

ANALIZA SPOSOBU I PARAMETRÓW SUSZENIA OWOCÓW ROKITNIKA (*HIPPOPHAE RHAMNOIDES* L.) W ASPEKTCIE KINETYKI PROCESU I WYBRANYCH CECH JAKOŚCIOWYCH SUSZU

Andrzej Krzykowski  , Dariusz Dziki , Renata Polak ,
Stanisław Rudy , Beata Biernacka 






UP w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji

Streszczenie. Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu parametrów sublimacyjnego, konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego suszenia owoców rokitnika na kinetykę procesu i wybrane cechy jakościowe suszu. Proces suszenia sublimacyjnego przeprowadzono przy temperaturze półek grzejnych 25°C, 45°C i 65°C, a suszenie konwekcyjne oraz wspomagane mikrofalami o mocy 100 W, realizowano przy przepływie powietrza 0,5 m·s⁻¹, w tym samym zakresie temperatur powietrza suszącego. Przeprowadzono analizę kinetyki suszenia owoców rokitnika, wskazującą na możliwość ograniczenia czasu procesu względem nielicznych dostępnych danych literaturowych oraz zaproponowano metodę suszenia sublimacyjnego jako najlepszą ze względu na zachowanie barwy i retencję kwasu L-askorbinowego w suszu.

Słowa kluczowe: suszenie, barwa, kwas L-askorbinowy, rokitnik

WSTĘP

Rokitnik (*Hippophae rhamnoides* L.) to krzew z rodziny *Elaeagnaceae*, pochodzący z Azji i wschodniej Europy, obecnie uprawiany w wielu krajach na świecie [Raffo i in. 2004, George i Cenkowski 2005]. Roślina ta jest wymieniana w pismach starożytnych greckich uczonych, była wykorzystywana w diecie dla koni, w celu szybszej regeneracji sił. Nazwa łacińska tej rośliny (*Hippophae*) pochodzi od greckiego *hippos* – koń i *pháo* – błyszczący, co można tłumaczyć jako lśniący koń. Odniesienia do właściwości leczniczych rokitnika można znaleźć również w tybetańskich tekstach, datowanych na VIII wiek [Li 2002, Zeb 2004, Stobdan i in. 2013].

Andrzej Krzykowski  <https://orcid.org/0000-0001-5169-4741>; Dariusz Dziki  <https://orcid.org/0000-0003-4879-4404>; Renata Polak  <https://orcid.org/0000-0001-5880-566X>; Stanisław Rudy  <https://orcid.org/0000-0002-9499-8662>; Beata Biernacka  <https://orcid.org/0000-0001-5532-0683>

 andrzej.krzykowski@up.lublin.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW

Chociaż prawie wszystkie części składowe rokitnika są wykorzystywane w celu pozyskiwania cennych składników odżywczych, między innymi: nasiona, liście, pędy i kora, to jednak owoce są szczególnie wartościowym składnikiem tej rośliny [Górnaś i in. 2016, Mendelová i in. 2016]. Według Schroedera i Yao [1995], owoce rokitnika są jednymi z najbardziej pożywnych i bogatych w witaminy owoców, znajdujących się w królestwie roślin. Te żółte lub pomarańczowe jagody zawierają rozpuszczalne w tłuszczach witaminy (A, K i E), kwasy tłuszczowe, lipidy, aminokwasy, węglowodany, witaminy C, B₁, B₂, kwas foliowy, karotenoidy, flawonoidy, fenole, terpeny i garbniki [Kallio i in. 2002, George i Cenkowski 2005, Bal i in. 2011]. Zawartość kwasu askorbinowego w owocach rokitnika w zależności od odmiany wynosi od 360 do 2500 mg na 100 g świeżych jagód [Beveridge i in. 1999, Raffo i in. 2004].

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem tej rośliny jako pożywienia nutraceutycznego [Guan i in. 2005, Selvamuthukumar i Khanum 2014]. Rokitnik jest przydatny w leczeniu zaburzeń skórnych, choroby wrzodowej żołądka i dwunastnicy oraz chorób sercowo-naczyniowych, ma właściwości przeciwbólowe, przeciwzapalne i antyoksydacyjne [Beveridge i in. 1999]. Produkty wytwarzane z owoców rokitnika to przede wszystkim soki, dżemy, galaretki i cukierki, dodatki do żywności oraz kosmetyki [Schroeder i Yao 1995, Raffo i in. 2004].

Owoce rokitnika charakteryzują się krótkim okresem przydatności do spożycia, dlatego bezpośrednio po zbiorze powinny być odpowiednio przetworzone. Potencjalnym problemem, związanym z odwodnieniem owoców rokitnika jest ich woskowa, nieprzepuszczalna skóra, która utrudnia utratę wilgoci. Opracowanie skutecznego procesu konserwacji owoców rokitnika ma zatem istotne znaczenie w kontekście strategii handlowej [Ratti 2001, Araya-Farias 2014].

Najczęściej stosowaną metodą utrwalania surowców rolniczych jest suszenie. Sposobów suszenia jest wiele, jednak wszystkie mają wady i zalety, można przykładowo uzyskać susz wysokiej jakości, w wyniku energochłonnego procesu liofilizacji, jak również produkt o pogorszonych cechach jakościowych, powstały w trakcie ekonomicznego suszenia konwekcyjnego. Niewiele opublikowanych badań dotyczy analizy suszenia owoców rokitnika, zasadne więc wydaje się doskonalenie sposobów suszenia tego cennego surowca, celem uzyskania funkcjonalnego suszu o wysokiej jakości.

Celem pracy była analiza parametrów sublimacyjnego, konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego suszenia owoców rokitnika, w odniesieniu do kinetyki procesu i wybranych cech jakościowych suszu.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Owoce rokitnika zostały zakupione z prywatnej plantacji, z okolic Lublina. Surowiec bezpośrednio po przetransportowaniu zamrażano w komorze zamrażarki skrzyniowej Liebherr GTL-4905 w temperaturze -25°C , w warunkach konwekcji swobodnej. Jagody rokitnika ze względu na swoją krótką trwałość powinny być zamrażane bezpośrednio po zbiorze [Li 2002], dlatego zamrażanie owoców potraktowano jako obróbkę wstępną przed procesem konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego suszenia, podobnie jak Araya-Farias i inni [2011]. Proces sublimacyjnego suszenia przeprowadzano w liofiliza-

torze Alpha 1-4 firmy Martin Christ o jednostronnym, kontaktowym sposobie dostarczania ciepła, wyposażonym w wagę elektroniczną przystosowaną do pracy w próżni, służącą do ciągłej rejestracji masy podczas suszenia z dokładnością do $\pm 0,1$ g. Liofilizację prowadzono przy temperaturze półek grzejnych 25°C , 45°C i 65°C , ciśnienie w komorze suszenia wynosiło 63 Pa. Proces suszenia konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego przeprowadzono w suszarce konwekcyjno-mikrofalowej firmy Promis-Tech, gdzie suszony materiał wraz z szalką umieszczony był na wadze laboratoryjnej, a rejestrację zmian masy w trakcie suszenia dokonywano z dokładnością do $\pm 0,1$ g. Zarówno suszenie konwekcyjne, jak i wspomagane mikrofalami o mocy 100 W realizowano przy temperaturze powietrza 25°C , 45°C , 65°C i przepływie $0,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, które było mierzone pod sitem suszarki. W przypadku wszystkich sposobów suszenia próbki stanowiły zamrożone owoce o masie 100 g, a badania zostały przeprowadzone do uzyskania końcowej zawartości wody w suszu, wynoszącej około 6%. Zawartość suchej substancji oznaczono zgodnie z Association of Official Analytical Chemists (AOAC), metoda 934.06 [AOAC International, 1990], poprzez suszenie materiału badanego w temperaturze $70 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Średnia zawartość wody w świeżych owocach rokitnika wynosiła 87,7% co odpowiada początkowej zawartości wody $u_0 = 7,123\text{ kg H}_2\text{O}\cdot(\text{kg s.s.})^{-1}$.

Chcąc przedstawić kinetykę procesu suszenia obliczono zredukowaną zawartość wody (MR) z następującego wzoru:

$$MR = \frac{u_{\tau} - u_r}{u_0 - u_r} \quad (1)$$

gdzie: MR – zredukowana zawartość wody [-],
 u_r – równowagowa zawartość wody [$\text{g H}_2\text{O}\cdot(\text{g s.s.})^{-1}$],
 u_0 – początkowa zawartość wody [$\text{g H}_2\text{O}\cdot(\text{g s.s.})^{-1}$],
 u_{τ} – zawartość wody po czasie τ [$\text{g H}_2\text{O}\cdot(\text{g s.s.})^{-1}$].

W celu doboru najlepszego modelu matematycznego, opisującego sublimacyjne suszenie owoców rokitnika, dokonano analizy siedmiu równań powszechnie cytowanych w literaturze (tab. 1).

Wyniki badań dotyczące kinetyki suszenia owoców rokitnika przedstawiono jako średnie z trzech powtórzeń. Podczas analizy regresji wyznaczono współczynnik determinacji (R^2), błąd średniokwadratowy (RMSE) i wartości zredukowanego testu (χ^2). Błąd średniokwadratowy (RMSE) i wartości zredukowanego testu (χ^2) zostały wyznaczone z zależności:

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

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,p} - MR_{i,e})^2}{N - n} \quad (3)$$

gdzie:

$MR_{i,p}$ – przewidywana wartość zredukowanej zawartości wody,

$MR_{i,e}$ – eksperymentalna wartość zredukowanej zawartości wody,
 N – liczba pomiarów,
 n – ilość parametrów w równaniu danego modelu.

Tabela 1. Modele matematyczne wykorzystywane do opisu przebiegu suszenia

Table 1. Equations applied to drying curves

Nazwa modelu Model name	Formuła matematyczna Model equation	Literatura References
Hendersona i Pabisa	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau)$	Henderson i Pabis 1961
Logarytmiczny	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b$	Sarimeseli 2011
Newtona	$MR = \exp(-k \cdot \tau)$	El-Beltagy i in. 2007
Pagea	$MR = \exp(-k \cdot \tau^n)$	Diamante i Munro 1993
Dwuczynnikowy	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b \cdot \exp(-k_i \cdot \tau)$	Henderson 1974
Wanga i Singha	$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$	Wang i Singh 1978
Midilliego i in.	$MR = a \exp(-k \cdot \tau^n) + b \cdot \tau$	Midilli i in. 2002

k, k_i – współczynnik suszarniczy [min^{-1}]; a, b – współczynniki równań; n – wykładnik potęgowy; τ – czas [min];

k, k_i – drying coefficients [min^{-1}]; a, b – coefficients of the equations; n – exponent; τ – time [min].

Współrzędne barwy surowca i suszu (bezpośrednio po procesie suszenia), oznaczano w systemie klasyfikacji liczbowej przestrzeni barwy CIE $L^*a^*b^*$, przy użyciu kolorymetru CR-400 (Minolta). W celu uzyskania jednorodnej próby badanego materiału, zarówno susz jak i surowiec przed pomiarem, po usunięciu nasion, został rozdrobniony. Współrzędna L^* oznacza jasność barwy, a^* zmianę barwy od zieleni do czerwieni, b^* zakres barwy od koloru niebieskiego do żółtego. Analizę barwy surowca i suszu wykonywano w pięciu powtórzeniach. Całkowitą różnicę barwy (ΔE), pomiędzy surowcem i suszem określono według wzoru:

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{0,5} \quad (4)$$

Zawartość kwasu L-askorbinowego oznaczono podczas miareczkowania metodą Tillmansa, która polega na utlenieniu w środowisku kwaśnym kwasu L-askorbinowego do dehydroaskorbinowego za pomocą roztworu 2,6-dichloroindofenolu. Aby określić zawartość witaminy C, próbki rozdrobnionego surowca i suszu o wadze 10 g ($\pm 0,01$ g) przenoszono ilościowo do zlewki (50 ml), zalewano 2% kwasem szczawiowym i przetrzymano w ciemności przez 15 min. Następnie roztwór przesączono przez bibułę filtracyjną, uzupełniono w kolbie miarowej do 100 ml, skąd pobierano 10 ml przesączu i miareczkowano roztworem 2,6-dichlorofenolindofenolu do momentu pojawienia się jasnoróżowego koloru, który utrzymywał się przez 30 sekund. Całkowitą zawartość kwasu L-askorbinowego określono w $\text{mg} \cdot 100\text{g suszu}^{-1}$. Wszystkie oznaczenia przeprowadzono w trzech powtórzeniach, w przypadku suszu bezpośrednio po procesie suszenia.

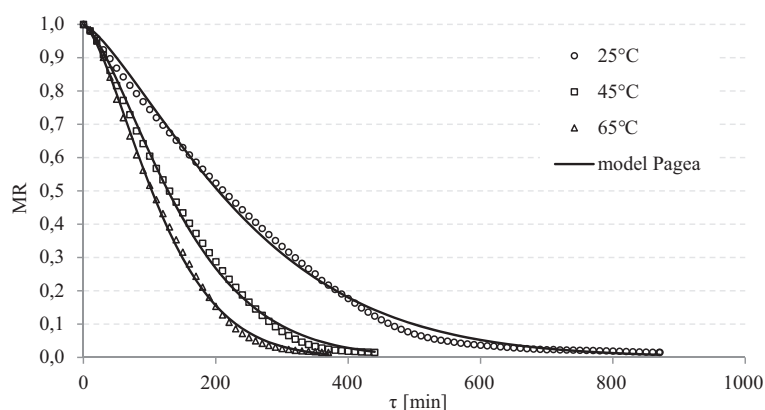
Dane eksperymentalne poddano analizie wariancji (ANOVA) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, przy użyciu programu Statistica 10.0 firmy Statsoft. W celu określenia istotności różnic pomiędzy średnimi wykorzystano test Tukeya.

WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Krzywe suszenia owoców rokitnika, określone jako zmiana zredukowanej zawartości wody MR w funkcji czasu suszenia, zobrazowano na rysunkach 1–3.

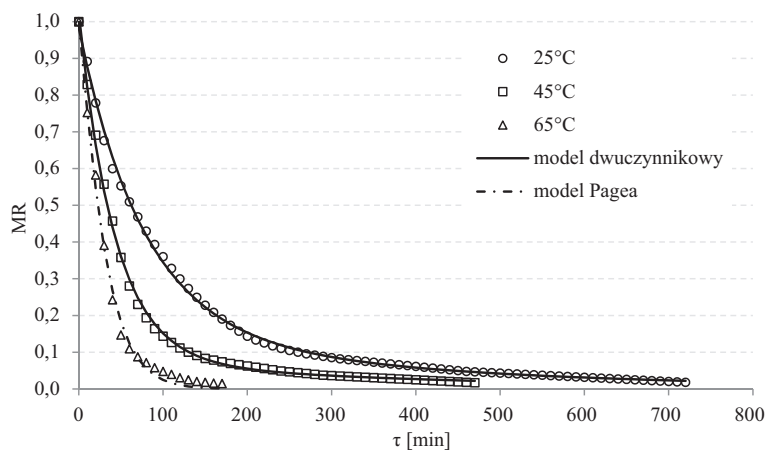
Wzrost temperatury suszenia wpływa na skrócenie czasu procesu, przy każdej z zastosowanych metod odwadniania, natomiast wspomaganie suszenia konwekcyjnego mikrofalami przyspiesza proces suszenia, na każdym poziomie temperatury. Biorąc pod uwagę sposób suszenia najdłużej suszyły się owoce poddane liofilizacji, najkrótszy czas suszenia natomiast odnotowano w przypadku procesu konwekcyjno-mikrofalowego.

Analiza wyników przeprowadzonych badań wykazała, że podczas suszenia konwekcyjnego w temperaturze 45°C proces trwa około 480 min., natomiast Peroń i inni [2011] twierdzą, iż owoce rokitnika nie poddane zabiegom wstępnym, w warunkach konwekcji naturalnej (50°C) suszą się w około dwukrotnie dłuższym czasie. Zastosowanie obróbki wstępnej w postaci zamrażania owoców przed procesem suszenia konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego, pozwala ograniczyć czas suszenia, prawdopodobnie ze względu na zmiany struktury komórkowej miąższu, oraz uszkodzenie woskowej, trudno przepuszczalnej skóry. Araya-Farias i inni [2011] suszyli wstępnie zamrożane, przecięte na połowę owoce rokitnika metodą sublimacyjną w temperaturze 20°C i 50°C oraz w warunkach konwekcji wymuszonej, w temperaturze 50°C i 60°C, wyznaczając krzywe suszenia poprzez okresowe ważenie próbek, zakładając maksymalny czas suszenia dla obu metod wynoszący 15 godzin. Przeprowadzone przez autorów tej pracy badania umożliwiają wyznaczenie krzywych suszenia metodą ciągłego pomiaru zmiany masy i pozwalają na dokładne określenie zakończenia czasu suszenia, co może wpływać na zredukowanie strat jakościowych suszu i ograniczenie energochłonności procesu.



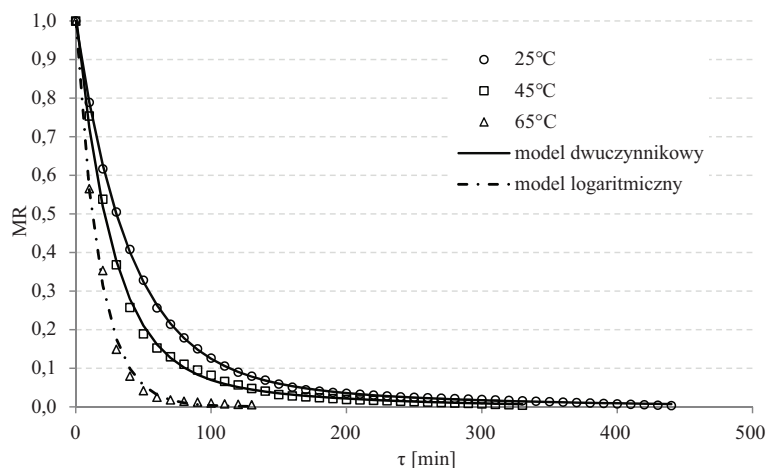
Rys. 1. Kinetyka sublimacyjnego suszenia owoców rokitnika

Fig. 1. Drying curves of freeze drying of seabuckthorn berries



Rys. 2. Kinetyka konwekcyjnego suszenia owoców rokitnika

Fig. 2. Drying curves of convective drying of seabuckthorn berries



Rys. 3. Kinetyka konwekcyjno-mikrofalowego suszenia owoców rokitnika

Fig. 3. Drying curves of microwave-convective drying of seabuckthorn berries

Wyniki analizy regresji, opisującej kinetykę suszenia owoców rokitnika zestawiono w tabelach 2–4. W przypadku suszenia sublimacyjnego dane eksperymentalne najlepiej opisuje model Pagea, kinetykę suszenia konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego w temperaturach 25°C i 45°C, model dwuczynnikowy. W celu opisanie kinetyki procesu suszenia konwekcyjnego w temperaturze 65°C przyjęto model Pagea, natomiast model logarytmiczny najlepiej odwzorowuje proces suszenia konwekcyjno-mikrofalowego w temperaturze 65°C. Współczynniki równań, opisujących kinetykę suszenia w zależności od metody i parametrów procesu podano w tabeli 5.

Tabela 2. Analiza statystyczna dopasowania modelu kinetyki sublimacyjnego suszenia owoców rokitnika

Table 2. Statistical analysis of model describing kinetics of freeze drying of seabuckthorn berries

Nazwa modelu Model name	Temperatura Temperature														
	25°C					45°C					65°C				
	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2
Hendersona i Pabisa	0,982014	0,014652712	0,000241848	0,977843	0,014906492	0,000232539	0,976674	0,015093097	0,000240457						
Logarytmiczny	0,990492	0,008128294	6,83739 10 ⁻⁵	0,994482	0,0037126	1,47679 10 ⁻⁵	0,990871	0,005906879	3,78819 10 ⁻⁵						
Newtona	0,972886	0,023179113	0,000543377	0,981246	0,024997952	0,0006391	0,958559	0,026814497	0,00073845						
Pagea	0,997708	0,002680349	7,34943 10 ⁻⁶	0,997981	0,001358057	1,9301 10 ⁻⁶	0,998966	0,000668962	4,72372 10 ⁻⁷						
Dwuczynnikowy	0,982014	0,015375747	0,000247539	0,977843	0,014906492	0,000243882	0,976674	0,015093097	0,000254602						
Wanga i Singha	0,996865	0,001959679	3,92862 10 ⁻⁶	0,997073	0,001968901	4,05688 10 ⁻⁵	0,993785	0,004021516	1,70711 10 ⁻⁵						
Midilliego	0,843629	0,133677497	0,018710599	0,915815	0,056637771	0,003520797	0,889377	0,071579517	0,005726407						

Tabela 3. Analiza statystyczna dopasowania modelu kinetyki konwekcyjnego suszenia owoców rokitnika

Table 3. Statistical analysis of model describing kinetics of the convective drying of seabuckthorn berries

Nazwa modelu Model name	Temperatura Temperature														
	25°C					45°C					65°C				
	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2
Hendersona i Pabisa	0,983253	0,006475386	4,31118 10 ⁻⁵	0,983066	0,005410576	3,05471 10 ⁻⁵	0,993461	0,002206687	5,47815 10 ⁻⁶						
Logarytmiczny	0,99674	0,00126064	1,65732 10 ⁻⁶	0,997312	0,000858891	7,86873 10 ⁻⁷	0,993677	0,002133749	5,46346 10 ⁻⁶						
Newtona	0,977865	0,977865	7,4267 10 ⁻⁵	0,982887	0,00546782	3,05332 10 ⁻⁵	0,99278	0,002436749	6,28702 10 ⁻⁶						
Pagea	0,994637	0,002073486	4,42045 10 ⁻⁵	0,032431	0,30915128	0,099729928	0,995179	0,001627156	2,97859 10 ⁻⁶						
Dwuczynnikowy	0,998632	0,000528869	2,95917 10 ⁻⁷	0,998454	0,000494106	2,66336 10 ⁻⁷	0,993461	0,002206687	6,26074 10 ⁻⁶						
Wang a i Singha	0,616527	0,148269921	0,022603236	0,466675	0,170380679	0,030291731	0,900293	0,033649027	0,001273789						
Midilliego	0,596078	0,156176588	0,025805105	0,493588	0,161805549	0,02856113	0,650058	0,118098259	0,017932113						

Tabela 4. Analiza statystyczna dopasowania modelu kinetyki konwekcyjno-mikrofalowego suszenia owoców rokitnika
 Table 4. Statistical analysis of model describing kinetics of the microwave-convective drying of seabuckthorn berries

Nazwa modelu Model name	Temperatura Temperature								
	25°C				45°C				65°C
	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2
Hendersona i Pabisa	0,994852	0,001590113	2,64606 10 ⁻⁶	0,99161	0,002396358	6,10144 10 ⁻⁶	0,997247	0,000810836	7,67031 10 ⁻⁷
Logarytmiczny	0,998758	0,000383495	1,57573 10 ⁻⁷	0,996221	0,001079362	1,27777 10 ⁻⁶	0,997252	0,000809406	8,33812 10 ⁻⁷
Newtona	0,994208	0,001789048	3,27344 10 ⁻⁶	0,991573	0,002406743	5,96794 10 ⁻⁶	0,997211	0,000821264	7,26358 10 ⁻⁶
Pagea	0,147668	0,26328082	0,072540827	0,29085	0,202541729	0,042266278	0,567411	0,127396608	0,018934878
Dwuczynnikowy	0,999829	5,29471 10 ⁻⁵	3,0769 10 ⁻⁹	0,998041	0,00055953	3,54816 10 ⁻⁷	0,997247	0,000810836	9,20437 10 ⁻⁷
Wanga i Singha	0,452087	0,169247228	0,029976932	0,436775	0,16086367	0,02749444	0,804136	0,05768139	0,003881667
Midilliego	0,498337	0,154960963	0,026355622	0,474002	0,150231274	0,025578694	0,554643	0,131156637	0,024082889

Tabela 5. Współczynniki równań modeli opisujących suszenie owoców rokitnika

Table 5. Coefficient values in the models describing the drying of seabuckthorn berries

Nazwa modelu Model name Temperatura suszenia [°C] Drying temperature [°C]	Próba Sample	Współczynnik równania Coefficients of the equations				
		a	k	b	k _i	n
Pagea						
25	Suszenie sublimacyjne	–	0,000554	–	–	1,341401
45	Freeze drying	–	0,000658	–	–	1,434927
65		–	0,000673	–	–	1,495893
Dwuczynnikowy						
25	Suszenie konwekcyjne	0,163526	0,002783	0,819292	0,013102	–
45	Convective drying	0,081649	0,002791	0,940990	0,023518	–
65		–	0,020468	–	–	1,128988
Dwuczynnikowy						
25	Suszenie konwekcyjno-mikrofalowe	0,898002	0,025559	0,099666	0,005936	–
45	Microwave-convective drying	0,116371	0,008549	0,902058	0,038023	–
65		1,005275	0,058176	0,000868	–	–

Średnie wartości współrzędnych barwy świeżych owoców rokitnika wynosiły: $L^* = 51,6 (\pm 0,5)$, $a^* = 21,3 (\pm 0,7)$, $b^* = 38,1 (\pm 0,8)$. Suszenie sublimacyjne wpływało na zmniejszenie współrzędnej barwy L^* suszu względem surowca, zwiększenie parametru a^* , oraz niewielkie zmiany współrzędnej b^* . Pociemnienie barwy suszu wywołane suszeniem sublimacyjnym owoców borówki czernicy leśnej Paślawska i inni [2010] tłumaczą przez związane z usunięciem wody, znaczne zagęszczenie antocyjanów w suchej masie, natomiast to, że nie zaobserwowano wzrostu udziału barwy żółtej (spadek wartości parametru a^*) może świadczyć, że nie doszło do istotnego rozpadu substancji barwnych. Podobne wnioski można wysnuć w przypadku suszenia sublimacyjnego owoców rokitnika.

Suszenie konwekcyjne oraz konwekcyjno-mikrofalowe owoców rokitnika skutkowało zmniejszeniem wartości wszystkich współrzędnych barwy suszu w porównaniu z surowcem, w całym zakresie pomiarowym. Wyniki badań dotyczące barwy suszu z owoców rokitnika zestawiono w tabeli 6.

Na podstawie analizy wyników badań można stwierdzić, że barwniki karotenoidowe zawarte w rokitniku wykazują dużą stabilność termiczną, ponieważ temperatura procesu nie ma istotnego wpływu na zmiany współrzędnych barwy suszu, biorąc pod uwagę sposób suszenia. Istotnie statystycznie różnice odnotowano, z kolei w przypadku suszenia sublimacyjnego w porównaniu z dwoma pozostałymi metodami. Susz uzyskany w wyniku suszenia konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego był wyraźnie ciemniejszy, charakteryzował się również mniej intensywną barwą czerwoną i żółtą, co wskazuje na rozpad barwników karotenoidowych w wyniku ich utlenienia.

Tabela 6. Współrzędne barwy suszu z owoców rokitnika
Table 6. Colour parameters of dried seabuckthorn berries

Próba Sample	Współrzędne barwy Colour parameters			
	L*	a*	b*	ΔE
Suszenie sublimacyjne Freeze drying				
25°C	42,9 ±0,78 ^b	28,4 ±0,92 ^c	39,6 ±1,65 ^b	11,5 ±0,47 ^c
45°C	42,8 ±0,93 ^b	27,9 ±0,43 ^c	39,5 ±2,05 ^b	12,4 ±0,16 ^{cd}
65°C	41,9 ±0,40 ^b	29,9 ±0,54 ^c	37,7 ±1,59 ^b	13,1 ±0,36 ^d
Suszenie konwekcyjne Convective drying				
25°C	32,0 ±0,86 ^a	18,2 ±1,23 ^{ab}	22,1 ±1,50 ^{ac}	25,6 ±1,05 ^a
45°C	31,7 ±0,74 ^a	18,5 ±1,69 ^{ab}	21,1 ±1,68 ^a	26,4 ±1,16 ^{ab}
65°C	32,0 ±0,74 ^c	18,7 ±0,76 ^b	22,6 ±0,58 ^a	25,1 ±0,29 ^a
Suszenie konwekcyjno-mikrofalowe Microwave-convective drying				
25°C	31,4 ±0,55 ^a	17,0 ±0,98 ^a	20,2 ±1,38 ^a	27,4 ±1,25 ^{ab}
45°C	31,3 ±0,9 ^a	18,0 ±1,07 ^{ab}	21,4 ±1,36 ^a	26,5 ±1,46 ^a
65°C	30,9 ±0,55 ^a	17,4 ±0,60 ^{ab}	20,2 ±0,57 ^a	27,6 ±0,57 ^{ab}

Wartości oznaczone różnymi małymi literami w kolumnach tabeli są statystycznie istotne ($\alpha = 0,05$).

The values designated by the different small letters in the table are significantly different ($\alpha = 0.05$).

Tabela 7. Zawartość kwasu L-askorbinowego w suszu z owoców rokitnika ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g suszu}^{-1}$)
Table 7. L-ascorbic acid content of dried seabuckthorn berries ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g dry matter}^{-1}$)

Próba Sample	Temperatura suszenia[°C] Drying temperature [°C]		
	25	45	65
Suszenie sublimacyjne Freeze drying	3584 ±26 ^g	3041 ±37 ^f	2767 ±21 ^e
Suszenie konwekcyjne Convective drying	1267 ±25 ^d	1140 ±13 ^b	884 ±18 ^a
Suszenie konwekcyjno-mikrofalowe Microwave-convective drying	1163 ±15 ^b	1014 ±12 ^c	875 ±18 ^a

Wartości oznaczone w tabeli różnymi małymi literami są statystycznie istotne ($\alpha = 0,05$).

The values designated by the different small letters in the table are significantly different ($\alpha = 0.05$).

Całkowita różnica barwy ΔE pomiędzy surowcem a suszem jest najmniejsza w przypadku suszenia sublimacyjnego, istotne statystycznie różnice odnotowano porównując temperaturę procesu 25°C i 65°C, przy czym susz uzyskany po suszeniu w temperaturze 65°C charakteryzował się większą całkowitą różnicą barwy. Wyższe wartości parametru ΔE zaobserwowano w przypadku suszenia konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego, natomiast były one nieistotne statystycznie w obrębie tych dwóch me-

tod odwadniania i ich parametrów. Podobne tendencje, dotyczące całkowitej różnicy barwy podczas suszenia konwekcyjnego i sublimacyjnego owoców rokitnika opisuje Kyriakopoulou i inni [2013].

Średnia zawartość kwasu L-askorbinowego w świeżych owocach rokitnika wynosiła 536 mg w 100g surowca, co stanowi 4073 mg w przeliczeniu na 100 g suszu (± 24). Zmiany zawartości kwasu L-askorbinowego w suszu z owoców rokitnika, w zależności od sposobu i temperatury procesu suszenia przedstawiono w tabeli 7.

Wzrost temperatury procesu intensyfikuje degradację kwasu L-askorbinowego w suszu z owoców rokitnika niezależnie od zastosowanej metody suszenia. W przypadku suszenia sublimacyjnego straty zawartości kwasu L-askorbinowego w porównaniu z surowcem były najmniejsze i wynosiły od 12% przy temperaturze 25°C do 32% dla temperatury procesu 65°C. Suszenie konwekcyjne i konwekcyjno-mikrofalowe powoduje znacznie większe obniżenie zawartości kwasu L-askorbinowego w suszu, (maksymalnie o 79% w przypadku suszenia konwekcyjno-mikrofalowego w temperaturze 65°C), jednak porównując te dwie metody suszenia, różnice w zawartości kwasu L-askorbinowego w suszu z owoców rokitnika, uzyskanego w przypadku temperatury 65°C są nieistotne statystycznie. Obniżenie zawartości kwasu L-askorbinowego w suszu uzyskanym w wyniku suszenia konwekcyjnego powoduje prawdopodobnie utlenienie tego labilnego związku, natomiast wspomaganie suszenia mikrofalami może działać destrukcyjnie poprzez wewnętrzne ogrzewanie materiału, pomimo że czas procesu ulega skróceniu. Podczas suszenia rozpyłowego soku z owoców rokitnika, w zakresie temperatury od 149°C do 191°C Selvamuthukumarán i Khanum [2014] zaobserwowali ubytki zawartości kwasu L-askorbinowego, na poziomie 19,5–33,3%, należy jednak podkreślić, że proces ten trwa bardzo krótko.

WNIOSKI

1. Porównując wyniki przeprowadzonych badań z nielicznymi doniesieniami dotyczącymi kinetyki suszenia owoców rokitnika można stwierdzić, że poprzez wyznaczenie krzywych suszenia metodą ciągłego pomiaru zmiany masy, pozwalającego na dokładne określenie zakończenia czasu suszenia oraz zastosowanie obróbki wstępnej w postaci zamrażania owoców przed suszeniem konwekcyjnym i konwekcyjno-mikrofalowym, można znacznie skrócić czas procesu, niezależnie od zastosowanej metody, co zapewne wpłynie na zredukowanie strat jakościowych suszu i ograniczenie energochłonności suszenia.
2. Analiza wyników badań dotyczących współrzędnych barwy suszu z rokitnika wskazuje na zastosowanie metody suszenia sublimacyjnego ze względu na najmniejszą całkowitą różnicę barwy pomiędzy surowcem i suszem, natomiast temperatura procesu nie ma istotnego wpływu na zmiany współrzędnych barwy suszu, biorąc pod uwagę sposób suszenia
3. W przypadku suszenia sublimacyjnego straty zawartości kwasu L-askorbinowego w porównaniu z surowcem były najmniejsze. Obniżenie zawartości kwasu L-askorbinowego w suszu uzyskanym w wyniku suszenia konwekcyjnego powoduje praw-

dopodobnie utlenienie tego labilnego związku, natomiast wspomaganie suszenia konwekcyjnego mikrofalami może działać destrukcyjnie poprzez wewnętrzne ogrzewanie materiału, pomimo że czas procesu ulega skróceniu.

LITERATURA

- AOAC International, 1990. Method 934.06 moisture in dried fruits. In Official methods of the association of analytical chemists (15th ed.). Virginia, USA: AOAC.
- Araya-Farias M., Macaigne O., Ratti C., 2014. On the Development of Osmotically Dehydrated Seabuckthorn Fruits: Pretreatments, Osmotic Dehydration, Postdrying Techniques, and Nutritional Quality. *Drying Technol.* 32, 813–819.
- Araya-Farias M., Makhlouf J., Ratti C., 2011. Drying of Seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L) Berry: Impact of Dehydration Methods on Kinetics and Quality. *Drying Technol.* 29, 351–359.
- Bal L. M., Meda V., Naik S.N., Satya S., 2011. Sea buckthorn berries: A potential source of valuable nutrients for nutraceuticals and cosmoceuticals. *Food Res. Int.* 44, 1718–1727.
- Beveridge T., Li T.S.C., Oomah B.D., Smith A., 1999. Sea Buckthorn Products: Manufacture and Composition. *J. Agric. Food Chem.* 47, 3480–3488.
- Diamante L.M., Munro P.A., 1993. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51(4), 271–276.
- El-Beltagy A., Gamea G.R., Amer Essa A.H., 2007. Solar drying characteristics of strawberry. *J. Food Eng.* 78, 456–464.
- George S.D., Cenkowski S., 2005. The influence of harvest time on levels of bioactive compounds in sea buckthorn berries (*Hippophaë rhamnoides* L. ssp. sinensis). The Canadian society for engineering in agricultural, food, and biological systems, 1–26.
- Górnaś P., Śne E., Siger A., Seglina D., 2016. Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) vegetative parts as an unconventional source of lipophilic antioxidants. *Saudi J. Biol. Sci.* 23, 512–516.
- Guan T.T.Y., Cenkowski S., Hydamaka A., 2005. Effect of drying on the nutraceutical quality of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L. Ssp. Sinensis) leaves. *J. Food Sci.* 70, 9, 514–518.
- Henderson S.M., 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans ASAE*, 1167–1168.
- Henderson S.M., Pabis S., 1961. Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. *J. Agric. Eng. Res.* 6, 169–174.
- Kallio H., Yang B., Peippo P., 2002. Effects of different origins and harvesting time on vitamin C, tocopherols, and tocotrienols in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) berries. *J. Agric. Food Chem.* 50, 6136–6142.
- Kyriakopoulou K., Pappa A. Krokida, M., Detsi A., Kefalas P., 2013. Effects of Drying and Extraction Methods on the Quality and Antioxidant Activity of Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) Berries and Leaves. *Drying Technol.* 31, 1063–1076.
- Li T. S.C., 2002. Product Development of Sea Buckthorn. Reprinted from: Trends in new crops and new uses. J. Janick and A. Whipkey (red.). ASHS Press, Alexandria, VA., 393–398.
- Mendelová A., Mendel L., Czako P., Mareček J., 2016. Evaluation of carotenoids, polyphenols content and antioxidant activity in the sea buckthorn fruit juice. *Potravinarstvo* 10(1), 59–64.

- Midilli A., Kucuk H., Yapar Z., 2002. A new model for single-layer drying. *Drying Technol.* 20(7), 1503–1513.
- Paślawska M., Stępień B., Jałoszyński K., 2010. Zmiany parametrów barwy owoców jagodowych wywołane suszeniem, przechowywaniem i rehydracją. *Inżynieria Rolnicza* 2(120), 95–102.
- Peroń S., Surma M., Zdrojewski Z., 2011. Charakterystyka suszarnicza owoców rokitnika pospolitego poddanych wstępnym zabiegom przygotowawczym. *Inżynieria Rolnicza* 9(134), 169–176.
- Raffo A., Paoletti F., Antonelli M., 2004. Changes in sugar, organic acid, flavonol and carotenoid composition during ripening of berries of three seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) cultivars. *Eur. Food Res. Technol.* 219, 360–368.
- Ratti C., 2001. Hot-air and freeze-drying of high-value foods: A review. *J. Food Eng.* 49, 311–319.
- Sarimeseli A., 2011. Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Energy Conversion and Management* 52, 1449–1453
- Schroeder W.R., and Yao Y., 1995. Sea buckthorn: a promising multipurpose crop for Saskatchewan. Indian Head, SK: Prairie Farm Rehabilitation Administration; Agriculture Canada.
- Selvamuthukumar M., Khanum F., 2014. Optimization of spray drying process for developing seabuckthorn fruit juice powder using response surface methodology. *J. Food Sci. Technol.* 51(12), 3731–3739.
- Stobdan T., Korekar G., Srivastava R.B., 2013. Nutritional attributes and health application of sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) – A Review. *Current Nutrition & Food Sci.* 9(2), 1–15.
- Wang C.Y., Singh, R.P., 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of the ASAE* 11, 668–672
- Zeb A., 2004. Important therapeutic uses of sea buckthorn (*Hippophae*): A Review. *J. Biol. Sci.* 4(5), 687–693.

THE INFLUENCE OF METHODS AND PARAMETERS OF DRYING ON THE DRYING KINETICS AND SELECTED PROPERTIES OF SEA BUCKTHORN (*HIPPOPHAE RHAMNOIDES* L.)

Summary: Sea buckthorn is a thorny tree that is native to Europe and Asia. It grows along rocky shorelines and in high altitude mountain areas. The plant grows naturally in sandy soil at an altitude of 1,200–4,500 meters in cold climates. Recently it has been extensively planted across much of different countries, to prevent soil erosion and to serve as source of fruits for food and medicine products. The fruits of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) are among the world's best sources of nutrients, vitamins and antioxidants. This plant is not widely known in Poland. Sea buckthorn fruits can be used for drug production and as a food additive, especially for juices, jams, jellies, candies, and cosmetics production. The fruits of *Hippophae rhamnoides* are characterized by short shelf life and should be processed directly after harvesting. The literature data concerning the drying process of sea buckthorn are very limited. Thus the aim of this work was the analysis of the drying kinetics of sea buckthorn fruits. The properties of dried fruits such as colour coordinates

and L-ascorbic acid content were also determined. The initial moisture content of fruits was 87.7% (wb). The fruits were purchased from a private plantation near Lublin neighborhood. The fruits were froze before drying at -25°C . Three different method of drying were used: freeze-drying, air drying and air-microwave drying. The drying process was performed at three different levels of temperature: 25°C , 45°C and 65°C . The power of microwaves was 100 W and the air velocity 0.5 ms^{-1} . The different mathematical models describing the drying kinetics of sea buckthorn fruits were proposed. All experiments were performed in triplicate. The freezing of fruit before drying significantly reduced the drying time. The best quality dried fruits were obtained after freeze drying. Importantly, the temperature of the process had little influence on colour coordinates. The air-drying and air-microwave drying caused the highest decrease of all colour coordinates. An increase of drying temperature increased the degradation of L-ascorbic acid content. The lowest degradation was found during freeze-drying. The data revealed that freeze-drying is the best method for sea buckthorn drying.

Key words: drying, colour, L-ascorbic acid, seabuckthorn