

**ANALIZA MIKROFALOWEGO SUSZENIA PIETRUSZKI
W WARUNKACH OBNIŻONEGO CIŚNIENIA.
Część I. KINETYKA SUSZENIA PIETRUSZKI
NIEBLANSZOWANEJ I BLANSZOWANEJ**

Marian Szarycz, Eugeniusz Kamiński, Klaudiusz Jałoszyński,
Anna Szponarska

Streszczenie. W pracy przedstawiono przebieg krzywych suszenia pietruszki nieblanszowanej i blanszowanej. Proces suszenia prowadzono w warunkach mikrofalowo-podciśnieniowych. W przebiegu suszenia wyróżniono dwa okresy, które opisano równaniami empirycznymi. Stwierdzono, że przy zastosowanych w badaniach przedziałach ciśnień oraz gęstości mocy mikrofal wartość ciśnienia nie wpłynęła na przebieg suszenia. Występuje natomiast istotna różnica w przebiegu kinetyki suszenia pietruszki nieblanszowanej i blanszowanej.

Słowa kluczowe: suszenie, mikrofałe, obniżone ciśnienie, pietruszka

OZNACZENIA

a – połowa długości krawędzi sześciangu, m
 a_m – efektywny współczynnik dyfuzji wody, $m^2 \cdot s^{-1}$
 K – współczynnik suszarniczy, s^{-1}
 p_A – ciśnienie górne – włączenie pompy, kPa
 p_B – ciśnienie dolne – wyłączenie pompy, kPa
 t – temperatura, $^{\circ}C$
 U_{red} – zredukowana zawartość wody, –
 u – zawartość wody, $kg \cdot kg^{-1}$
 u_0 – początkowa zawartość wody, $kg \cdot kg^{-1}$
 u_r – równowagowa zawartość wody, $kg \cdot kg^{-1}$
 Ψ – współczynnik kształtu, –
 τ – czas, s, min

WSTĘP

Warzywa są jednym z głównych składników diety człowieka. Największą wartością odżywczą charakteryzują się warzywa w stanie świeżym. Sezonowość produkcji warzyw sprawia, że dostępność ich poza okresami zbiorów związana jest z posiadaniem

odpowiedniego zaplecza przechowalniczego i przetwórczego. Niemal wszystkie znane metody konserwacji żywności powodują jej przemiany, przez co otrzymuje się produkt o zmienionej jakości w stosunku do surowca wyjściowego.

Coraz powszechniejsza staje się żywność w formie trwałych koncentratów spożywczych, w skład których wchodzi również suszone warzywa. Susz otrzymywany metodami tradycyjnymi (konwekcyjną, kontaktową) charakteryzuje się stosunkowo niską jakością, co związane jest z utratą w czasie procesu cennych składników. Dotyczy to zwłaszcza witamin, które ulegają degradacji w podwyższonej temperaturze przy kontakcie z tlenem. Metodą, która pozwala na zachowanie witamin w suszu w znacznym stopniu (ok. 40%), jest suszenie sublimacyjne [Lisowa i in. 1999]. Jednakże ze względu na wysoki koszt liofilizacji susz uzyskiwany tą metodą nie jest powszechnie dostępny.

Jedną z metod suszenia, w której upatruje się możliwość dalszej poprawy jakości suszu, jest suszenie mikrofalowe prowadzone w warunkach obniżonego ciśnienia. Wynika to z następujących przesłanek:

– nagrzewanie mikrofalowe powoduje dostarczenie ciepła do całej masy suszonych cząstek w stosunkowo krótkim czasie. W związku z tym wewnętrzny transport ciepła jest bardziej efektywny niż przy tradycyjnym suszeniu, co skraca czas suszenia [Schmidt i in. 1992];

– obniżone ciśnienie powoduje wrzenie wody w temperaturach niższych niż przy ciśnieniu atmosferycznym. Efektem tego może być uniknięcie niekorzystnego efektu termicznego wpływającego na zmiany struktury, tekstury, cech organoleptycznych, a także strat biochemicznych żywności, w szczególności witamin.

Jednocześnie z analizy sprawnościowej suszenia mikrofalowego wynika, że podczas takiego suszenia sprawność może osiągać wartość powyżej 80% [Szarycz 1999].

Warunkiem zastosowania metody mikrofalowo-podciśnieniowej na skalę przemysłową jest rozpoznanie zjawisk zachodzących podczas tego procesu oraz jego skutków jakościowych.

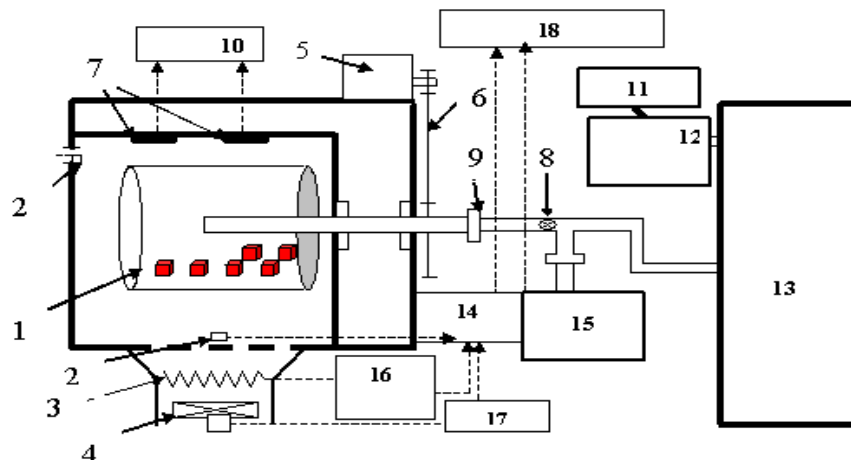
Jedną z podstawowych informacji o procesie suszenia jest przebieg jego kinetyki. Ponieważ ważnym warzywem wchodzącym w skład trwałych koncentratów spożywczych jest pietruszka, celem pracy jest opisanie przebiegu jej suszenia równaniami empirycznymi.

MATERIAŁ I METODY

Dla zrealizowania badań zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 1. Przewidziano możliwość mieszania próbek w bębnie suszącym dla równomiernego nagrzewania umieszczonych w nim cząstek materiału.

Zasadniczą część stanowiska jest zbiornik suszarniczy o kształcie walca wykonany ze szkła o niskim współczynniku strat dielektrycznych. W celu zapewnienia równomiernego nagrzewania próbek zastosowano układ umożliwiający obrót bębna suszarniczego w czasie trwania procesu suszenia. Układ ten składa się z silnika repulsyjnego i przekładni ślimakowej. Przekazywanie napędu na wał bębna suszącego odbywa się poprzez przekładnię łańcuchową. Zbiornik suszący połączono z wałem za pośrednictwem głowicy umożliwiającej przekazanie ruchu obrotowego, natomiast stabilność

bębna zapewniają rolki podtrzymujące, wykonane z teflonu. Zbiornik suszący wraz z głowicą umieszczono we wnęce mikrofalowej, poprzez którą przepływało powietrze nagrzewane do temperatury wrzenia wody przy średnim ciśnieniu danego cyklu. Pole elektromagnetyczne we wnęce wytwarzają dwa magnetrony o łącznej mocy maksymalnej 1200 W. Moc magnetronów sterowano amplitudowo.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – zbiornik suszarniczy, 2 – czujnik temperatury, 3 – grzałki, 4 – wentylator, 5 – silnik elektryczny, 6 – przekładnia, 7 – magnetron, 8 – zawór zamykający, 9 – łącznik, 10 – układ sterowania mocy mikrofal, 11 – układ sterujący pracę pompy próżniowej, 12 – pompa próżniowa, 13 – zbiornik wyrównawczy, 14 – układ sterowania temperatury, 15 – miernik podciśnienia, 16 – układ sterowania mocy grzałek, 17 – układ sterowania wentylatora, 18 – komputer rejestrujący

Fig. 1. A scheme of experimental stand: 1 – drying chamber, 2 – temperature sensor, 3 – heaters, 4 – fan, 5 – electric motor, 6 – gear, 7 – magnetron, 8 – cut off valve, 9 – connector, 10 – control system of microwave power, 11 – control system of vacuum pump, 12 – vacuum pump, 13 – equalising tank, 14 – temperature control system, 15 – negative pressure meter, 16 – power control system of heaters, 17 – fan control system, 18 – computer

W osi wału i głowicy wykonano kanał, przez który para wodna powstająca w bębnie przedostawała się poprzez przewód łączący do zbiornika wyrównawczego. Przewód łączący zbiornik wyrównawczy z głowicą bębna zakończony jest łącznikiem umożliwiającym obrót głowicy i zbiornika suszącego. W łączniku tym zainstalowany jest czujnik połączony z komputerem, rejestrujący temperaturę pary wodnej usuwanej w czasie trwania procesu. Za ciśnienie panujące w układzie odpowiada miernik podciśnienia wraz z układem sterującym pracę pompy próżniowej. Wartości odczytywane z miernika rejestrowane są przez komputer.

Do badań użyto pietruszki korzeniowej odmiany Berlińska. Materiał krojono w kostkę o boku 9 mm przy użyciu wykrojnika, co zapewniało dokładność utrzymania wymiaru $\pm 0,2$ mm. Tak przygotowany materiał zostały podzielony na dwie grupy: pierwsza

suszona w stanie świeżym, a druga poddana wstępnej obróbce blanszowania w wodzie o temperaturze 95°C przez 4 minuty. W instalacji suszarniczej stosowano zmienne ciśnienia w zakresie pomiędzy ciśnieniem „górnym” p_A , przy którym włączano pompę podciśnieniową, a „dolnym” p_B , przy którym pompę wyłączano. Pracę pompy sterowano regulatorem.

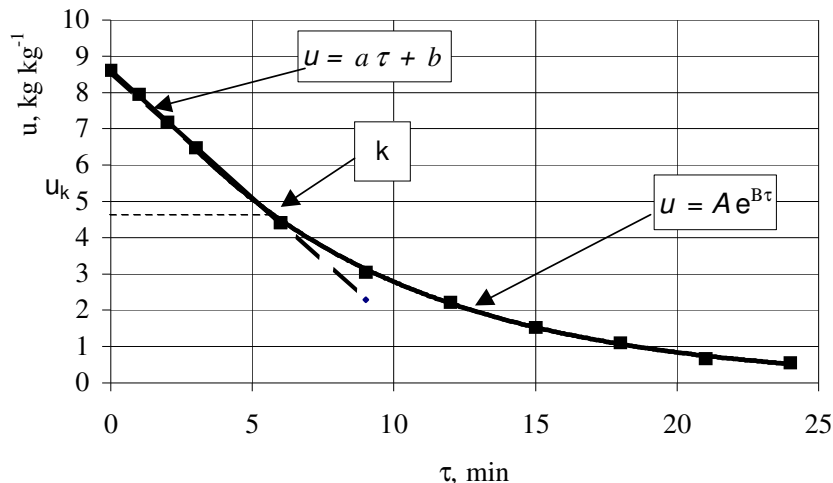
Badania suszenia przeprowadzono przy następujących zakresach ciśnień:

- seria I – $p_A=6$, $p_B = 4$ kPa,
- seria II – $p_A=8$, $p_B = 6$ kPa,
- seria III – $p_A=10$, $p_B = 8$ kPa,
- seria IV – $p_A=12$, $p_B = 10$ kPa.

Moc mikrofal ustalono na poziomie 40% mocy maksymalnej, tj. 480 W. Próbkę materiału o masie ok. 60 g ważono na wadze laboratoryjnej i umieszczano w zbiorniku suszącym. Zbiornik podłączano do instalacji podciśnieniowej i włączano magnetrony. Kolejne doświadczenia przerywano po 1, 2, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 i 24 minutach. W wyjętych ze zbiornika próbkach oznaczano zawartość wody metodą suszarkową, uzyskując kolejne punkty krzywej suszenia. Doświadczenia wykonywano w co najmniej trzech powtórzeniach. W kolejnych doświadczeniach każdorazowo używano materiału świeżego

WYNIKI I Dyskusja

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg suszenia mikrofalowo-podciśnieniowego.



Rys. 2. Przykładowa krzywa suszenia przy nagrzewaniu mikrofalowym i obniżonym ciśnieniu. Pierwszy i drugi okres suszenia

Fig. 2. Example of drying-curve by microwave heating and reduced pressure. First and second drying period

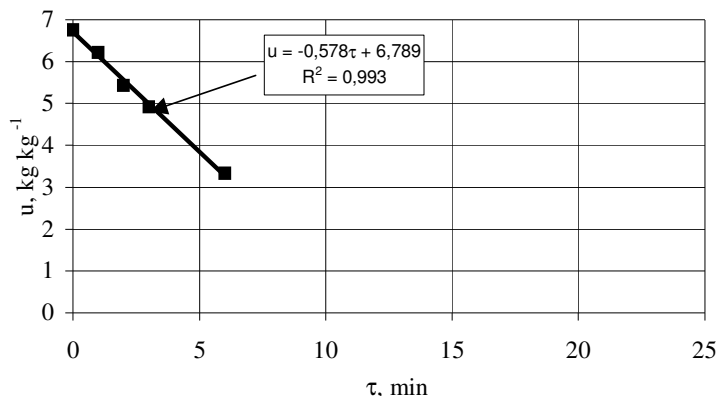
W przebiegu suszenia wyróżniono dwa okresy. Okres stałej szybkości suszenia opisany równaniem liniowym:

$$u = a\tau + b \tag{1}$$

kończył się, gdy zawartość wody w materiale obniżyła się do wartości właściwej dla punktu k. Po osiągnięciu wartości uwilgotnienia, właściwego dla punktu k rozpoczyna się okres malejącej szybkości suszenia opisany równaniem wykładniczym postaci [Pabis 1965]:

$$u = Ae^{B\tau} \tag{2}$$

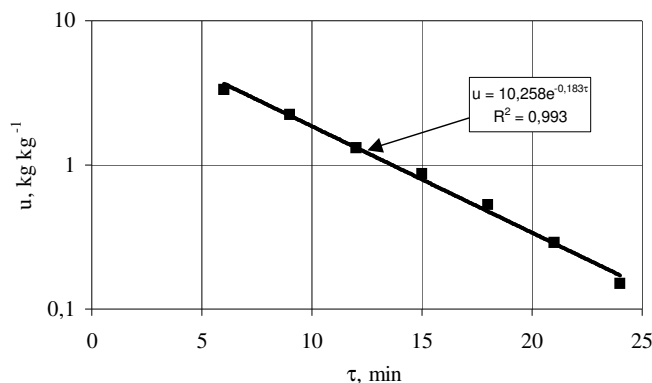
Na rysunku 3 przedstawiono przebieg okresu stałej szybkości suszenia pietruszki nieblanszowanej przy ciśnieniu górnym $p_A = 6$ kPa i dolnym $p_B = 4$ kPa. Przebieg suszenia w tym okresie opisuje równanie liniowe (1).



Rys. 3. Kinetyka suszenia kostki z pietruszki nieblanszowanej przy nagrzewaniu mikrofalowym i obniżonym ciśnieniu ($p_A = 6$ kPa, $p_B = 4$ kPa). Pierwszy okres suszenia
 Fig. 3. The drying kinetics of cube of non-blanched parsley, by microwave heating and reduced pressure ($p_A = 6$ kPa, $p_B = 4$ kPa). First drying period

Tabela 1. Współczynniki równań 1 i 2 opisujących kinetykę suszenia pietruszki nieblanszowanej dla poszczególnych ciśnień
 Table 1. The coefficients to equations 1 and 2, concerning kinetics of drying non-blanched parsley by different pressure

Zakresy ciśnień Vacuum range		$u = a\tau + b$		u_k	$u = Ae^{B\tau}$	
p_A , kPa	p_B , kPa	a	b		A	B
6	4	-0,578	6,789	3,5	10,258	-0,183
8	6	-0,546	6,494	3,5	7,961	-0,147
10	8	-0,590	7,004	3,5	9,147	-0,157
12	10	-0,574	6,973	3,5	8,704	-0,147
Wartości średnie – Mean values		-0,572	6,814	3,5	9,018	-0,157

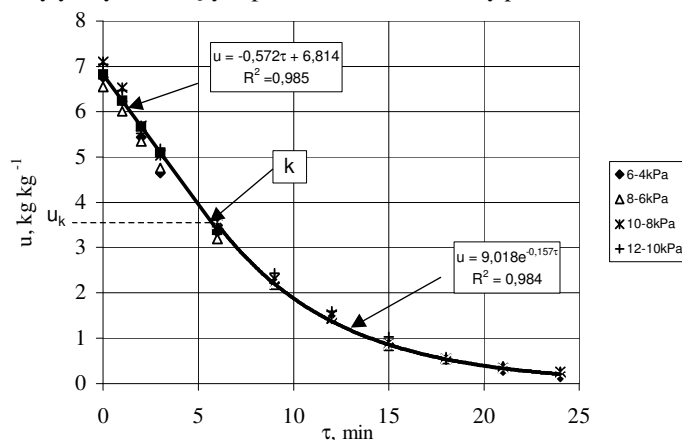


Rys. 4. Kinetyka suszenia kostki z pietruszki nieblanszowanej przy nagrzewaniu mikrofalowym i obniżonym ciśnieniu ($p_A = 6$ kPa, $p_B = 4$ kPa). Drugi okres suszenia

Fig. 4. The drying kinetics of cubes of non-blanching parsley, by microwave heating and reduced pressure ($p_A = 6$ kPa, $p_B = 4$ kPa). Second drying period

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg suszenia pietruszki w tych samych granicach ciśnieniach w okresie malejącej szybkości suszenia w skali półlogarytmicznej. Okres ten trwał od chwili osiągnięcia przez materiał krytycznej zawartości wody do końca procesu i opisuje go równanie wykładnicze (2).

W podobny sposób przedstawiono i opisano przebiegi suszenia pietruszki świeżej przy pozostałych zakresach ciśnień górnych i dolnych. Wartości stałych a i b w równaniu liniowym (1) oraz A i B w równaniu wykładniczym (2), jak również wartości zawartości wody w punktach krytycznych dzielących proces suszenia na okresy przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 5. Przebiegi suszenia pietruszki nieblanszowanej w warunkach mikrofalowo-podciśnieniowych dla wszystkich zakresów ciśnień oraz krzywa wartości uśrednionych poszczególnych współczynników równań liniowych i wykładniczych

Fig. 5. The run of drying of non-blanching parsley in microwave-vacuum conditions and the curve of averaged coefficient in linear and exponential equations

Dla porównania, na rysunku 5 naniesiono punkty pomiarowe dla wszystkich zakresów stosowanych ciśnień oraz krzywą uśrednioną.

Dla określenia wartości efektywnego współczynnika dyfuzji, w dalszej części pracy operowano zredukowaną zawartością wody. W równaniu definiującym zredukowaną zawartość wody $U_{red} = f(\tau)$ jako:

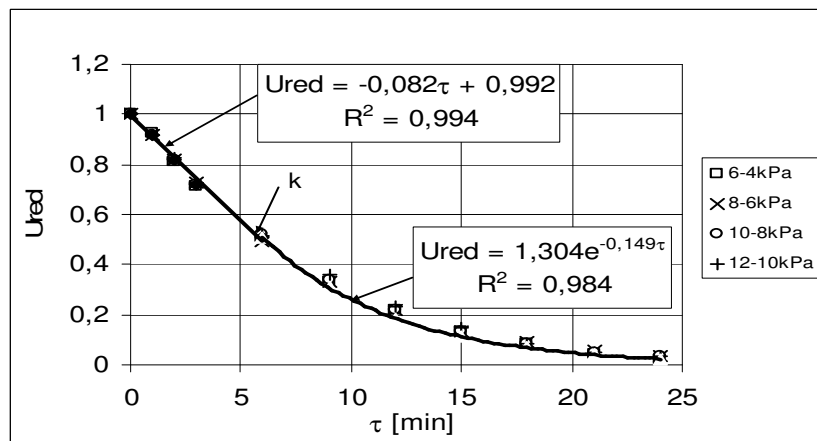
$$U_{red} = \frac{u(\tau) - u_r}{u_0 - u_r} \quad (3)$$

gdzie: $u(\tau)$ – zawartość wody, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
 u_0 – początkowa zawartość wody, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
 u_r – równowagowa zawartość wody, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$

przy zastosowanych parametrach procesowych przyjmowano, że równowagowa zawartość wody u_r wynosiła zero, gdyż suszenie odbywało się każdorazowo w pobliżu temperatury wrzenia wody właściwej dla wartości zastosowanych ciśnień. Stąd:

$$U_{red} = \frac{u(\tau)}{u_0} \quad (4)$$

Na rysunku 6 przedstawiono przebieg zmian zredukowanej zawartości wody we wszystkich doświadczeniach na tle krzywej uśrednionej.



Rys. 6. Przebieg zmian zredukowanej zawartości wody w pietruszce nieblanszowanej suszonej mikrofalowo-podciśnieniowo dla wszystkich zakresów ciśnień, wraz z krzywą uśrednioną
 Fig. 6. The run of drying of non-blanching parsley in microwave-vacuum conditions for all ranges of pressure and the mean curve

Analiza wariancji, przedstawiona w tabelach 2 i 3, wykazała brak istotności różnic pomiędzy punktami otrzymanymi w kolejnych doświadczeniach suszenia pietruszki nieblanszowanej a wartościami uśrednionymi dla wszystkich zakresów stosowanych ciśnień.

Tabela 2. Analiza wariancji dla pietruszki nieblanszowanej

Table 2. Analysis of variance for non-blanchd parsley

Analysis of Variance for Ured - Type III Sums of Squares					
Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
MAIN EFFECTS					
A:CIŚNIENIE	0.0015955	4	3.98864E-4	0.003	0.94652
RESIDUAL	6.8843342	50	0.1376867		
TOTAL (CORRECTED)	6.8859296	54			
0 missing values have been excluded.					

Tabela 3. Analiza jednorodności grup i porównanie średnich grupowych dla pietruszki nieblanszowanej

Table 3. Multiple range analysis for non-blanchd parsley

Multiple range analysis for Ured by pressure			
Method: 95 Percent LSD			
Level	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
6-4 kPa	11	0.4270909	X
średnia	11	0.4360909	X
8-6 kPa	11	0.4364540	X
10-8 kPa	11	0.4390909	X
12-10 kPa	11	0.4435455	X
contrast		difference	limits
(6-4 kPa)-(8-6 kPa)		-0.00900	0.31787
(6-4 kPa)-średnia		-0.00936	0.31780
(6-4 kPa)-(10-8 kPa)		-0.01200	0.31787
(6-4 kPa)-(12-10 kPa)		-0.01645	0.31787
(8-6 kPa)-średnia		-0.00036	0.31787
(8-6 kPa)-(10-8 kPa)		-0.00300	0.31787
(8-6 kPa)-(12-10 kPa)		-0.00745	0.31787
średnia -(10-8 kPa)		-0.00264	0.31787

* denotes a statistically significant difference

W związku z tym dla dalszej analizy zmian zawartości wody w pietruszce przyjęto uśrednione wartości funkcji $U_{red} = f(\tau)$. Przebieg tej krzywej opisują równania:

dla $u_0 > u \geq u_k$

$$U_{red} = -0,083\tau + 0,992 \quad (5)$$

dla $u_k > u$

$$U_{red} = 1,304e^{-0,149\tau} \quad (6)$$

Zgodnie z teorią suszenia, z wartości współczynnika suszarniczego K można określić wartość efektywnego współczynnika dyfuzji wody w materiale podczas suszenia [Pabis 1965]. Dla badanego kształtu cząstek (sześciiany) równanie wiążące współczynnik suszarniczy K i efektywny współczynnik dyfuzji wody przedstawia się następująco:

$$K = 3 \frac{\pi^2}{4} a_m \frac{1}{a^2} \quad (7)$$

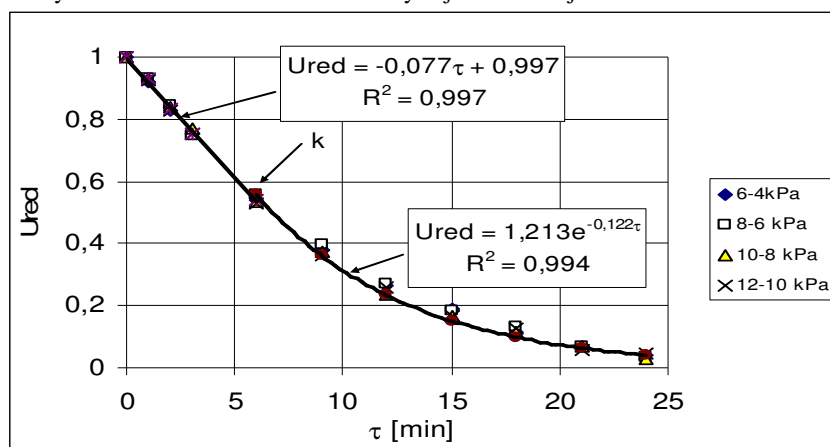
gdzie: a_m – efektywny współczynnik dyfuzji wody, $m^2 \cdot \text{min}^{-1}$

a – połowa długości krawędzi sześcianu, m

Mimo że w doświadczeniach wymiary cząstek ulegały zmianie (wartość a w równaniu 7), dla zobrazowania efektu zastosowanej metody na przebieg procesu przyjmowano wartość a jako połowę początkowej długości krawędzi kostki. Obliczona wartość efektywnego współczynnika dyfuzji wody dla sześcianów z pietruszki świeżej, suszonych w zakresie stosowanych parametrów procesowych wynosi:

$$a_m = 24,6 \cdot 10^{-6}, \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (8)$$

W podobny sposób opisano przebieg kinetyki suszenia sześcianów z pietruszki blanszowanej. Na rysunku 7 przedstawiono przebieg zmian zredukowanej zawartości wody we wszystkich doświadczeniach na tle krzywej uśrednionej.



Rys. 7. Przebieg zmian zredukowanej zawartości wody we wszystkich przedziałach ciśnień dla pietruszki blanszowanej przed suszeniem mikrofalowo-podciśnieniowym, wraz z krzywą uśrednioną

Fig. 7. The run of drying of blanched parsley in microwave-vacuum conditions for all ranges of pressure and the mean curve

Również w przypadku pietruszki blanszowanej analiza wariancji pomiędzy punktami otrzymanymi w kolejnych doświadczeniach suszenia a wartościami uśrednionymi dla wszystkich zakresów stosowanych ciśnień wykazała brak istotności różnic pomiędzy tymi przebiegami, co przedstawiają tabele 4 i 5.

Tabela 4. Analiza wariancji dla pietruszki blanszowanej
Table 4. Analysis of variance for blanched parsley

Analysis of Variance for Ured - Type III Sums of Squares					
Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
MAIN EFFECTS					
A: CIŚNIENIE	0.0013359	4	3.33973E-4	0.003	1.0000
RESIDUAL	6.5549455	50	0.1310989		
TOTAL (CORRECTED)	6.5562813	54			

0 missing values have been excluded.

Tabela 5. Analiza jednorodności grup i porównanie średnich grupowych dla pietruszki blanszowanej

Table 5. Multiple range analysis for blanched parsley

Multiple range analysis for Ured by pressure			
Method: 95 Percent LSD			
Level	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
6-4 kPa	11	0.4592727	X
średnia	11	0.4617273	X
8-6 kPa	11	0.4659091	X
10-8 kPa	11	0.4701818	X
12-10 kPa	11	0.4742363	X
contrast		difference	limits
(6-4 kPa) - (8-6 kPa)		-0.00245	0.31017
(6-4 kPa) - średnia		-0.00664	0.31017
(6-4 kPa) - (10-8 kPa)		-0.01309	0.31017
(6-4 kPa) - (12-10 kPa)		-0.01091	0.31017
(8-6 kPa) - średnia		-0.00418	0.31017
(8-6 kPa) - (10-8 kPa)		-0.01064	0.31017
(8-6 kPa) - (12-10 kPa)		-0.00845	0.31017
średnia - (10-8 kPa)		-0.00645	0.31017

* denotes a statistically significant difference

Obliczona wartość efektywnego współczynnika dyfuzji wody dla sześcianów z pietruszki blanszowanej, suszonych w zakresie stosowanych parametrów procesowych wynosi:

$$a_m = 19,6 \cdot 10^{-6}, \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (9)$$

Z przedstawionych wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody wynika, że mikrofalowo-podciśnieniowe suszenie pietruszki powoduje wielokrotne skrócenie procesu w stosunku do suszenia konwekcyjnego.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwalają na następujących stwierdzenia:

1. W przebiegu kinetyki suszenia pietruszki nieblanszowanej i blanszowanej można wyróżnić okresy stałej i malejącej szybkości suszenia. Okres stałej szybkości suszenia opisuje równanie liniowe, a okres malejącej szybkości suszenia można opisać równaniem wykładniczym.

2. Analiza wariancji wykazała, że w zakresie zastosowanych w badaniach parametrów procesowych nie stwierdzono wpływu przedziałów ciśnień, w których realizowany był proces na przebieg zmian zredukowanej zawartości wody dla każdego z badanych materiałów. Natomiast stwierdzono istotne różnice w suszeniu pietruszki nieblanszowanej i blanszowanej. Świadczą o tym różne wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody.

PIŚMIENNICTWO

- Lisowa H., Lis T., Kozak P., Piwowarski E., 1999. Wpływ temp. na cechy jakościowe suszów, czas procesu liofilizacji i zużycie energii. *Inżynieria Rolnicza* 5, 21.
- Pabis S., 1965. *Suszenie płodów rolnych*. PWRiL, Warszawa.
- Schmidt P. S., Bergman T. L., Peace J. A., Chen P., 1992. Heat and Mass Transfer Considerations in Dielectrically-Enhanced Drying. *Drying* 92, A. S. Mujumdar ed., Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Szarycz M., 1999. Aspekty energetyczne suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*. Wyd. Pol. Łódzkiej, 189–196.

THE ANALYSIS OF MICROWAVES DRYING OF PARSLEY IN CONDITIONS OF LOW PRESSURE.

Part I. DRYING KINETICS OF UNBLANCHED AND BLANCHED PARSLEY

Abstract. The drying kinetics of unblanched and blanched parsley were presented. Drying process carried out in microwave-vacuum conditions. During dehydration two periods of process were singled out and described with empirical equations. It was observed that in conditions of experiment applied value of pressure had no influence on drying process. The significant differences between drying kinetics of unblanched and blanched parsley were found.

Key words: drying, microwaves, reduced pressure, parsley

Marian Szarycz, Eugeniusz Kamiński, Klaudiusz Jałoszyński, Anna Szponarska, Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, ul. Chetmońskiego 37/41, 51–630 Wrocław