

SUSZENIE KALAREPY METODĄ MIKROFALOWĄ W WARUNKACH OBNIŻONEGO CIŚNIENIA

Klaudiusz Jałoszyński, Marta Paślawska, Mariusz Surma, Bogdan Stępień
Instytut Inżynierii Rolniczej Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Procesowi suszenia mikrofalowo-próżniowego poddano kalarepę, warzywo zawierające cenne mikroelementy oraz witaminy (B₁, B₂, B₆, C) i kwasy: nikotynowy, pantotenowy, foliowy. Celem pracy było wyznaczenie kinetyki suszenia kalarepy, określenie skurczu suszarniczego, wyznaczenie kinetyki rehydracji jak również określenie maksymalnej temperatury nagrzewania materiału. Materiał został poddany procesowi suszenia mikrofalowo-próżniowego przy ciśnieniu 2-4 kPa i mocy mikrofal na poziomie 240, 360 i 480 W. Kalarepa pokrojona została w kostkę o wymiarze 10 mm. Przeprowadzone badania pozwoliły na stwierdzenie, że w kinetyce suszenia dla wszystkich trzech mocy mikrofal można wyróżnić dwa okresy suszenia. Okres stałej szybkości suszenia opisany równaniem liniowym, który kończył się wraz z osiągnięciem $u_k=4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ i okres zmiennej szybkości suszenia opisany równaniem wykładniczym. Końcowy objętościowy skurcz suszarniczy kształtował się na poziomie 70%.

Słowa kluczowe: kalarepa, suszenie mikrofalowo-próżniowe, kinetyka, skurcz

Wstęp i cel pracy

Warzywa świeże, jak również w formie przetworzonej, są jednym z głównych składników diety człowieka. Okresowa produkcja sprawia, że dostępność warzyw poza sezonem zbiorów związana jest z posiadaniem odpowiedniego zaplecza przechowalniczego, jak również przetwórczego. W dobie dynamicznego rozwoju transportu i technologii przechowalnictwa w ostatnich latach, dochodzi jeszcze jedna możliwość pozyskiwania świeżych owoców i warzyw poprzez import z różnych miejsc świata. Na początku XXI wieku w okresie postępu technicznego i cywilizacyjnego, coraz częściej spotykamy się z problemami zdrowotnymi. Deficyt czasu oraz duże zaangażowanie emocjonalne w sprawy zawodowe coraz częściej skłaniają konsumentów do sięgania po produkty łatwe i szybkie w przygotowaniu. Często zdarza się, że dużym zainteresowaniem cieszą się artykuły, które atrakcyjny wygląd i smak zawdzięczają procesom nie zawsze pro-zdrowotnym (Świdorski, 1999).

Tradycyjne metody utrwalania, w tym również suszenie metodami konwencjonalnymi warzyw i owoców, prowadzą do znacznej degradacji związków odżywczych i aromatycznych (Stępień, 2007; Alias, 2007). Aby warzywa te spełniały swoją rolę żywieniową często dodane są do nich sztuczne dodatki podnoszące walory smakowe (Rutkowski, 2000). W przemyśle najczęściej stosowaną metodą usuwania wody z tkanki roślinnej jest suszenie konwekcyjne (Skorupska, 2005). Podczas suszenia konwekcyjnego dochodzi do bardzo istotnych zmian postaci i właściwości materiałów wyjściowych. Podstawowym zjawiskiem towarzyszącym procesowi suszenia jest objętościowy skurcz suszarniczy. W przypadku zastosowania suszenia konwekcyjnego skurcz ten kształtuje się na poziomie 90% dla marchwi (Witrowa-Rajchert, 1999).

Zaproponowanie odpowiednio efektywnej metody suszenia produktów pochodzenia biologicznego, bogatych w cenne dla zdrowia składniki odżywcze, może przyczynić się do wprowadzenia na rynek pro-zdrowotnego produktu o zróżnicowanym smaku, atrakcyjnym wyglądzie i odpowiedniej teksturze. Metodą, która może zapewnić otrzymanie takiego produktu jest suszenie mikrofalowo-próżniowe (Sham i in., 2001; Figiel, 2009; Szarycz i in., 2006). Metoda ta, przy właściwym doborze mocy mikrofal i poziomie ciśnienia, pozwala na uzyskanie dobrej tekstury, jak również umożliwia bardzo szybkie usunięcie wody z materiału w umiarkowanej temperaturze i ograniczonej kontakcie z tlenem (Szarycz i in., 2002b). Dzięki uzyskaniu stosunkowo niskiej temperatury, straty wrażliwych na nią składników odżywczych (Lis i in., 2005), w tym witamin i związków aromatycznych, są stosunkowo niewielkie, a barwa, smak i zapach są w dużym stopniu zachowane (Wojdyło i in., 2009; Szarycz, 2001a).

Warunkiem zastosowania metody mikrofalowo-próżniowej na skalę przemysłową jest rozpoznanie zjawisk zachodzących podczas tego procesu oraz jego skutków. W literaturze brak jest doniesień dotyczących wykorzystania metody mikrofalowo-próżniowej do suszenia kalarepy.

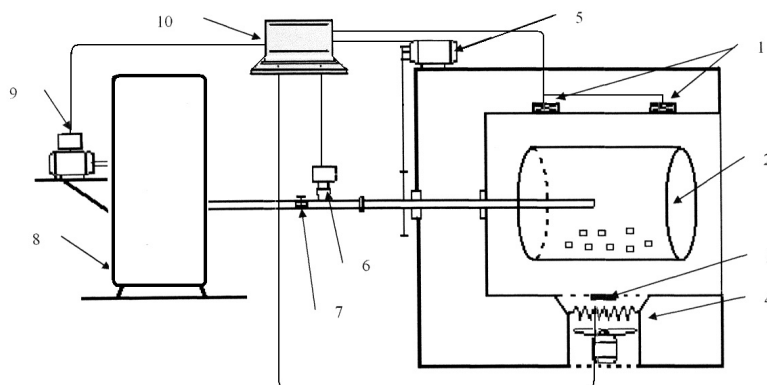
Kalarepa posiada duże wartości odżywcze i smakowe. Częścią jadalną jest przerośnięta i zgrubiała łodyga. Jest źródłem witamin z grupy B, C, K oraz beta-karotenu i soli mineralnych (wapnia, magnezu, żelaza i fosforu) (Kunachowicz i in., 1998). Wystarczy jedna, średnich rozmiarów kalarepa, by pokryć dzienne zapotrzebowanie dorosłego człowieka na witaminę C. Dodatkowo, zawiera luteinę niezbędną do prawidłowego funkcjonowania narządu wzroku. Dzięki zawartości cholagogi i włókien roślinnych korzystnie wpływa na układ trawienny przyspiesza wydzielanie żółci i reguluje perystaltykę jelit (Zalega i in., 2013). Kalarepa jako warzywo zaliczana jest do grupy nieuczulających, a więc nadaje się do podawania dzieciom od szóstego miesiąca życia. Kalarepa jest szczególnie zalecana cukrzykom, chorym na hipoglikemię i miażdżycę, ze względu na powolny proces podnoszenia poziomu cukru we krwi i jednocześnie niską kaloryczność. Wydaje się, że w formie wysuszonej może być smaczną i pro-zdrowotną przekąską.

Celem pracy było opisanie kinetyki suszenia mikrofalowo-próżniowego kalarepy prowadzonego przy zmiennej mocy mikrofal, określenie wielkości skurczu suszarniczego jak również określenie temperatury nagrzewania się materiału w zależności od zastosowanej mocy mikrofal.

Material i metodyka

Do badań użyto kalarepę odmiany Korfu. Materiał krojono w kostkę o krawędzi 10 mm przy użyciu wykrojnika, co zapewniało dokładność utrzymania wymiaru $\pm 0,2$ mm. Tak przygotowany materiał poddano procesowi suszenia.

Do zrealizowania badań wykorzystano suszarkę mikrofalowo-próżniową Plazmatronika SM-200 przedstawioną na rysunku 1. Zasadniczą częścią stanowiska był bęben suszarniczy, w którego wnętrzu umieszczany był materiał przeznaczony do suszenia. Zbiornik umieszczano we wnęce mikrofalowej i podłączano do układu odpowiedzialnego za uzyskanie i utrzymanie odpowiedniego ciśnienia. W celu uzyskania równomiernego nagrzania próbki oprócz zastosowania mieszacza pola, zbiornik suszarniczy wykonywał ruch obrotowy. Pole elektromagnetyczne wytwarzały dwa magnetrony o łącznej mocy 1200 W. Moc magnetronów sterowana była amplitudowo.



Rysunek 1. Schemat stanowiska do suszenia mikrofalowo-próżniowego SM-200 Plazmatronika: 1 – magnetrony, 2 – komora suszenia, 3 – czujnik temperatury, 4 – grzałki, 5 – silnik elektryczny i przekładnia, 6 – miernik podciśnienia, 7 – zawór zamykający, 8 – zbiornik wyrównawczy, 9 – pompa próżniowa, 10 – komputer

Figure 1. Schematic diagram of microwave-vacuum dryer SM – 200 Plazmatronika: 1 – magnetron, 2 – drying chamber, 3 – temperature sensor, 4 – heaters, 5 – electric motor and gear, 6 – under pressure meter, 7 – cut off valve, 8 – equalizing tank, 9 – vacuum pump, 10 – computer

Badania suszenia przeprowadzono przy trzech mocach mikrofal 240, 360, 480 W i jednym zakresie ciśnień 2-4 kPa. Próbkę materiału o masie ok. 60 g ważono na wadze laboratoryjnej WPE-300 i umieszczano w zbiorniku suszarniczym, a następnie rozpoczęto proces suszenia. Kolejne doświadczenia kończono po 2, 4, 8, 12 i tak do 50 minuty w przypadku zastosowania najmniejszej mocy mikrofal. Dla mocy 360 i 480 W kończono odpowiednio po 42 i 38 minutach. W wyjętych ze zbiornika próbkach oznaczano zawartość wody zgodnie z polską normą PN-90/A-75101. Pozwoliło to na uzyskanie kolejnych punktów krzywej suszenia. Doświadczenia wykonano w trzech powtórzeniach, stosując

każdorazowo materiał świeży. Pomiar temperatury nagrzewania się materiału w czasie procesu suszenia wykonywano przy użyciu kamery termowizyjnej.

Określono wartość skurczu objętościowego. Próbkę kalarepy o masie ok. 60 g umieszczano w cylindrze miarowym napełnionym wodą i odczytywano objętość, po czym po ich wyjęciu i osuszeniu na bibule filtracyjnej materiał poddawano procesowi suszenia. Po wysuszeniu kalarepę ważono i umieszczano w tym samym cylindrze miarowym wypełnionym toluenem i odczytywano objętość. Skurcz wywołany suszeniem obliczano z zależności.

$$S = \left(1 - \frac{V_k}{V_0}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Wyniki i dyskusja

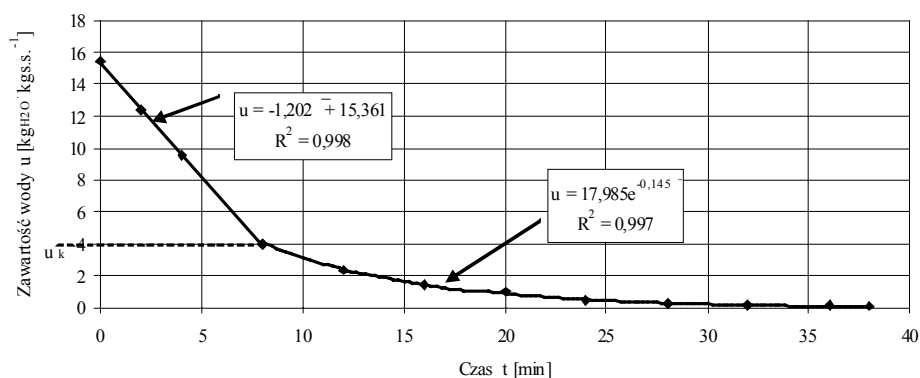
Na rysunku 2 przedstawiono przebieg suszenia mikrofalowo-próżniowego przy ciśnieniu 2-4 kPa i mocy mikrofal 480 W. W uzyskanym przebiegu wyróżniono dwa okresy suszenia. Okres pierwszy- stałej szybkości suszenia opisano równaniem liniowym:

$$u = a\tau + b \quad (2)$$

Okres pierwszy kończył się, gdy zawartość wody w materiale obniżyła się do wartości właściwej dla punktu k. Osiągnięcie uwilgotnienia właściwego dla punktu k rozpoczyna okres malejącej szybkości suszenia opisany równaniem wykładniczym:

$$u = Ae^{B\tau} \quad (3)$$

W celu zwiększenia czytelności i przejrzystości rysunków czas trwania procesu został przedstawiony w minutach zgodnie z polską normą PN-ISO 31-1:2000/A1:2004P.



Rysunek 2. Kinetyka suszenia kalarepy przy mocy mikrofal 480 W i obniżonym ciśnieniu (2-4 kPa)

Figure 2. The drying kinetics of kohlrabi by microwave heating 480 W and reduced pressure (2-4 kPa)

W tabeli 1 przedstawiono wartości stałych a i b w równaniu liniowym oraz A , B w równaniu wykładniczym dla wszystkich mocy mikrofal. Przedstawiono również krytyczną zawartość wody w punkcie k , dzielącym kinetykę suszenia na dwa okresy. Wartości współczynników równań obliczono za pomocą programu TC 3D.

Tabela 1

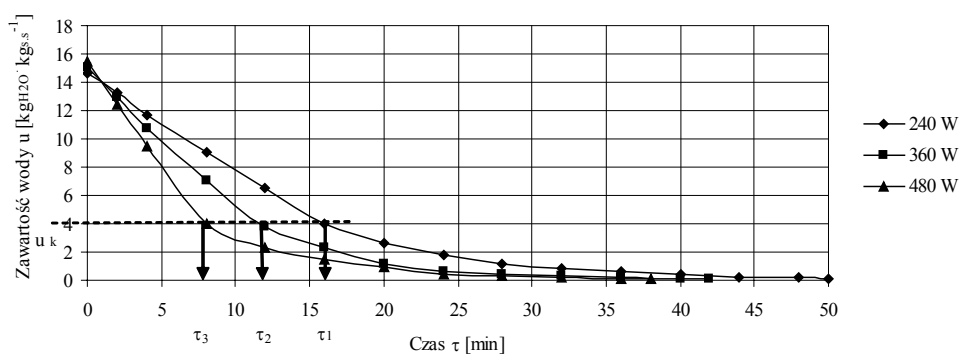
Wartości współczynników równania (2) i (3)

Table 1

Coefficients values for equations (2) and (3)

Ciśnienie 2-4 kPa	$u = at + b$		u_k	$u = A e^{-Bt}$	
	a	B		A	B
Moc mikrofal (W)			($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s}}^{-1}$)		
240	-0,667	14,548	4,0	22,147	-0,103
4					
360	-0,968	14,798	3,9	14,381	-0,119
8					
480	-1,202	15,361	3,97	17,985	-0,145
12					

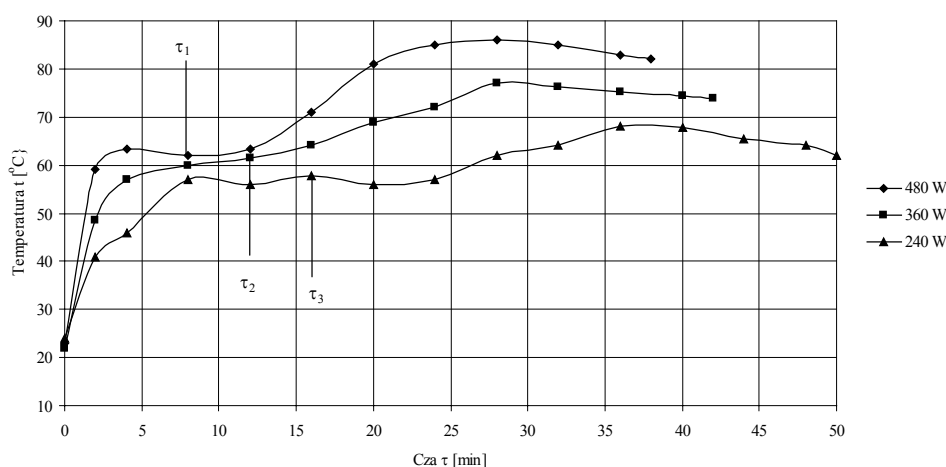
Dla porównania, na rysunku 3 naniesiono wartości „ u ” uzyskane w badaniach przy wszystkich trzech mocach mikrofal, wraz z krytyczną zawartością wody u_k , która dla wszystkich trzech mocy kształtuje się na poziomie $4 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s}}^{-1}$. Do wyznaczenia krytycznej zawartości wody wykorzystano program TC 3D. W przypadku zastosowania najmniejszej mocy mikrofal pierwszy okres suszenia kończył się w 16 minucie (τ_3) i wraz ze wzrostem mocy mikrofal malał odpowiednio do 12 (τ_2) i 8 (τ_1) minut w przypadku największej mocy.



Rysunek 3. Przebiegi suszenia kalarepy w warunkach mikrofalowo-próżniowych dla wszystkich mocy mikrofal

Figure 3. The run drying of kohlrabi in microwave-vacuum conditions

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg narastania temperatury materiału suszonego w czasie trwania procesu suszenia. Wraz ze wzrostem mocy mikrofal obserwujemy znaczący wzrost temperatury. Można zaobserwować (rysunek 3 i 4), że największy wzrost temperatury materiału obserwujemy w pierwszych 5 minutach procesu suszenia. Następnie obserwujemy pewnego rodzaju stabilizację temperatury aż do końca pierwszego okresu suszenia i ma to miejsce odpowiednio w τ_1 (480 W), τ_2 (360 W) i τ_3 dla największej mocy. W przypadku najmniejszej mocy mikrofal materiał nagrzewał się maksymalnie do temperatury 68°C, a proces suszenia kończył się, gdy temperatura materiału była na poziomie 62°C. Przyrost mocy z 360 do 480 W spowodował wzrost maksymalnej temperatury odpowiednio z 77 do 86°C. We wszystkich trzech przypadkach zaobserwowano spadek temperatury w końcowym okresie suszenia odpowiednio do 62, 74 i 82°C. W celu ograniczenia niekorzystnego działania wysokiej temperatury w trakcie procesu suszenia należy doprowadzić do kontrolowanego sterowania mocą mikrofal w trakcie suszenia. Wydaje się, że proces suszenia można rozpocząć wykorzystując moc 480 W i po około 8 do 12 minutach (po zakończeniu pierwszego okresu suszenia dla 480 i 360 W) trwania procesu ograniczyć ją do 240 W, a w razie potrzeby jeszcze ograniczyć do 120 W. W taki sposób, aby utrzymać temperaturę w przedziale 55-65°C. Odpowiednie sterowanie mocą mikrofal w trakcie suszenia mikrofalowo-próżniowego może doprowadzić do znacznego polepszenia właściwości pro-zdrowotnych suszu.

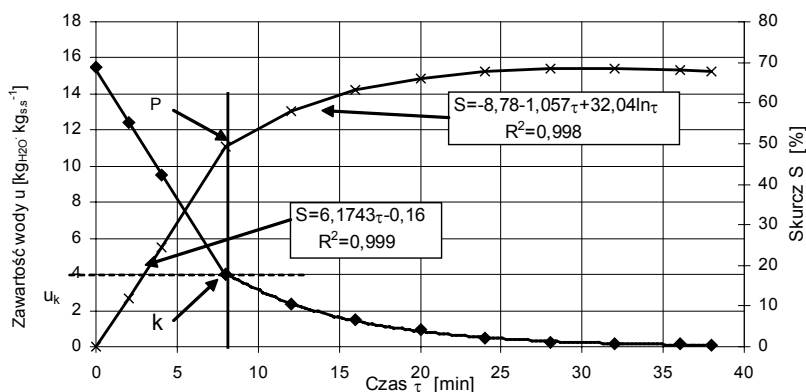


Rysunek 4. Przebiegi narastania temperatury w czasie suszenia mikrofalowo-próżniowego dla wszystkich trzech zakresów mocy mikrofal

Figure 4. Courses of temperature rise during microwave-vacuum drying for all three scopes of microwave powers

Na rysunku 5 przedstawiono zestawienie kinetyki suszenia mikrofalowo-próżniowego kalarepy dla największej mocy mikrofal oraz narastanie objętościowego skurczu suszarniczego w funkcji czasu. Można stwierdzić, że istnieje taki punkt P dotyczący końca liniowego narastania skurczu suszarniczego i przypada on na 8 minutę procesu po przekrocze-

niu, którego rozpoczyna się druga nieliniowa faza narastania skurczu. Można również stwierdzić, że wraz z końcem pierwszego okresu suszenia (punkt k) kończy się faza liniowego narastania skurczu suszarniczego punkt P. Analogiczne zależności obserwujemy w przypadku pozostałych mocy.



Rysunek 5. Skurcz suszarniczy na tle krzywej suszenia 480 W

Figure 5. The shrinkage of material during drying with reference to drying curve 480 W

Wnioski

1. W przebiegu kinetyki mikrofalowo-próżniowego suszenia kalarepy można wyróżnić dwa okresy suszenia: okres stałej i malejącej szybkości suszenia, które opisano odpowiednio równaniem liniowym i wykładniczym.
2. W przypadku wzrostu mocy mikrofal z 240 do 480 W ulega skróceniu pierwszy okres suszenia z 16 do 8 minut, przy zachowaniu stałej krytycznej zawartości wody $u_k=4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ przy wszystkich mocach mikrofal.
3. Wzrost mocy magnetronów z 240 do 480 W podczas suszenia mikrofalowo-próżniowego spowodował wzrost maksymalnej temperatury suszonego materiału z 68 do 86°C.
4. Przebieg narastania skurczu suszarniczego można podzielić na dwie fazy, charakteryzujące się stałą i zmienną szybkością narastania skurczu.
5. Wraz z końcem pierwszego okresu suszenia kończy się faza liniowego narastania skurczu suszarniczego i ma to miejsce w 16, 12 i 8 minucie trwania procesu odpowiednio przy mocy mikrofal 240, 360 i 480 W.
6. Końcowy objętościowy skurcz suszarniczy w przypadku suszenia kalarepy kształtuje się na poziomie 70%.

Literatura

- Alias, I. (2007). Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering* 96(4). 495-502
- Figiel, A. (2009). Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. *Journal of Food Engineering*, 94, 98-104.
- Kunachowicz, H.; Nadolna, I.; Przygoda, B.; Iwanow, K. (1998). *Tabele wartości odżywczej produktów spożywczych*. IŻŻ 85, Warszawa ISBN 83-200-3112-5
- Rutkowski, A. (2000). *Prozdrowotne dodatki do żywności*, Wyd. Apeks, Konin ISBN 83-86139-86-2.
- Lis, T.; Ziemlewska, A.; Lis, M. (2005). Wpływ temperatury suszenia pietruszki na przebieg procesu i cechy jakościowe suszu. *Inżynieria Rolnicza* 3(63). 307-316.
- Sham, P. W. Y.; Scaman, C. H.; Durance, T. D. (2001). Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety. *Journal of Food Science*, 66(9), 1341-1347.
- Skorupski, E. (2005). Badanie procesu suszenia konwekcyjnego pietruszki korzeniowej. *Inżynieria Rolnicza*, 9(69) 313-320.
- Stępień, B. (2007). Impact of the drying method on the process of carrot cutting. *Acta Agrophysica*, 9(1). 255-267.
- Szarycz, M. (2001a). *Wpływ obniżonego ciśnienia zewnętrznego na przebieg suszenia warzyw przy mikrofalowym dostarczaniu energii*". Sprawozdanie z wykonania projektu badawczego interdyscyplinarnego. Praca niepublikowana, IIR AR Wrocław.
- Szarycz, M.; Kramkowski, R.; Kamiński, E. (2002b). Zastosowanie mikrofal do suszenia produktów spożywczych. Część II. Konsekwencje sterowania mocą mikrofal. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2/2002, Warszawa 2002, 55-63.
- Szarycz, M.; Fidos, M.; Jałoszyński, K. (2006). Wpływ zakresu ciśnień podczas suszenia mikrofalowego pod obniżonym ciśnieniem selera korzeniowego na kinetykę procesu i pracę cięcia rehydrowanego materiału. *Inżynieria Rolnicza*, 4(79), 239-246.
- Świdorski, F. (2003). *Żywność wygodna i żywność funkcjonalna*. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa ISBN 83-204-2856-4
- Witrowa-Rajchert, D. (1999). *Rehydracja jako wskaźnik zmian zachodzących w tkance roślinnej podczas suszenia*. Rozprawa habilitacyjna 29. ISBN 83-87660-95-7
- Wojdyło, A.; Figiel, A.; Oszmiański, J. (2009). Effect of drying methods with the application of vacuum-microwave on the phenolic compounds, colour and antioxidant activity in strawberry fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 1337-1343.
- Zalega, J.; Szostak-Węgierek, D. (2013). Żywnienie w profilaktyce nowotworów. Część I. Polifenole roślinne, karotenoidy, błonnik pokarmowy. *Probl. Hig. Epidemiol.*, 94(1). 41-49.

DRYING KOHLRABI WITH MICROWAVE METHOD IN THE LOWERED PRESSURE CONDITIONS

Abstract. Kohlrabi, a vegetable which contains precious microelements and vitamins(B₁, B₂, B₆, C) and acids: nicotinic acid, panthotenic acid, folic acid_were subjected to microwave-vacuum drying. The objective of the paper was to determine the kinetics of drying of kahlrabi, drying shrinkage, rehydration kinetics as well as the maximum temperature of heating the material. Material was subjected to microwave-vacuum drying process at the pressure of 2-4 kPa and power of microwaves at the level of 240, 360 and 480 W. Kahlrabi was cut into 10 mm cubes. The research which was carried out allowed the statement that in the kinetics of drying for all three powers of microwaves, two periods of drying may be distinguished. The period of constant speed of drying described with a linear equation, which ended upon reaching $u_k=4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and the period of variable speed of drying described with exponential equation. Final volumetric drying shrinkage was at the level of 70%.

Key words: kahlrabi, microwave-vacuum drying, kinetics, shrinkage

Adres do korespondencji:

Klaudiusz Jałoszyński; e-mail: klaudiusz.jaloszynski@up.wroc.pl

Instytut Inżynierii Rolniczej

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

ul. Chełmińskiego 37/41

51-630 Wrocław