

Dr hab. inż. Krzysztof GÓRNICKI
 Prof. dr hab. inż. Agnieszka KALETA
 Mgr inż. Krzysztof ZDROIK
 Inż. Michał GULSKI

Zakład Podstaw Nauk Technicznych, Katedra Podstaw Inżynierii
 Wydział Inżynierii Produkcji, SGGW w Warszawie

MATEMATYCZNY OPIS ZMIAN MASY W PROCESIE REHYDRACJI SUSZONYCH PLASTERKÓW KORZENIA PIETRUSZKI®

W artykule przedstawiono wyniki badań procesu rehydracji suszonych plasterków korzenia pietruszki. Grubość plasterków wynosiła 6 mm, temperatura suszenia 60°C. Proces prowadzono w wodzie destylowanej (objętości 100, 200, 300, 400 i 500 cm³) o temperaturach 20, 40, 60, 80 i 100°C. Wyznaczano krotności przyrostu masy (stosunek masy rehydratowanego suszu do masy początkowej suszu). Do opisu procesu rehydracji wykorzystano model empiryczny Singh-Kulshrestha (SK). Współczynniki modelu uzależniono od parametrów procesu rehydracji.

Słowa kluczowe: rehydracja, model empiryczny, model Singh-Kulshrestha, pietruszka.

WSTĘP

Korzeń pietruszki, ze względu na wysoką zawartość suchej substancji i cukrów ogółem [3], jest dobrym surowcem do suszenia, a uzyskany z niego susz jest wartościowym źródłem Ca, Fe, Mg, witaminy PP [11]. Suszony korzeń pietruszki jest często składnikiem tzw. żywności wygodnej, obejmującej zarówno produkty ułatwiające przyrządzanie posiłków jak i produkty gotowe do natychmiastowego spożycia, czy wymagające bardzo krótkiej obróbki kulinarną, którą jest najczęściej rehydracja.

Rehydracja jest skomplikowanym procesem, który obejmuje: zwiększanie masy i objętości suszu w wyniku chłonięcia cieczy oraz stratę suchej substancji (cukrów, kwasów, minerałów, witamin) w wyniku wypłukiwania jej do cieczy (najczęściej wody), w której proces ten następuje. Rehydracja ma na celu przywrócenie suszowi właściwości, jakie miał surowiec.

Proces rehydracji zależy od wielu czynników. Istotne są tu cechy surowca, zabiegi wstępne przed suszeniem jak i same warunki suszenia [13]. Warunki prowadzenia procesu rehydracji mają również wpływ na cechy uzyskanego rehydratu [8]. Przebieg procesu rehydracji odzwierciedla więc zmiany, jakie zaszły w tkance surowca w wyniku suszenia i obróbki poprzedzającej ten proces oraz w wyniku rehydracji [14, 20].

Do ilościowego określenia procesu rehydracji wykorzystywane są często wielkości zwane wskaźnikami [1, 3, 9, 10, 12], natomiast do opisu procesu modele matematyczne. Modele empiryczne procesu dostarczają cennych informacji o kinetyce procesu rehydracji [2, 4, 16-20], zaś modele teoretyczne przeważnie bazują na teorii dyfuzyjnego ruchu masy [5-7, 15].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań dotyczących wpływu temperatury i objętości wody, w której zanurzono produkt, na przebieg procesu

rehydracji suszonych plasterków korzenia pietruszki. Celem artykułu jest również opis zmian masy suszu podczas procesu rehydracji przy użyciu modelu empirycznego Singh-Kulshrestha oraz uzależnienie współczynników tego modelu od parametrów procesu rehydracji.

MATERIAŁ DO BADAŃ I METODY

Materiał do badań stanowiły oczyszczone korzenie pietruszki odmiany Berlińska, o początkowej zawartości wody ok. 4,5 kg H₂O/kg s.s. Korzeń pietruszki krojono w plastry o grubości 6 mm.

Suszenie przeprowadzono w suszarce laboratoryjnej KCW 100 w warunkach konwekcji naturalnej. Surowiec układano w pojedynczej warstwie na siatkach tak, aby plastry nie stykały się ze sobą. Suszenie w warunkach konwekcji naturalnej przebiegało w temperaturze powietrza suszącego wynoszącej 60°C i trwało do uzyskania stałej masy suszu. Zawartość wody w uzyskanym suszu wynosiła ok. 0,1 kg H₂O/kg s.s.

Wysuszone plasterki korzenia pietruszki o masie $m_0 \approx 10$ g poddawano procesowi rehydracji w 100, 200, 300, 400 i 500 cm³ wody destylowanej o temperaturach t : 20, 40, 60, 80 i 100°C. Proces rehydracji, w zależności od temperatury, trwał od 3 do 6 h. Rehydratowaną próbkę oddzielano od wody, osuszano bibułą i ważono (waga elektroniczna WPE 300) z dokładnością 0,01 g.

Dla każdego czasu τ wyznaczano krotność przyrostu masy rehydratowanego suszu, tzn. stosunek aktualnej masy próbki $m(\tau)$ i początkowej masy m_0 suszu. Oznaczenie to wykonywano w trzech powtórzeniach.

Przy doborze współczynników a i b modelu Singh-Kulshrestha (SK)[18] w ujęciu dla krotności przyrostu masy

$$\frac{m(\tau)}{m_0} = 1 + \frac{ab\tau}{b\tau + 1} \quad (1)$$

wykorzystano program komputerowy Statistica 10.

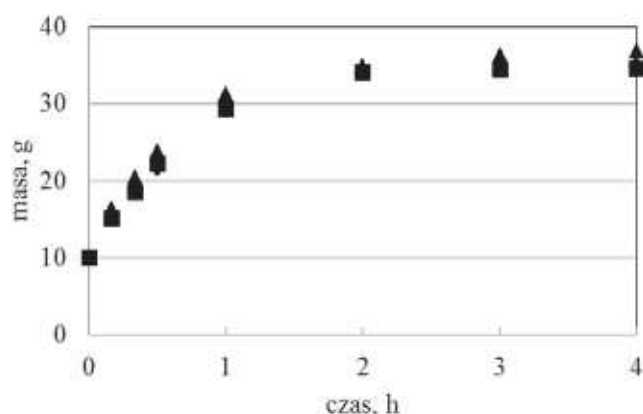
Model SK (1) umożliwia również oszacowanie wartości równowagowych krotności przyrostów masy, tzn. takich, jakie osiągnąłby suszony materiał, gdyby proces rehydracji trwał nieskończenie długo ($\tau \rightarrow \infty$):

$$\left(\frac{m(\tau)}{m_0} \right)_r = 1 + a \quad (2)$$

W pracy zostały obliczone wartości równowagowych krotności przyrostów masy. Dodatkowo współczynniki a i b uzależniono (regresja liniowa) od parametrów procesu rehydracji (temperatury rehydracji i stosunków początkowych mas wody i suszu) z wykorzystaniem programu komputerowego Excel 2010.

OMÓWIENIE I Dyskusja Wyników

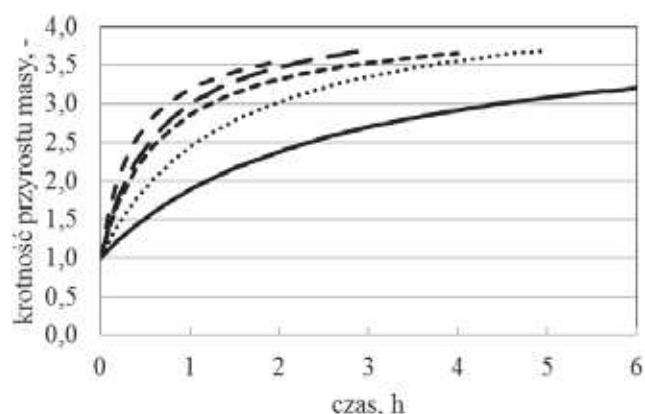
Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy wykres przyrostu masy suszonych plasterków z korzenia pietruszki podczas rehydracji. Analizując wszystkie uzyskane wyniki badań można zauważyć następujące zależności. W początkowym okresie rehydracji następuje gwałtowny wzrost masy, a w dalszym etapie trwania procesu absorpcja wody przez rehydrat ulega stopniowemu spowolnieniu związanemu ze zbliżaniem się próbek do stanu równowagi. Największe różnice między wyznaczonymi w powtórzeniach masami rehydratu rejestrowano pod koniec procesu i nie były one większe od 4 g.



Rys. 1. Przyrost masy materialu suszonego (plasterki z korzenia pietruszki o grubości 6 mm suszone w temperaturze 60°C) podczas rehydracji w 200 cm³ destylowanej wody o temperaturze 60°C.

Źródło: Badania własne

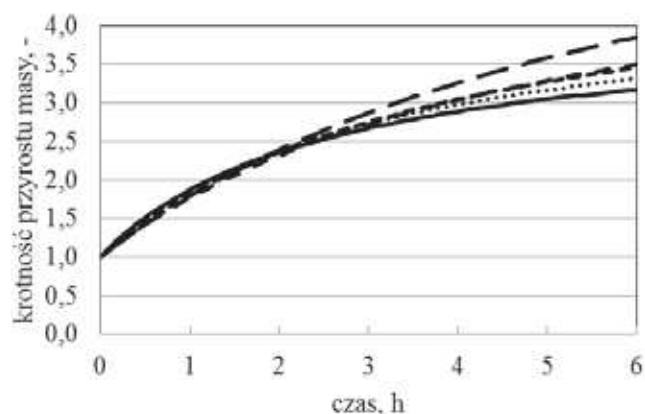
Wpływ temperatury rehydracji na krotność przyrostu masy w suszu pietruszki podczas rehydracji obrazuje rysunek 2. W niższych temperaturach (20 i 40°C) proces rehydracji przebiega bardziej równomiernie i wolniej niż w wyższych temperaturach rehydracji. Taki wpływ temperatury można tłumaczyć wzrostem intensywności dyfuzji masy wraz ze wzrostem temperatury. Dotyczy to zarówno absorbowanej masy wody jak i traconej masy suchej substancji przez próbkę w procesie rehydracji. Wzrost masy podczas procesu rehydracji jest bowiem spowodowany wzrostem zaabsorbowanej w próbce masy wody, ale i ubytkiem w niej masy suchej substancji.



Rys. 2. Zależność krotności przyrostu masy suszu (plasterki z korzenia pietruszki o grubości 6 mm suszone w temperaturze 60°C) podczas rehydracji w 200 cm³ wody destylowanej od temperatury rehydracji: (—) – 20°C, (·····) – 40°C, (- - - -) – 60°C, (— —) – 80°C, (---) – 100°C.

Źródło: Badania własne

Wpływ początkowej objętości wody, w której następował proces rehydracji, na krotność przyrostu masy rehydratu przedstawiono na rysunku 3. Do około drugiej godziny procesy prezentowane krotności są praktycznie jednokowe. Następnie w dalszym etapie procesu próbki rehydratowane w mniejszej ilości wody osiągają mniejsze krotności przyrostu masy. Absorbowana w próbce woda jest rozpuszczalnikiem suchej substancji – związków chemicznych w niej rozpuszczalnych. Sucha substancja przemieszcza się na zewnątrz próbki powodując wzrost jej stężenia w wodzie, w której następuje proces rehydracji. Dodatkowo w przypadku, gdy rehydrację prowadzi się w małej początkowej objętości wody, stężenie suchej substancji w otaczającej próbkę wodzie wzrasta również z powodu zmniejszania się ilości tej wody spowodowanego absorbowaniem jej przez próbkę. Szybciej ustala się więc stan równowagi stężeń składników suchej substancji w rehydracie i w otaczającej go wodzie, powodując w ten sposób zanik wymiany masy.



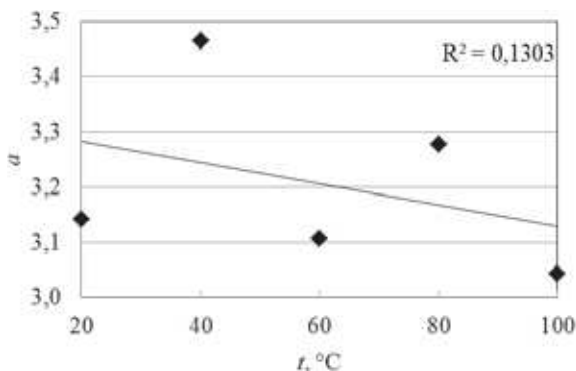
Rys. 3. Zależność krotności przyrostu masy suszu (plasterki z korzenia pietruszki o grubości 6 mm suszone w temperaturze 60°C) podczas rehydracji od objętości wody, w której proces następuje: (—) – 100cm³, (·····) – 200cm³, (- - - -) – 300cm³, (— —) – 400cm³, (---) – 500cm³.

Źródło: Badania własne

Uzyskane wyniki badań krotności przyrostu masy rehydratu opisano modelem Singh-Kulthrestha uzyskując wartości współczynników a i b tego modelu. Wartości tych współczynników uzależniono od parametrów procesu rehydratacji. Na rysunku 4 przedstawiono zależność współczynnika a , a na rysunku 5 współczynnika b modelu SK od temperatury rehydratacji. Współczynnik a ma tendencję spadkową ze wzrostem temperatury, a równanie opisujące tę zależność ma postać:

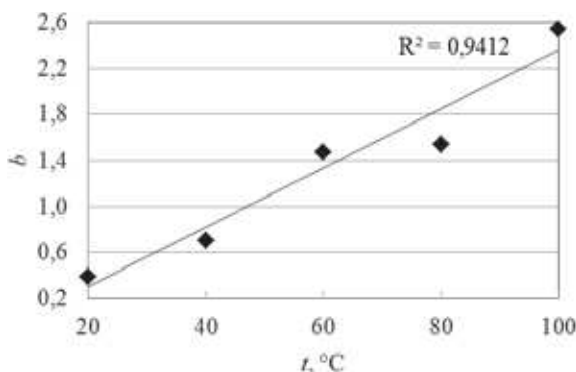
$$a = -0,0019t + 3,3216 \quad (3)$$

przy czym korelacja współczynnika a i temperatury t jest słaba ujemna i przyjmuje wartość $R = 0,36$.



Rys. 4. Zależność współczynnika a modelu Singh-Kulthrestha (SK) od temperatury rehydratacji dla rehydratacji w 200 cm³ wody destylowanej.

Źródło: Badania własne



Rys. 5. Zależność współczynnika b modelu Singh-Kulthrestha (SK) od temperatury rehydratacji dla rehydratacji w 200 cm³ wody destylowanej.

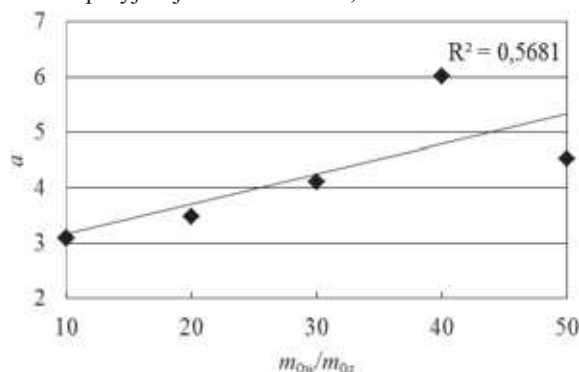
Źródło: Badania własne

Oszacowane wartości równowagowych krotności przyrostów masy (jakie osiągnąłby suszony materiał, gdyby proces rehydratacji trwał nieskończenie długo), zgodnie z równaniem (2) charakteryzują się takimi samymi cechami co opisany współczynnik a modelu SK. Wartości równowagowych krotności masy suszonych plasterków korzenia pietruszki rehydratowanych w wodzie o temperaturach 20-100°C zwierają się w zakresie 4,1-4,5.

Współczynnik b modelu SK ma natomiast tendencję wzrostową ze wzrostem temperatury, a równanie opisujące tę zależność ma postać:

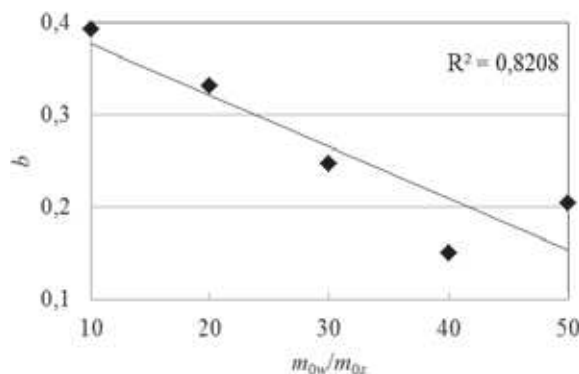
$$b = 0,0257t - 0,2123 \quad (4)$$

przy czym korelacja współczynnika b i temperatury jest silna dodatnia i przyjmuje wartość $R = 0,97$.



Rys. 6. Zależność współczynnika a modelu Singh-Kulthrestha (SK) od stosunku początkowej masy wody i początkowej masy suszu dla rehydratacji w temperaturze 60°C.

Źródło: Badania własne



Rys. 7. Zależność współczynnika b modelu Singh-Kulthrestha (SK) od stosunku początkowej masy wody i początkowej masy suszu dla rehydratacji w temperaturze 60°C.

Źródło: Badania własne

Na rysunku 6 przedstawiono zależność współczynnika a , a na rysunku 7 współczynnika b modelu SK od stosunku początkowej masy wody m_{0w} , w której prowadzono proces rehydratacji i początkowej masy suszu m_{0s} . Wartości współczynnika a mają tendencję wzrostową ze wzrostem stosunku omawianych mas. Równanie opisujące tę zależność ma postać:

$$a = 0,0541 \frac{m_{0w}}{m_{0s}} + 2,6186 \quad (5)$$

przy czym korelacja współczynnika a i zmiennej m_{0w}/m_{0s} jest silna dodatnia i przyjmuje wartość $R = 0,75$. Wartości współczynnika b modelu (SK) mają tendencję spadkową ze wzrostem omawianego stosunku mas, a równanie opisujące tę zależność ma postać:

$$b = -0,0056 \frac{m_{0w}}{m_{0s}} + 0,4324 \quad (6)$$

przy czym korelacja współczynnika b i zmiennej m_{0w}/m_{0s} jest silna ujemna i przyjmuje wartość $R = 0,91$.

Zbadano również zależność współczynników a oraz b modelu SK od odwrotnego stosunku początkowych mas,

czyli stosunku początkowej masy suszu m_{0s} i początkowej masy wody m_{0w} . Współczynniki determinacji funkcji opisujących współczynniki modelu SK: $a = f(m_{0w}/m_{0s})$ i $b = f(m_{0s}/m_{0w})$ okazały się jednak mniejsze.

Oszacowane wartości równowagowych krotności przyrostów masy charakteryzują się takimi samymi cechami co opisany współczynnik a modelu SK. Wzrastają one ze wzrostem ilości wody, w której następuje proces rehydratacji i przyjmują wartości z zakresu 4,1-7,0.

PODSUMOWANIE

Analizując uzyskane wyniki badań można stwierdzić, że zarówno temperatura jak i ilość wody, w której prowadzony jest proces rehydratacji, wpływają na krotność przyrostu masy suszu z korzenia pietruszki w procesie rehydratacji. Możliwe jest zastosowanie modelu empirycznego Singh-Kulshrestha do opisu krotności przyrostu masy suszu w procesie rehydratacji, przy czym współczynniki tego modelu można uzależnić od parametrów procesu rehydratacji (temperatury rehydratacji i stosunku początkowych mas wody i suszu) za pomocą funkcji liniowych.

LITERATURA

- [1] ATARÉS L., CHIRALT A., GONZÁLEZ-MARTÍNEZ C. 2009. *Effect of the impregnated solute on air drying and rehydration of apple slices (cv. Granny Smith)*. Journal of Food Engineering, 91, 305-310.
- [2] AZUARA E. BERISTAIN C.J., GARCIA H.S. 1992. *Developments of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration*. Journal of Food Science and Technology, 29, 239-242.
- [3] BĄKOWSKI J., MICHALIK H. 1982. Ocena przydatności marchwi, selerów, pietruszki, cebuli, porów i pieczarek do produkcji suszu. Biul. Warz. XXVI – Część II. Instytut Warzywnictwa – Skierniewice, 331-360.
- [4] DÍAZ G. R., MARTINEZ-MONZÓ J., FITO P., CHIRALT A. 2003. *Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying*. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 4(2), 203-209.
- [5] FALADE K.O., ABBO E.S. 2007. *Air-drying and rehydration characteristics of date palm (Phoenix dactylifera L.) fruits*. Journal of Food Engineering, 79, 724-730.
- [6] GARCÍA-PASCUAL P., SANJUÁN N., MELIS R., MULET A. 2006. *Morchella esculenta (morel) rehydration process modelling*. Journal of Food Engineering, 72, 346-353.
- [7] GÓRNICKI K. 2011. Modelowanie procesu rehydratacji wybranych warzyw i owoców. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- [8] KALETA A., GÓRNICKI K., GÓRNICKA M. 2008. Parametry suszenia korzeni pietruszki a kinetyka rehydratacji jej suszu. [w:] Metody fizyczne diagnostyki surowców roślinnych i produktów spożywczych (red. Dobrzański B., Grundas S., Rybczyński R.). Wydawnictwo Naukowe FRNA, Lublin, 87-106.
- [9] KARATHANOS V., ANGLEA S., KAREL M. 1993. *Collapse of structure during drying of celery*. Drying Technology, 11, 1005-1023.
- [10] KAUR P., KUMAR A., ARORA S., GHUMAN B.S. 2006. *Quality of dried coriander leaves as affected by pretreatments and method of drying*. European Food Research Technology, 223, 189-194.
- [11] KUNACHOWICZ H., NADOLNA I., PRZYGODA B., IWANOW K. 1998. Tabele wartości odżywczej produktów spożywczych. IŻŻ, Warszawa.
- [12] LEVI A., BEN-SHALOM N., PIAT D., REID D.S. 1988. *Effect of blanching and drying on pectin constituents and related characteristics of dehydrated peaches*. Journal of Food Science, 53, 1187-1190.
- [13] LEWICKI P.P. 1998. *Some remarks on rehydration of dried foods*. Journal of Food Engineering, 36, 81-87.
- [14] LEWICKI P.P. 1998. *Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review*. International Journal of Food Properties, 1(1), 1-22.
- [15] MELQUIÁDES Y., LÓPEZ C., ROSAS M.E. 2009. *Rehydration kinetics study of the dehydrated carrot (Daucus carota)*. Información Tecnológica, 20(3), 65-72.
- [16] PELEG M. 1988. *An empirical mode for the description of moisture sorption curves*. Journal of Food Science, 53(4), 1216-1219.
- [17] PILOSOFF A.M.R., BOQUET R., BATHOLOMAI G.B. 1985. *Kinetics of water uptake to food powders*. Journal of Food Science, 50, 278-282.
- [18] SINGH B.P.N., KULSHRESTHA S.P. 1987. *Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains*. Journal of Food Science, 52(6), 1538-1541.
- [19] WESOŁOWSKI A. 2000. Badanie suszenia jabłek promieniami podczerwonymi. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa.
- [20] WITROWA-RAJCHERT D. 1999. Rehydracja jako wskaźnik zmian zachodzących w tkance roślinnej w czasie suszenia. Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MASS CHANGES OF DRIED PARSLEY ROOT SLICES DURING REHYDRATION

SUMMARY

The rehydration of dried parsley root slices was studied. Samples were cut into 6 mm slices. Temperature of drying air equaled 60°C. The effect of initial distilled water volume (100, 200, 300, 400 and 500 cm³) and rehydration temperature (20, 40, 60, 80 and 100°C) on the rehydration characteristics of dried parsley root slices was investigated. The ratio of the mass of rehydrated dried slices to initial mass of dried slices was determined. The empirical Singh-Kulshrestha (SK) model was used to describe the rehydration process. The coefficients of the SK model were conditioned to the parameters of rehydration.

Key words: rehydration, empirical model, Singh-Kulshrestha model, parsley.