

Prof. dr hab. inż. Agnieszka KALETA
Dr hab. inż. Krzysztof GÓRNICKI, prof. nadzw. SGGW
Dr inż. Aneta CHOIŃSKA
Mgr inż. Kornelia RUSSEK
Inż. Michał KLIMEK
Katedra Podstaw Inżynierii
Wydział Inżynierii Produkcji, SGGW w Warszawie

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZJI WODY W PROCESIE SUSZENIA LIŚCI KOLENDRY, BAZYLI I NATKI PIETRUSZKI®

The determination of moisture diffusion coefficient in the drying process of coriander, basil and parsley leaves®

Słowa kluczowe: suszenie, zioła, współczynnik dyfuzji wody.

Liście kolendry suszono w warunkach konwekcji naturalnej w temperaturze 25, 35, 45 i 55°C. Ponadto liście kolendry, bazyli i natkę pietruszki suszono w warunkach domowych następującymi sposobami: metodą naturalną (21-26°C), w suszarce elektrycznej i w piecyku kuchennym (ok. 50°C). Stwierdzono, że cały proces suszenia badanych ziół przebiega w drugim okresie suszenia i może być opisany matematycznym modelem dyfuzji nieustalonej w płycie nieskończonej. Iloraz współczynnika dyfuzji wody i kwadratu połowy grubości liści suszonych ziół rośnie ze wzrostem temperatury i dla liści kolendry suszonych w warunkach konwekcji naturalnej zależność ta może być opisana równaniem Arrheniusa.

Key words: drying, herbs, moisture diffusion coefficient.

The coriander leaves were dried in natural convection at 25, 35, 45, and 55°C. Moreover the leaves of coriander, basil, and parsley were dried in home conditions applying the following methods: natural method (21-26°C), in the electric dryer, and in the oven (app. 50°C). It was observed that the drying of the investigated herbs occurred exclusively in the falling rate period and can be described with the mathematical model of infinite plate drying. It was stated that the ratio of moisture diffusion coefficient to the square of leaves of dried herbs half thickness increased with the increasing temperature and as far as coriander leaves dried in natural convection were concerned an Arrhenius – type equation can be used to describe the relationship between the discussed ratio and temperature.

WPROWADZENIE

Zioła są powszechnie stosowane jako środki przyprawowe, farmaceutyczne i kosmetyczne. Wiele badań poświęca się możliwościom wykorzystania ich właściwości przeciwoxidacyjnych i przeciwdrobnoustrojowych w konserwowaniu i przechowywaniu artykułów żywnościowych [6,21,41]. Polska należy do grupy liczących się w świecie producentów surowców zielarskich, w tym przypraw ziołowych, zaś rynek przypraw i ziół jest jednym z dynamicznie rozwijających się branż przemysłu spożywczego w naszym kraju. Warto również wspomnieć, że sztuka leczenia roślinami sięga w Polsce średniowiecza [5, 25].

Świeże surowce zielarskie są nietrwałe ze względu na wysoką zawartość wody, a destrukcyjne działanie wielu zawartych w nich enzymów sprawia, że szczególnie istotne jest przedłużenie trwałości tak cennych surowców. Najbardziej rozpowszechnioną metodą jest suszenie [33]. Suszony produkt daje się łatwo rozdrabniać i mielić i pod taką postacią znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle spożywczym [27].

Przeprowadzając suszenie ziół należy dobrać takie parametry procesu, aby uzyskać suszony produkt spełniający zarówno wysokie wymagania konsumentów, jak i będący wartościowym surowcem dla wielu branż przemysłu spożywczego. Stąd też w literaturze przedmiotu można znaleźć prace dotyczące suszenia ziół innymi metodami niż metody naturalne (w pomieszczeniach zamkniętych lub na otwartej przestrzeni) lub suszenie konwekcyjne, a mianowicie suszenie: mikrofalowo-podciśnieniowe [12, 13], próżniowe [35] mikrofalowe [8, 26], mikrofalowo-konwekcyjne [31, 32], sublimacyjne [38]. Mimo niewątpliwych zalet wymienionych metod suszenia, ich zastosowanie przemysłowe nie jest zbyt popularne, co wynika m.in. z wysokich kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych [39,40]. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem suszenia ziół jest suszenie metodami naturalnymi i konwekcyjne [3, 11, 19, 20, 23]. Zaletą tych metod jest duża wydajność i niskie koszty.

Ważnym aspektem planowania suszenia jest matematyczne modelowanie tego procesu, które umożliwia jego optymalizację [18]. Proces suszenia ziół metodami naturalnymi

Adres do korespondencji – Corresponding author: Krzysztof Górnicki, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Podstaw Inżynierii, ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa, e-mail: krzysztof_gornicki@sggw.pl

i konwekcyjnie opisywano równaniami empirycznymi [2, 23], a w warunkach konwekcji wymuszonej – matematycznym modelem suszenia płaskiej nieskończonej płyty [28]. Modele empiryczne aproksymują jedynie krzywe kinetyczne suszenia, natomiast matematyczne modele pozwalają na wyjaśnienie mechanizmu badanego procesu. Umożliwiają m.in. wyznaczenie współczynnika dyfuzji wody w suszonych ziołach. Współczynnik ten jest miarą wszystkich rodzajów ruchu wody w fazie ciekłej i gazowej występujących w suszonym ciele stałym [1, 10, 14].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań dotyczących wyznaczenia współczynnika dyfuzji wody w liściach kolendry suszonej w warunkach konwekcji naturalnej oraz w liściach bazylii, kolendry i w natce pietruszki suszonych w warunkach domowych trzema sposobami: metodą naturalną, w suszarce elektrycznej, w piecyku kuchennym.

Liście kolendry (*Coriandrum sativum* L.) są jednymi z najczęściej używanych ziół. Stosowane są zarówno do celów kulinarnych jak również medycznych. Kolendra jest bogatym źródłem składników odżywczych takich jak: białko, tłuszcze, minerały, błonnik, węglowodany, witaminy C, B₁, B₂, wapń, fosfor, żelazo, β-karoten, tiamina, ryboflawina, sód, potas i kwas szczawiowy. Ma działanie rozkurczowe i przyspieszające trawienie. Kolendrę stosuje się również w przypadku niedyspozycji żołądkowych z niedokwasnością, we wzdęciach, kolce jelitowej, braku łaknienia. Liście kolendry zawierają również antyoksydanty [8, 23, 26, 34, 36].

Liście bazylii (*Ocimum basilicum* L.) wykazują właściwości przeciwutleniające i przeciwbakteryjne. Zawierają polifenole i karotenoidy (25,8 mg/100 g ś.m.). Bazylija zmniejsza napięcie mięśni gładkich przewodu pokarmowego, pobudza wydzielanie soku żołądkowego, przywraca naturalne ruchy perystaltyczne jelit, zapobiega wzdęciom. Znana już w starożytnej Grecji bazylija swoją nazwę zawdzięcza greckiemu *basileus* – król [7, 25, 33, 36].

Natka pietruszki (*Petroselinum sativum* L.) jest bogatym źródłem witaminy C, jej stężenie osiąga wartość od 122 do 178 mg/100 g części jadalnych. W 100 g liści pietruszki jest poza tym średnio ok. 7 mg karotenu, witaminy z grupy B, 3,16 mg witaminy E, 1000 mg potasu, 41 mg wapnia, 120 mg fosforu. Natka pietruszki poprawia trawienie [27, 29, 33, 36].

MATERIAŁ I METODY

Materiał do badań stanowiły świeże, zdrowe, całe, o jednakowym stopniu dojrzałości wegetacyjnej liście kolendry, bazylii i pietruszki. Rośliny były kupowane na rynku warszawskim.

Liście kolendry suszono w warunkach laboratoryjnych w następujący sposób. Próbkę o masie 10 g suszono bez przepływu czynnika suszącego w komorowej suszarce konwekcyjnej firmy Memmert UFP 400 w temperaturze powietrza suszącego 25, 35, 45 i 55°C (mierzonej z dokładnością ±0,1°C). Odczyty z wagi precyzyjnej z dokładnością do 0,01 g (waga WPX 650 firmy Radwag) były rejestrowane automatycznie (przy pomocy komputera) co 1 minutę. Pomiary trwały do momentu ustabilizowania się masy zioła. Suszenie powtarzano trzykrotnie.

Suszenie liści kolendry, bazylii i natki pietruszki w warunkach domowych przeprowadzano w następujący sposób.

Suszenie naturalne. Próbkę ziół o masie 10 g rozkładało na warstwie gazy. Powietrze opływało suszony materiał zarówno od dołu jak i od góry. Warunki panujące w pomieszczeniu były następujące: powietrze suche, temperatura przez pierwsze 5 dni ok. 26°C, a w kolejnych dniach 21°C. Zioła ważono dwa razy dziennie o godz. 11⁰⁰ i 19⁰⁰. Suszenie trwało do momentu ustabilizowania się masy zioła.

Suszarka elektryczna. Suszenie odbywało się w suszarce elektrycznej Optimum RK-0129 o mocy 250 W przeznaczonej do suszenia grzybów, owoców, ziół i warzyw. Próbkę ziół o masie 10 g układano na plastikowym, przezroczystym sicie, pod przykryciem. Suszenie było wspomagane dodatkowym nawiewem. Suszarka miała specjalny element grzewczy zabezpieczający przed przegrzewaniem produktów. Pomiar masy podczas suszenia odbywał się w 5-cio minutowych odstępach (wtedy suszarka była wyłączana). Suszenie trwało do momentu ustabilizowania się masy zioła.

Suszenie w piecyku kuchennym. Odważone po 10 g próbki ziół zostały rozłożone na papierze do pieczenia i wsunięte na metalową półkę znajdującą się w piekarniku. Suszenie odbywało się w ok. 50°C (najmniejsza temperatura do uzyskania), przy uchylonych drzwiczkach. Pomiary masy odbywały się w 10-cio minutowych odstępach. Suszenie trwało do momentu ustabilizowania się masy zioła.

Wszystkie pomiary przeprowadzane w warunkach domowych powtarzano trzykrotnie, zaś odczytu masy dokonano za pomocą wagi WPX 650 firmy Radwag z dokładnością do 0,01 g.

Dla wszystkich przeprowadzonych metod suszenia początkowa i końcowa zawartość wody w ziołach była wyznaczona poprzez suszenie przez 24 h w temperaturze 105°C.

Współczynnik dyfuzji wody D wyznaczano metodą regresji na podstawie równania (1), które opisuje dyfuzję nieustaloną w płycie nieskończonej na podstawie drugiego prawa Ficka [22]:

$$U(t) = \frac{u(t) - u_r}{u_0 - u_r} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2 Dt}{4s^2}\right] \quad (1)$$

przy czym: $u(t)$, u_r , u_0 – zawartość wody odpowiednio: po czasie t , równowagowa, początkowa [kg H₂O/kg s.s.],

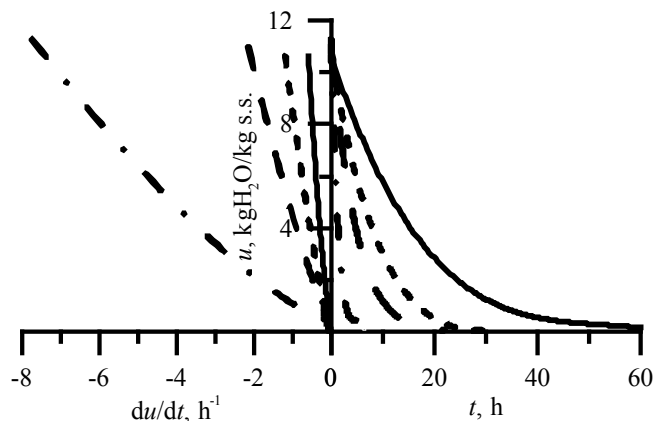
D – współczynnik dyfuzji wody [m²/s],

s – połowa grubości płyty [m].

Równanie (1) zakłada, że ruch wody wewnątrz suszonego ciała jest wyłącznie ruchem dyfuzyjnym, współczynnik dyfuzji wody ma wartość stałą oraz że skurcz suszarniczy jest nieistotny.

Jakość opisu krzywych suszenia uzyskanych z eksperymentu przez równanie (1) określano za pomocą współczynnika korelacji R , średniego błędu kwadratowego RMSE i wartości zredukowanego testu χ^2 [17].

WYNIKI I DYSKUSJA



Rys. 1. Przebieg zmian zawartości wody w funkcji czasu i zmian szybkości suszenia w funkcji zawartości wody dla liści kolendry suszonych w warunkach konwekcji naturalnej w różnych temperaturach: (—) 25°C, (— — —) 35°C, (— — — —) 45°C, (— • —) 55°C.

Fig. 1. Moisture content vs. time and drying rate vs. moisture content for drying of coriander leaves in natural convection at different temperatures: (—) 25°C, (— — —) 35°C, (— — — —) 45°C, (— • —) 55°C.

Źródło: Badania własne

Source: The own study

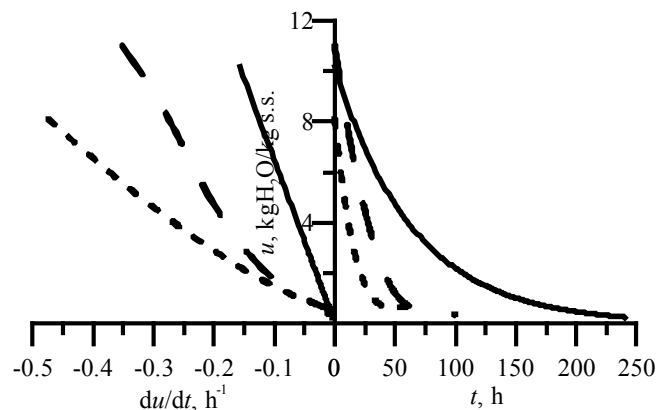
Z przeprowadzonych badań wynika, że temperatura powietrza suszącego wpływa na przebieg procesu suszenia kolendry w warunkach konwekcji naturalnej (rys. 1). Każda z krzywych suszenia $u(t)$ przedstawionych na rysunku 1 jest empiryczną formułą aproksymującą trzy powtórzenia pomiaru zmian zawartości wody w czasie. Każdą z krzywych szybkości suszenia du/dt otrzymano poprzez różniczkowanie odpowiedniej krzywej suszenia.

Analiza uzyskanych wyników badań (rys. 1) pozwala na stwierdzenie, że im wyższa jest temperatura suszącego powietrza, tym czas suszenia jest krótszy i tym większa szybkość suszenia. Analogiczną zależność uzyskano m.in. dla plasterków i sześcianów jabłek [16,18], plasterków marchwi [24], liści mięty [9] i liści kolendry suszonej w temperaturze 45-65°C [4] i w temperaturze 50-80°C [42].

Z rysunku 1 wynika również, że cały proces suszenia liści kolendry przebiega w drugim okresie suszenia, gdyż nie występuje stała szybkość suszenia. Można przyjąć w związku z tym, że głównym mechanizmem przemieszczania się wody podczas procesu suszenia kolendry jest dyfuzja. Analogiczną sytuację zauważyli Ahmed i wsp. [2] i Silva i wsp. [28] dla liści kolendry suszonej w temperaturze 45-80°C oraz Alibas [4] dla liści buraków ćwikłowych.

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie przebiegu suszenia liści bazylii i kolendry oraz natki pietruszki w warunkach domowych metodą naturalną. Najszybciej wysycha pietruszka, najwolniej zaś bazylia. Taki przebieg suszenia jest związany z różną budową liści badanych ziół. Liście bazylii są duże, karbowane, grube i mięsiste, natomiast natka pietruszki są to podwójnie lub potrójnie pierzaste, cienkie liście [30]. Z analizowanego rysunku wynika również, że cały

proces suszenia bazylii i pietruszki tak jak i kolendry przebiega w drugim okresie suszenia. Analogiczne zależności uzyskano podczas suszenia badanych ziół w suszarce elektrycznej i w piecyku kuchennym.

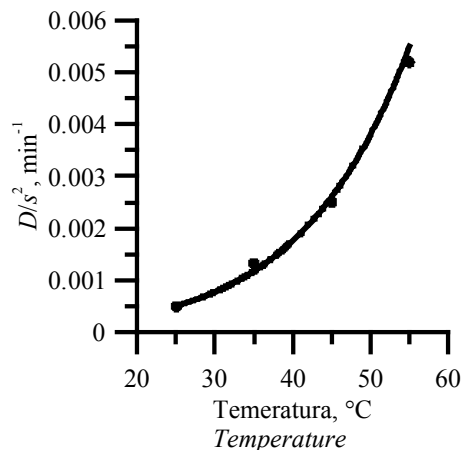


Rys. 2. Przebieg zmian zawartości wody w funkcji czasu i zmian szybkości suszenia w funkcji zawartości wody dla liści: (—) bazylii, (— — —) kolendry (— — — —) pietruszki suszonych metodą naturalną.

Fig. 2. Moisture content vs. time and drying rate vs. moisture content for natural drying of leaves of: (—) basil, (— — —) coriander, (— — — —) parsley.

Źródło: Badania własne

Source: The own study



Rys. 3. Wartość ilorazu współczynnika dyfuzji wody i kwadratu połowy grubości liści kolendry suszonych w warunkach konwekcji naturalnej w zależności od temperatury powietrza suszącego: • wartość wyznaczona metodą regresji na podstawie równania (1), (—) równanie (2).

Fig. 3. The values of ratio of moisture diffusion coefficient to square of coriander leaf half thickness dried in natural convection depending on the drying air temperature: • the values determined from Eq. 1 using regression method, (—) Eq. 2.

Źródło: Badania własne

Source: The own study

Na rysunku 3 przedstawiono zależność między wartością ilorazu współczynnika dyfuzji wody i kwadratu połowy grubości liści kolendry suszonych w warunkach konwekcji

Tabela 1. Wartości D/s^2 i wyniki analizy statystycznej modelowania kinetyki suszenia liści kolendry w warunkach konwekcji naturalnej

Table 1. The values of D/s^2 and results of statistical analyses on the modelling of coriander leaves in natural convection

Temperatura °C Temperature °C	$D/s^2, \text{min}^{-1}$ z (1) from Eq. 1	R	RMSE	χ^2	$D/s^2, \text{min}^{-1}$ z (2) from Eq. 2	R	RMSE	χ^2
25	0,00049	0,9947	0,0770	0,0060	0,00050	0,9942	0,0609	0,0037
35	0,00132	0,9784	0,1052	0,0111	0,00117	0,9876	0,1112	0,0124
45	0,00250	0,9658	0,0610	0,0037	0,00260	0,9611	0,2077	0,0432
55	0,00520	0,9939	0,0301	0,0009	0,00549	0,9945	0,0829	0,0069

Źródło: Badania własne

Source: The own study

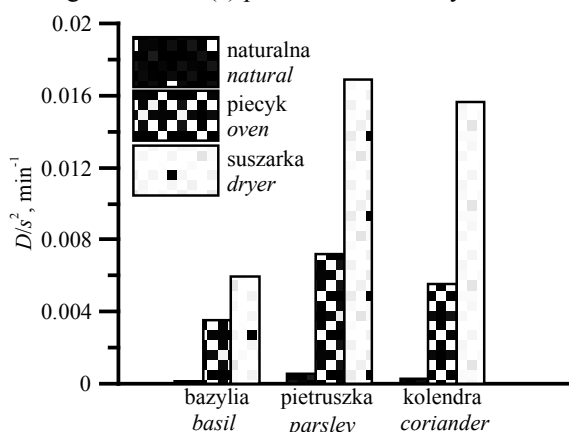
naturalnej a temperaturą powietrza suszącego. Wzrost temperatury powodował przyspieszenie procesu dyfuzji wody z suszonego materiału. Wzrost współczynnika dyfuzji wody wraz z temperaturą suszenia uzyskali m.in. Kaleta i wsp. [18] dla plasterków jabłek, Silva i wsp. [28] dla liści i łożdzy kolendry (50-80°C), Wiktor i wsp. [37] dla liści oregano i Zielińska i Markowski [42] dla sześcianów marchwi. Otrzymane w pracy wartości D/s^2 zmieniające się od $4,9 \times 10^{-4}$ do $5,2 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ (25-55°C) są nieco większe od otrzymanych przez Silva i wsp. [28] dla liści kolendry ($1,612 \times 10^{-4} - 1,110 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ w zakresie temperatur 50-80°C).

Do opisu zależności między parametrem D/s^2 a temperaturą wykorzystano często stosowaną formułę typu równania Arrheniusa [15]:

$$\frac{D}{s^2} = D_0 \exp\left(-\frac{A}{BT}\right) \quad (2)$$

przy czym: D_0, A, B – współczynniki,
 T – temperatura [K].

Wyznaczone metodą regresji współczynniki wynoszą: $D_0 = 115862601,00 \text{ min}^{-1}$, $A=9488,00$, $B=1,22 \text{ K}^{-1}$, a przebieg uzyskanego równania (2) przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 4. Wartość ilorazu współczynnika dyfuzji wody i kwadratu połowy grubości liści bazylii, pietruszki i kolendry w zależności od metod suszenia.

Fig. 4. The values of ratio of moisture diffusion coefficient to square of leaves of basil parsley, and coriander half thickness depending on the drying methods.

Źródło: Badania własne

Source: The own study

Z analizy statystycznej przeprowadzonej w tabeli 1 wynika, że matematyczny model dyfuzji nieustalanej w płycie nieskończonej dobrze opisuje proces suszenia liści kolendry w warunkach konwekcji naturalnej.

Z analizy rysunku 4 wynika, że dla trzech suszonych ziół: bazylii, pietruszki i kolendry wartości D/s^2 są najmniejsze podczas suszenia metodą naturalną, największe zaś dla suszenia w suszarce. Pietruszka wykazuje największe wartości D/s^2 dla odpowiednich metod suszenia, bazylia zaś najmniejsze, co jest związane z różną budową liści omawianych ziół. Wartości omawianego parametru dla kolendry suszonej metodą naturalną (21-26°C) i w piecyku (ok. 50°C) są porównywalne do otrzymanych w odpowiednich temperaturach dla kolendry suszonej w warunkach konwekcji naturalnej (rys. 3).

Tabela 2. Wartości D/s^2 i wyniki analizy statystycznej modelowania kinetyki suszenia liści bazylii, pietruszki i kolendry

Table 2. The values of D/s^2 and results of statistical analyses on the modelling of basil, parsley, and coriander leaves

Metoda suszenia Drying method	Rodzaj ziola Herd kind	$D/s^2, \text{min}^{-1}$ z (1) from Eq. 1	R	RMSE	χ^2
naturalna natural	bazylia basil	0,00015	0,9951	0,0822	0,0069
	pietruszka parsley	0,00055	0,9977	0,0911	0,0087
	kolendra coriander	0,00026	0,9975	0,0879	0,0080
piecyk oven	bazylia basil	0,00354	0,9984	0,1608	0,0261
	pietruszka parsley	0,00717	0,9975	0,1296	0,0171
	kolendra coriander	0,00557	0,9992	0,1518	0,0235
suszarka dryer	bazylia basil	0,00593	0,9996	0,1420	0,0205
	pietruszka parsley	0,01690	0,9916	0,1224	0,0155
	kolendra coriander	0,01572	0,9932	0,1213	0,0152

Źródło: Badania własne

Source: The own study

Z analizy statystycznej przeprowadzonej w tabeli 2 wynika, że matematyczny model dyfuzji nieustalanej w płycie nieskończonej dobrze opisuje proces suszenia liści bazylii, pietruszki i kolendry w warunkach domowych metodą naturalną, w suszarce elektrycznej i w piecyku kuchennym.

Prezentowane w artykule wyniki badań mogą być wykorzystane w praktyce. Znajomość przebiegu zjawisk fizycznych w czasie usuwania wody z materiałów biologicznych jest niezbędna do właściwego projektowania instalacji oraz doboru warunków suszenia odpowiednich dla rodzaju suszonych materiałów.

WNIOSKI

1. Czas suszenia liści kolendry w warunkach konwekcji naturalnej maleje (z 60 h w temperaturze 25°C do 7 h w temperaturze 55°C) a szybkość suszenia rośnie wraz ze wzrostem temperatury powietrza suszącego (początkowa szybkość suszenia w temperaturze 25°C – 0,6 h⁻¹, a w temperaturze 55°C – 7,7 h⁻¹).
2. Z porównania przebiegu suszenia liści bazylii i kolendry oraz natki pietruszki wynika, że najszybciej wysycha pietruszka (80 h), najwolniej zaś bazylii (240 h), co jest związane z budową liści badanych ziół.
3. Cały proces suszenia liści bazylii, kolendry i natki pietruszki przebiega w drugim okresie suszenia i może być opisany matematycznym modelem dyfuzji nieustalanej w płycie nieskończonej.
4. Współczynnik dyfuzji wody w suszonych liściach badanych ziół rośnie ze wzrostem temperatury suszenia. Iloraz współczynnika dyfuzji wody i kwadratu połowy grubości liścia kolendry zmienia się od 0,00049 min⁻¹ w temperaturze 25°C do 0,00520 min⁻¹ w temperaturze 55°C.
5. Zależność między ilorazem współczynnika dyfuzji wody i kwadratu połowy grubości liści kolendry, suszonych w warunkach konwekcji naturalnej a temperaturą powietrza suszącego może być opisana za pomocą równania Arrheniusa.

LITERATURA

- [1] **AGHBASHLO M., H. SAMIMI-AKHIAHANI. 2008.** „Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae)”. *Energy Conversion and Management* 49(10): 2865-2871.
- [2] **AHMED J., U. S. SHIVHARE, G. SINGH. 2001.** „Drying characteristics and product quality of coriander leaves”. *Food and Bioproducts Processing* 79(2): 103-106.
- [3] **AKPINAR E. K. 2006.** „Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants”. *Journal of Food Engineering* 77(4): 864-870.
- [4] **ALIBAS I. 2006.** „Characteristics of chard leaves during microwave, convective, and combined microwave-convective drying”. *Drying Technology* 24(11): 1425-1435.
- [5] **BERTHOLD-PLUTA A., D. KURZYŃSKA. 2010.** „Jakość mikrobiologiczna rynkowych przypraw i ziół”. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego* 2: 42-46.
- [6] **CZERWIŃSKA E., A. SZPARAGA. 2015.** „Antibacterial and antifungal activity of plant extracts”. *Annual Set the Environment Protection* 17: 209-229.
- [7] **DEMIRHAN E., B. ÖZBEK. 2010.** „Microwave-drying characteristics of basil”. *Journal of Food Processing and Preservation* 34(3): 476-494.
- [8] **DIVYA P., B. PUTHUSSERI, B. NEELWARNE. 2012.** „Carotenoid content, its stability during drying and the antioxidant activity of commercial coriander (*Coriandrum sativum* L.) varieties”. *Food Research International*: 45, 342-350.
- [9] **DOYMAZ I. 2005.** „Thin-layer drying behaviour of mint leaves”. *Journal of Food Engineering* 74: 370-375.
- [10] **EVIN D. 2011.** „Microwave drying and moisture diffusivity of white mulberry: experimental and mathematical modeling”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25(10): 2711-2718.
- [11] **FATOUH M., M. N. METWALLY, A. B. HELALI, M. H. SHEDID. 2006.** „Herbs drying using a heat pump dryer”. *Energy Conversion and Management* 47(15): 2629-2643.
- [12] **JAŁOSZYŃSKI K., A. FIGIEL, A. WOJDYŁO. 2008.** „Drying kinetics and antioxidant activity of oregano”. *Acta Agrophysica* 11(1): 81-90.
- [13] **JAŁOSZYŃSKI K., M. SZARYCZ, B. JAROSZ. 2006.** „Wpływ suszenia konwekcyjnego i mikrofalowo-podciśnieniowego na zachowanie związków aromatycznych w pietruszce naciowej”. *Inżynieria Rolnicza* 12(87): 209-215.
- [14] **KALETA A. 1996.** Modelowanie procesu konwekcyjnego suszenia ziarna w silosach. Fundacja „Rozwój SGGW” Warszawa: 24.
- [15] **KALETA A., K. GÓRNICKI. 2002.** „Niektóre zagadnienia dotyczące modelowania procesu konwekcyjnego suszenia warzyw i owoców”. *Postępy Nauk Rolniczych XLIX/LIV, 4/298*: 141-154.
- [16] **KALETA A., GÓRNICKI K. 2010.** „Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer”. *International Journal of Food Science and Technology* 45: 891-898.
- [17] **KALETA A., K. GÓRNICKI. 2010.** „Some remarks on evaluation of drying models of red beet particles”. *Energy Conversion and Management* 51(12): 2967-2978.
- [18] **KALETA A., K. GÓRNICKI, R. WINICZENKO, A. CHOJNACKA. 2013.** „Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer”. *Energy Conversion and Management* 67: 179-185.
- [19] **KAUR P., A. KUMAR, S. ARORA, B. S. GHUMAN. 2006.** „Quality of dried coriander leaves as affected by pretreatments and method of drying”. *European Food Research and Technology* 223: 189-194.

- [20] **KAYA A., O. AYDIN. 2009.** „An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves”. *Energy Conversion and Management* 50(1): 118-124.
- [21] **LANG Q., C. M. WAI. 2001.** „Supercritical fluid extraction in herbal and natural product studies—a practical review”. *Talanta* 53(4): 771-782.
- [22] **PABIS S., D. S. JAYAS, S. CENKOWSKI. 1998.** *Grain drying. Theory and practice.* John Wiley & Sons, Inc. New York: 51-53.
- [23] **PANWAR N. L. 2014.** „Experimental investigation on energy and exergy analysis of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves drying in natural convection solar dryer”. *Applied Solar Energy* 50(3): 133-137.
- [24] **PRAKASH S., S. K. JHA, N. DATTA. 2004.** „Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers”. *Journal of Food Engineering* 62: 305-313.
- [25] **PRZEOR M., E. FLACZYK. 2014.** „Porównanie aktywności przeciwutleniającej przypraw ziołowych stosowanych w kuchni polskiej i suszu liści morwy białej”. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego* 1: 56-60.
- [26] **SARIMESELI A. 2011.** „Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves”. *Energy Conversion and Management* 52: 1449-1453.
- [27] **SHAW M., V. MEDA V., Jr. TABIL, A. OPOKU A. 2007.** „Drying and color characteristics of coriander foliage using convective thin-layer and microwave drying”. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 41(2): 56-65.
- [28] **SILVA A. S., F. de A.C. ALMEIDA, E. E. LIMA, F. L. H. SILVA, J. P. GOMES. 2008.** „Drying kinetics of coriander (*Coriandrum sativum*) leaf and stem”. *Ciencia y Tecnologia Alimentaria* 6(1): 13-19.
- [29] **SOYSALY., S. ÖZTEKIN, Ö. EREN. 2006.** „Microwave drying of parsley: modelling, kinetics and energy aspects”. *Biosystems Engineering* 93(4): 403-413.
- [30] **SZWEYKOWSKA A., J. SZWEYKOWSKI. 1993.** *Botanika.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [31] **ŚLEDŹ M., M. NOWACKA M., A. WIKTOR A., D. WITROWA-RAJCHERT D. 2013.** „Selected chemical and physico-chemical properties of microwave-convective dried herbs”. *Food and Bioproducts Processing* 91(4): 421-428.
- [32] **ŚLEDŹ M., D. WITROWA-RAJCHERT. 2012.** „Influence of microwave-convective drying on chlorophyll content and colour of herbs”. *Acta Agrophysica* 19(4): 865-876.
- [33] **ŚLEDŹ M., D. WITROWA-RAJCHERT. 2012.** „Składniki biologicznie czynne w suszonych ziołach – czy ciągle aktywne?” *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych* 61(2): 319-329.
- [34] **ŠEDO A., J. KREJČA. 1988.** *Rośliny źródłem przypraw.* Wyd. II. PWRiL Warszawa: 70, 116.
- [35] **THIRUGNANASAMBANDHAM K., V. SIVAKUMAR. 2015.** „Enhancement of shelf life of *Coriandrum sativum* leaves using vacuum drying process: Modeling and optimization”. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*: 1-7.
- [36] **WIECZOREK-CHEŁMIŃSKA Z. 2000.** „Nowoczesna dietetyczna książka kucharska”. Wydawnictwo Lekarskie PZWL Warszawa: 21, 62-64.
- [37] **WIKTOR A., K. ŁUCZYWEK, D. WITROWA-RAJCHERT, M. HANKUS, K. KRÓLIKOWSKI. 2013.** „Aproksymacja krzywych kinetycznych suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści oregano wybranymi równaniami”. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 573: 61-73.
- [38] **WITROWA-RAJCHERT D., M. HANKUS, E. PAWLAK. 2009.** „Wpływ metody suszenia na zawartość chlorofilu i barwę oregano oraz bazylii”. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 48(1): 70-71.
- [39] **WOJDALSKI J., B. DRÓŹDŹ. 2012.** „Efektywność energetyczna zakładów przemysłu spożywczego. Zarys problematyki i podstawowe definicje”. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego* 3(3): 37-49.
- [40] **WOJDALSKI J., B. DRÓŹDŹ, A. RAUZER. 2008.** „Analiza zużycia energii i wody w zakładzie przetwórstwa zielarskiego”. *Inżynieria Rolnicza* 1(99): 419-424.
- [41] **WÓJCIK-STOPCZYŃSKA B., P. JAKOWIENKO, D. JADCZAK. 2010.** „Ocena mikrobiologicznego zanieczyszczenia świeżej bazylii i mięty”. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość* 4(71): 122-131.
- [42] **ZIELIŃSKA M., M. MARKOWSKI. 2007.** „Drying behaviour of carrots dried in spout-fluidized bed Ryder”. *Drying Technology* 25: 261-270.