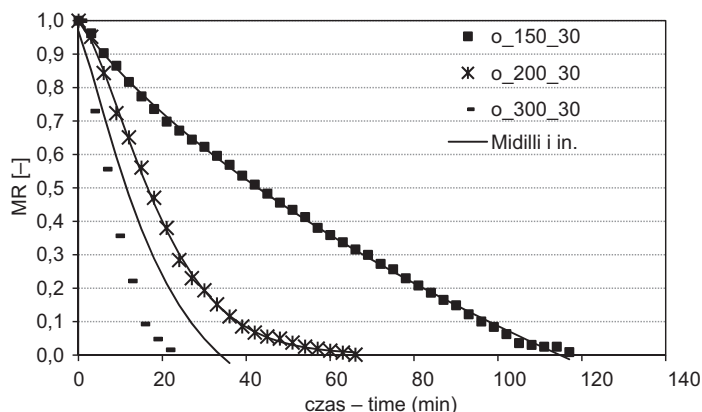
Doświadczalne oraz teoretyczne, aproksymowane równaniem Midilliego i innych [2002], krzywe suszenia zaprezentowano na rysunkach 3, 4 oraz 5. Na ich podstawie można stwierdzić, że zarówno zwiększenie mocy mikrofal, jak i temperatury wpłynęło na kinetykę suszenia liści oregano.



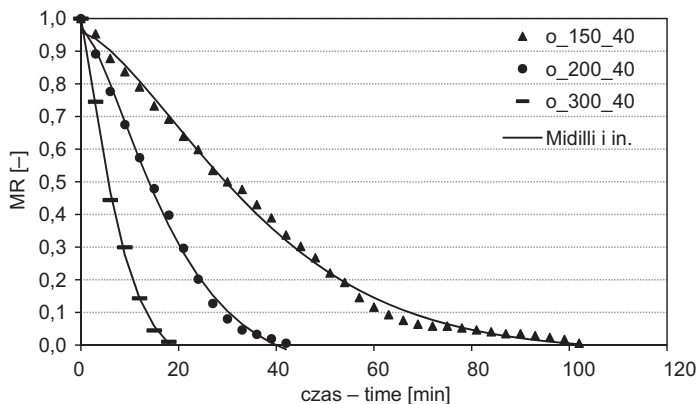
Rys. 2. Wartości współczynnika suszarniczego (k) w zależności od parametrów procesu suszenia
 Fig. 2. Drying rate coefficient depending on drying parameters



Rys. 3. Doświadczalne oraz przewidywane (na podstawie modelu Midilliiego i in.) krzywe suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego oregano (przy stałej temperaturze powietrza doletowego 20°C) liści oregano
 Fig. 3. Experimental and predicted (based on Midilli et al. model) microwave assisted convective drying curves of leaves (constant temperature of inlet air 20°C)



Rys. 4. Doświadczalne oraz przewidywane (na podstawie modelu Midilliiego i in.) krzywe suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego oregano (przy stałej temperaturze powietrza doletowego 30°C) liści oregano
 Fig. 4. Experimental and predicted (based on Midilli et al. model) microwave assisted convective drying curves of oregano leaves (constant temperature of inlet air 30°C)



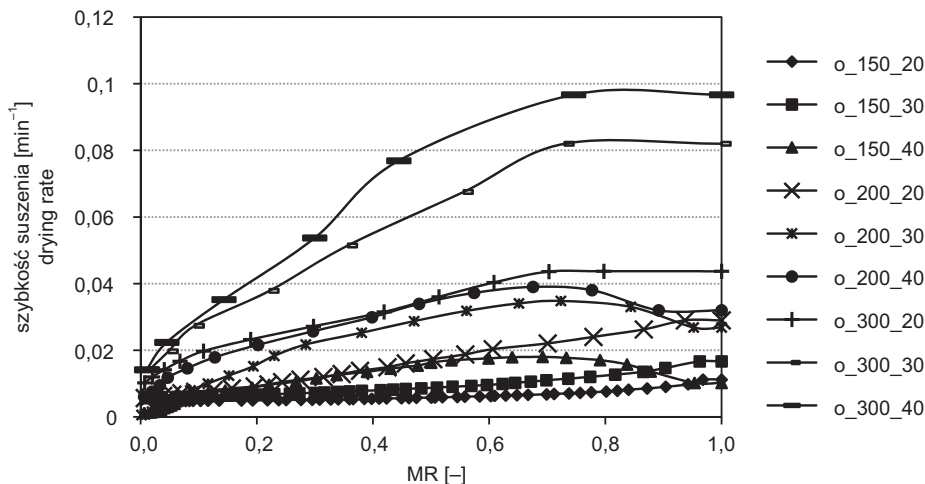
Rys. 5. Doświadczalne oraz przewidywane (na podstawie modelu Midilli i in.) krzywe suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego oregano (przy stałej temperaturze powietrza dołotowego 40°C) liści oregano

Fig. 5. Experimental and predicted (based on Midilli et al. model) microwave assisted convective drying curves of oregano leaves (constant temperature of inlet air 40°C)

Przykładowo materiał suszony w temperaturze 20°C przy mocy mikrofal 200 W potrzebował 57 minut, aby osiągnąć względną zawartość wody 0,1, natomiast czas suszenia do tej samej zawartości wody, przy tej samej mocy mikrofal, ale w temperaturze 40°C, wynosił 27 minut.

Zwiększenie mocy mikrofal przy tej samej temperaturze powietrza suszącego także przyspieszało czas suszenia. Proces prowadzony w 30°C, do osiągnięcia $MR = 0,20$, przy mocy mikrofal 150 W, trwał 81 minut w porównaniu z 12 minutami, gdy moc wynosiła 300 W. Należy zatem stwierdzić, że zarówno zwiększenie mocy mikrofal, jak i podwyższenie temperatury intensyfikuje przebieg suszenia liści oregano. Potwierdzeniem tego faktu są także wartości parametru k występującego w równaniu modelu nr 5, użytego do matematycznego opisu krzywych suszenia.

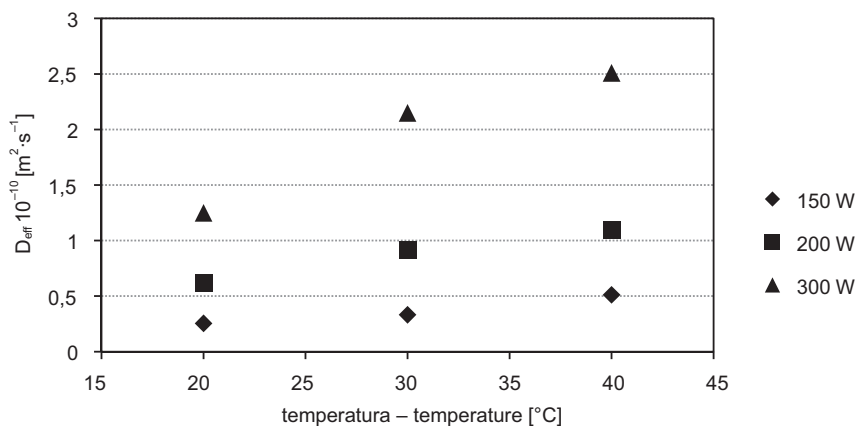
Szybkość suszenia w funkcji zawartości wody w zależności od parametrów suszenia przedstawiono na rysunku 6. Największą szybkością suszenia przez cały czas trwania procesu charakteryzowały się liście oregano suszone przy mocy mikrofal 300 W oraz w temperaturze 40°C. Na początku procesu szybkość ta wynosiła $0,0967 \text{ min}^{-1}$ i była większa o 849% w porównaniu z szybkością suszenia materiału oznaczonego jako o_150_40, w którego przypadku zanotowano najmniejszą wartość tego parametru. We wszystkich omawianych przypadkach zaobserwowano I okres suszenia, który charakteryzuje się stałą szybkością suszenia. Warto zauważyć, że w niektórych przypadkach (o_200_30; o_200_40 oraz o_150_40) szybkość suszenia na początku procesu rosła, aby przy zawartości wody 0,6–0,7 zacząć maleć. Tego typu zachowanie można uzasadnić nagrzewaniem materiału o dużej wilgotności oraz jej bardzo szybkim odparowaniu w tej fazie suszenia. Podobną zależność zanotowała Śledź i inni [2013] w przypadku mikrofalowo-konwekcyjnego suszenia różnych ziół.



Rys. 6. Szybkość suszenia liści oregano w funkcji zawartości wody w zależności od parametrów procesu

Fig. 6. Drying rate of oregano leaves, as a function of water content, depending on the parameters of the process

Rysunek 7 przedstawia zależność między wartością efektywnego współczynnika dyfuzji wody a parametrami procesu zastosowanymi w doświadczeniu. Najwyższym współczynnikiem dyfuzji wody (od $1,25$ do $2,51 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) charakteryzowały się próbki suszone przy mocy mikrofal 300 W , bez względu na temperaturę suszącego. Zarówno wzrost temperatury, jak i mocy mikrofal skutkowało przyspieszeniem dyfuzji



Rys. 7. Wartość efektywnego współczynnika dyfuzji wody w zależności od parametrów suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego oregano

Fig. 7. The values of effective water diffusion coefficient depending on the microwave assisted convective drying of oregano

wody z materiału, o czym świadczą wartości D_{eff} . Przykładowo wzrost temperatury z 20 do 30°C, przy mocy mikrofal 150 W, prowadził do wzrostu D_{eff} o 30%. Z kolei dwukrotne zwiększenie mocy mikrofal (ze 150 do 300 W), przy tej samej temperaturze powietrza (40°C), skutkowało blisko czterokrotnym wzrostem efektywnego współczynnika dyfuzji wody. Dodatkowo dwuczynnikowa analiza wariancji bez powtórzeń wykazała, że wartość tego parametru istotnie zależy od mocy mikrofal (p -value = 0,006), a nie zależy od temperatury (p -value = 0,143). Podobne zależności uzyskali Wiktor i inni [2012] oraz Mirzaee i inni [2009].

WNIOSKI

1. Równanie Midilliego i innych [2002] najlepiej nadawało się do opisu przebiegu suszenia liści oregano (w badanym zakresie parametrów).

2. Moc mikrofal istotnie wpływała na wartość efektywnego współczynnika dyfuzji wody. Oznacza to, że zwiększenie mocy mikrofal pozwala obniżyć temperaturę procesu suszenia, nie wpływając przy tym na wartość efektywnego współczynnika dyfuzji wody.

LITERATURA

- Amiri Chayjan R., Amiri Parian J., Esna-Ashari M., 2011. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed and fluidized bed convective dryer. *Span. J. Agric. Res.* 9, 28–40.
- Arslan D., Özcan M.M., Okyay Mengeş H., 2010. Evaluation of drying methods with respect to drying parameters, some nutritional and colour characteristics of peppermint (*Mentha x piperita* L.). *Energy Convers. Manage.* 51, 2769–2775.
- Corzo O., Bracho N., Alvarez C., 2010. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages. *J. Food Process. Preserv.* 34, 993–1008.
- Demir V., Gunhan T., Yagcioglu A.K., Degirmencioglu A., 2004. Mathematical modeling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. *Biosystems Eng.* 88, 325–335.
- Midilli A., Kucuk H., Yapar Z., 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technol.* 20, 1503–1513.
- Mirzaee E., Rafiee S., Keyhani A., Emam-Djomeh Z., 2009. Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots. *Research in Agricultural Engineering* 55, 114–120.
- PN-91/R-87019 Surowce zielarskie. Pobieranie próbek i metody badań.
- Rahman M.S., Perera C.O., Thebaud C., 1997. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Res. Int.* 30, 485–491.
- Ramaswamy H.S., Nsonzi F., 1998. Convective air drying kinetics of osmotically pre-treated blueberries. *Drying Technol.* 16, 743–759.
- Sarimeseli A., 2011. Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Energy Conversion and Management* 52, 1449–1453.
- Soysal Y., Öztekin S., Eren Ö., 2006. Microwave drying of parsley: modeling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Eng.* 93, 403–413.

- Śledź M., Nowacka M., Wiktor A., Witrowa-Rajchert D., 2013. Selected chemical and physico-chemical properties of microwave-convective dried herbs. *Food Bioprod. Process.*, in press (<http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2013.02.010>).
- Wang C.Y., Singh R.P., 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 11, 668–672.
- Wiktor A., Łuczywek K., Witrowa-Rajchert D., 2012. Modelowanie matematyczne kinetyki suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści bazylii. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 570, 127–141.
- Wiktor A., Iwaniuk M., Śledź M., Nowacka M., Chudoba T., Witrowa-Rajchert D., 2013. Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technol.* 31, 112–119.

MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE ASSISTED CONVECTIVE DRYING OF OREGANO LEAVES

Summary. The aim of this work was to select the optimal mathematical model and to determine the effective water diffusion coefficient. The process was performed at 150–300 W of microwaves input power and at 20–40°C of inlet air temperature. 9 common used in the literature mathematical models were selected in order to describe the experimental data. Based on the II Fick's law the effective moisture diffusion coefficient was computed. It was stated, that the increase of both microwave power and air temperature reduces the time of the process. Analogical relationship was observed in case of effective moisture diffusion coefficient. Midilli et al. model was selected as the best to describe the kinetics of drying.

Key words: oregano, microwave assisted convective drying, mathematical modeling