

MATEMATYCZNE MODELOWANIE PROCESU REHYDRACJI SUSZONEJ TKANKI JABŁKA

D. Witrowa-Rajchert

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji SGGW
ul. Nowoursynowska 159c, 02-776 Warszawa

Streszczenie. W pracy zbadano możliwość zastosowania równania Pelega do opisu procesu absorpcji wody oraz modyfikacji tego równania do opisu wpływu składników suchej substancji w czasie rehydracji w temperaturze 4, 25 i 40°C jabłka suszonego metodą sublimacyjną, konwekcyjną i konwekcyjno-mikrofalową. Użyte równania dobrze opisują dane doświadczalne, za wyjątkiem procesu ubytku składników suchej substancji z suszu sublimacyjnego uwadnianego w temperaturze 40°C. Wartości stałych K_2 i K_2' , charakteryzujących właściwości sorpcyjne oraz zdolność do utrzymywania składników suchej substancji, są niezależne od temperatury rehydracji. Zależność odwrotności stałych K_1 i K_1' od temperatury opisano stosując równanie Arrheniusa. Obliczono energię aktywacji, przez co oszacowano wrażliwość badanych suszy na zmianę temperatury rehydracji.

Słowa kluczowe: model Pelega, energia aktywacji, absorpcja wody, ubytek suchej substancji.

WSTĘP

Wiele suszonych produktów spożywa się lub poddaje dalszej obróbce przemysłowej po wcześniejszym uwodnieniu. Najlepiej, aby takie produkty po rehydracji posiadały odpowiednią strukturę, a proces przebiegał tak szybko, jak to możliwe. Przebieg rehydracji zależy od składu chemicznego materiału, strukturalnych i chemicznych zmian zachodzących w nim w czasie suszenia oraz warunków uwadniania [13].

Studia nad kinetyką rehydracji mogą być bardzo użyteczne w optymalizacji procesu. Z procesowego i inżynierskiego punktu widzenia interesujące jest nie tylko jak szybko nastąpi absorpcja wody, lecz również jak na jej przebieg wpłyną zmienne warunki procesu i w jaki sposób można przewidzieć czas rehydracji [6].

Modelowanie kinetyki rehydracji suszonych owoców i warzyw jest rzadko spotykane. Stosowany dotychczas opis matematyczny w zdecydowanej większości dotyczy uwadniania różnego rodzaju nasion i ziaren. Użycie matematycznych modeli wymaga podstawowej wiedzy na temat mechanizmów kontrolujących proces transportu wody i składników suchej substancji. Mechanizmy te oparte są na mikroskopowych bilansach, co często prowadzi do równań różniczkowych opisujących przebieg procesu w czasie i/lub przestrzeni. Do modelowania rehydracji często stosowane jest drugie prawo Ficka, według którego przemieszczanie się wody i suchej substancji odbywa się na zasadzie dyfuzyjnego ruchu masy. Za pomocą tego modelu opisano między innymi proces moczenia pszenicy [4], ryżu [5] i fasoli [1], rehydracji suszonej cebuli [7] i marchwi [13,14]. Rozwiązania drugiego prawa Ficka są możliwe dla materiałów o dobrze zdefiniowanej geometrii i dla ściśle określonych warunków brzegowych. Przy wprowadzeniu zależności warunków brzegowych od czasu można poprawić ten model, ale to prowadzi do konieczności użycia rozwiązań numerycznych wymagających skomplikowanych obliczeń, których często nie warto stosować, ponieważ otrzymany model procesu może różnić się od rzeczywistego jego przebiegu [6,14]. Dodatkowo, przeprowadzenie analizy opartej na drugim prawie Ficka, chociaż do procesu absorpcji wody stosowane najczęściej, jest możliwe tylko w przypadku wprowadzenia warunków brzegowych i założeń, które nie zawsze są zgodne z rzeczywistym przebiegiem procesu. Przykładem może być założenie stałości wymiaru charakterystycznego w czasie procesu dyfuzji, podczas gdy uwadnianiu suszonej tkanki roślinnej najczęściej towarzyszy pęcznienie materiału, w czasie którego może nastąpić nawet dwukrotne zwiększenie wymiaru [13].

Ze względu na swoją złożoność i trudności związane z rozwiązywaniem równań nieustalonego ruchu masy, rehydracja jest również opisywana w oparciu o modele empiryczne. Mimo ich prostoty, modele doświadczalne są bardzo użyteczne i ich interpretacja może często dostarczać cennych informacji o mechanizmie procesu. Do takich modeli można zaliczyć równania kinetyczne pierwszego rzędu, modele Weibulla i Pelega. Równania kinetyczne pierwszego rzędu zakładają przede wszystkim, że rehydracja jest kontrolowana przez powierzchnię zewnętrzną, co może mieć miejsce tylko w materiałach ekstremalnie porowatych lub o bardzo twardej powierzchni. Model ten był stosowany między innymi do ziaren semoliny [3] i fasoli [2].

Model Weibulla opisuje proces jako ciąg prawdopodobnych zdarzeń. Zawiera dwa współczynniki: parametr skali (α), związany z szybkością procesu i parametr kształtu (β), którego wartość zależy od mechanizmu kontrolującego proces:

$$\frac{M_{\tau} - M_s}{M_o - M_s} = 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

Jeżeli parametr kształtu β jest równy 1, to model redukuje się do równania kinetycznego pierwszego rzędu. Według Cunha i in. (cyt. za [8]) model ten może opisywać proces rehydracji kontrolowany przez wewnętrzną dyfuzję, konwekcję zewnętrzną i relaksację. Proces identyfikuje się jako dyfuzyjny, jeśli $\beta = 0,6$, podczas gdy procesy kontrolowane przez opór zewnętrzny lub zjawisko relaksacji nie mogą być odróżniane za pomocą tego parametru, który w obu przypadkach może osiągać wartość od 1 do 1,1.

Względnie prosty model matematyczny, opisujący proces absorpcji wody przez materiały żywnościowe zaproponował Peleg [9], który opracował ten model dla sorpcji pary wodnej przez mleko w proszku i ziarna ryżu. Możliwości zastosowania równania Pelega były przedstawiane dla wielu materiałów spożywczych, mimo, że równanie to nie wynika z żadnych fizycznych praw. Za pomocą omawianego modelu opisano proces moczenia różnych nasion roślin strączkowych [2,11] oraz wchłanianie wody przez ziarna kukurydzy, prosa i sorgo [10]. Wymienione produkty charakteryzują się najczęściej nieznaczną zmianą objętości podczas procesu uwadniania. W literaturze nie znaleziono informacji na temat wykorzystania równania Pelega do modelowania absorpcji wody przez materiały, które znacząco zmieniają wymiary w czasie uwadniania. Do takich materiałów można zaliczyć suszoną tkankę roślinną.

Wstępne badania potwierdzają możliwość zastosowania omawianego modelu do opisu wnikania wody do suszonej tkanki roślinnej podczas jej uwadniania. Procesowi temu towarzyszy zjawisko wypływu rozpuszczalnych składników suchej substancji z materiału do otaczającego środowiska. Podjęto próbę matematycznego opisu również tego procesu.

PODSTAWY TEORETYCZNE MODELU PELEGA

Do opisu zmian zawartości wody w materiale Peleg [9] zaproponował równanie:

$$M_{\tau} = M_o + \frac{\tau}{K_1 + K_2 \tau} \quad (2)$$

Dla $\tau \rightarrow \infty$

$$M_e = M_o + \frac{1}{K_2} \quad (3)$$

Przekształcając równanie (2) otrzymano:

$$\frac{\tau}{M_\tau - M_o} = K_1 + K_2 \tau \quad (4)$$

Z równania (4) wynika, że kreśląc zależność $\tau/(M_\tau - M_o)$ w funkcji czasu τ otrzymuje się linię prostą z K_1 jako odciętą i z K_2 jako współczynnikiem kierunkowym. Sopade i Obekpa [11] stwierdzili, że wartość K_1 zależy od temperatury procesu, a K_2 prawdopodobnie przyjmuje wartość stałą dla produktów żywnościowych, nie zmieniającą się ze zmianą temperatury. Może być więc traktowany jako parametr charakteryzujący właściwości sorpcyjne materiału. Okazuje się, że K_1 może być porównywany do współczynnika dyfuzji, chociaż wartość tej stałej zmniejsza się ze wzrostem temperatury. Do opisu zależności odwrotności stałej K_1 od temperatury można zastosować równanie Arrheniusa:

$$\frac{1}{K_1} = K_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

Z równania (5) można obliczyć energię aktywacji i oszacować wrażliwość na temperaturę charakterystyk sorpcyjnych materiałów żywnościowych.

Z uwagi na fakt, że podczas rehydracji suszonej tkanki roślinnej wnikaniu wody do wnętrza materiału najczęściej towarzyszy, przebiegający w odwrotnym kierunku, wypływ składników suchej substancji do otaczającego środowiska, zawartość wody M zdecydowano wyrażać jako przyrost masy wody przypadający na 1 g początkowej suchej substancji i określono jako u . Przy takim założeniu $u_o = 0$ i wówczas:

$$u_\tau = \frac{\tau}{K_1 + K_2 \tau} \quad (6)$$

$$u_e = \frac{1}{K_2} \quad \text{oraz} \quad \frac{\tau}{u_\tau} = K_1 + K_2 \tau \quad (7)$$

Wstępne badania potwierdzają możliwość zastosowania powyższych równań do opisu wnikania wody do tkanki roślinnej podczas jej uwadniania. Jednak procesowi temu towarzyszy zjawisko wypływu rozpuszczalnych składników suchej substancji z materiału do otaczającego środowiska. Podjęto próbę matematycznego opisu również tego procesu za pomocą zmodyfikowanego równania Pelega:

$$ss_{\tau} = 1 - \frac{\tau}{K_1' + K_2'\tau} \quad (8)$$

Tak więc celem niniejszej pracy było zbadanie możliwości zastosowania równania Pelega do modelowania wchłaniania wody oraz własnej modyfikacji tego równania do modelowania wypływu rozpuszczalnych składników suchej substancji z suszonej tkanki jabłka.

MATERIAŁ I METODY

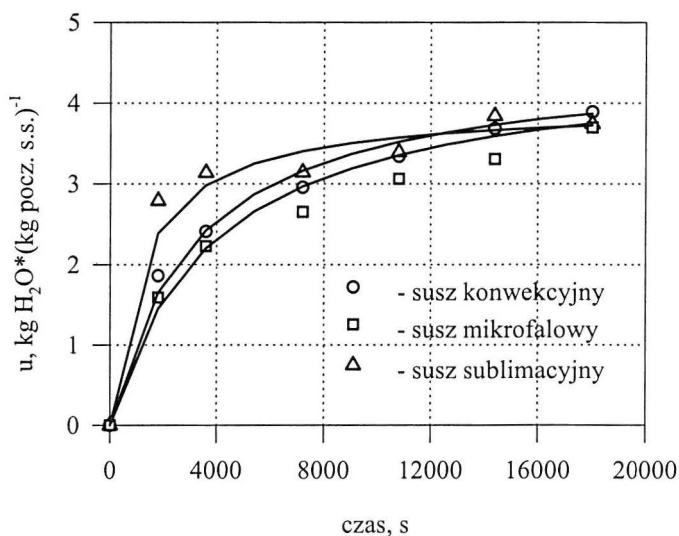
Materiał do badań stanowiły jabłka odmiany Idared krojone w sześcią o boku 1 cm, które suszono trzema metodami: konwekcyjną, konwekcyjno-mikrofalową i sublimacyjną. Suszenie konwekcyjne prowadzono w suszarce laboratoryjnej z przepływem powietrza o prędkości $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i temperaturze 70°C nad materiałem, ułożonym na sicie w pojedynczej warstwie w ilości $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. W metodzie konwekcyjno-mikrofalowej stosowano te same parametry procesu, wspomagając suszenie w sposób ciągły mikrofalami o mocy 360 W. Materiał przeznaczony do suszenia sublimacyjnego, zamrożony w temperaturze -18°C , umieszczano na tacach, których temperatura w czasie suszenia wynosiła 20°C , zaś proces prowadzono przy ciśnieniu 57 Pa.

Rehydrację suszonego materiału prowadzono w wodzie o temperaturze 4 i 25°C przez 5 godzin i w temperaturze 40°C przez 3 godziny. W trakcie uwadniania, odpowiednio co 0,5; 1; 2; 3; 4 i 5 oraz co 0,25; 0,5; 1; 1,5; 2 i 3 godziny oznaczano masę próbek oraz zawartość suchej substancji w jabłku zgodnie z PN-90/A-75104.

WYNIKI I DYSKUSJA

W czasie rehydracji suszonej tkanki roślinnej do materiału wnika woda, a przebieg tego procesu zależy od sposobu otrzymywania suszu oraz temperatury uwadniania. Przykładowe przebiegi kinetyki przyrostu masy wody (w temperaturze 4°C) przedstawiono na Rys. 1. Niezależnie od rodzaju suszu i temperatury, na początku wchłanianie wody przebiega intensywnie, zaś ulega spowolnieniu

w dalszych etapach procesu. Szczególnie jest to widoczne dla suszu sublimacyjnego, który w pierwszej godzinie rehydracji chłonie o około 20-30% więcej wody niż pozostałe susze. Jest to spowodowane większą porowatością tego suszu, dla którego objętość jednej kostki po suszeniu wynosiła średnio $0,59 \text{ cm}^3$, zaś suszu konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego – $0,31 \text{ cm}^3$. Pod koniec badanego czasu uwadniania (w zależności od temperatury - 3 lub 5 godzin) nie stwierdzono znaczących różnic w ilości wchłanianej wody przez produkt otrzymany metodą konwekcyjną i konwekcyjno-mikrofalową, zaś materiał wysuszony sublimacyjnie charakteryzował się nieco niższą zawartością wody. Wpływ temperatury jest zgodny z innymi publikowanymi badaniami [3, 11, 14]. Im wyższa temperatura, tym większy przyrost masy wody. W temperaturze 4°C po 3 godzinach rehydracji jabłko chłonie około $3,2 \text{ kg H}_2\text{O} \cdot (\text{kg pocz. s.s.})^{-1}$, a w temperaturze 25 i 40°C odpowiednio $3,6$ i $4,0 \text{ kg H}_2\text{O} \cdot (\text{kg pocz. s.s.})^{-1}$.



Rys. 1. Przyrost masy wody w jabłku w czasie rehydracji w temperaturze 4°C (linie ciągłe – model).

Fig. 1. Increase in mass of water in apple during rehydration at temperature 4°C (solid lines – predicted).

Do matematycznego opisu wyników eksperymentalnych za pomocą modelu Pelega zastosowano równanie (6). Wartości stałych K_1 i K_2 dla trzech suszy i trzech temperatur rehydracji przedstawiono w Tabeli 1. Wartość stałej K_1 zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury procesu i zależy od metody suszenia. Im więcej wody

chłonie tkanka w czasie rehydracji w odpowiednich temperaturach, tym mniejsze wartości osiąga stała K_1 . Stwierdzono, że wpływ temperatury na wartość K_2 nie jest znaczący i jednocześnie wartości średnie tej stałej nie różnią się statystycznie istotnie dla suszu konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego, natomiast K_2 dla suszu sublimacyjnego osiąga wartość wyższą (Tab. 1). Za pomocą K_2 można zdefiniować równowagową zawartość wody (równanie 2) [9]. Wartość ta, jako zawartość wody w materiale po nieskończone długim czasie uwadniania, nie powinna zależeć od temperatury procesu. Stałość K_2 potwierdzają również inne badania [10,11]. Stała K_2 może więc służyć jako parametr (stała sorpcyjna), charakteryzujący możliwości wchłaniania wody przez suszoną tkankę jabłka, a wartość tej stałej zależy od sposobu usuwania wody z materiału.

Tabela 1. Wartości stałych K_1 i K_2 w równaniu Pelega

Table 1. Values of constants K_1 and K_2 in Peleg's equation

Metoda suszenia	Temperatura [°C]	K_1	K_2	Średnia wartość K_2	P [%]	E_a [kJ·mol ⁻¹]
konwekcyjna	4	693	0,224	0,220	3,00	14,29 $r^2 = 0,9224$
	25	528	0,218		3,11	
	40	330	0,236		4,54	
konwekcyjno- mikrofalowa	4	842	0,236	0,252	5,92	11,35 $r^2 = 0,9998$
	25	560	0,204		6,38	
	40	477	0,213		5,71	
sublimacyjna	4	300	0,252	0,251	5,15	17,29 $r^2 = 0,9663$
	25	201	0,254		4,76	
	40	124	0,251		6,47	

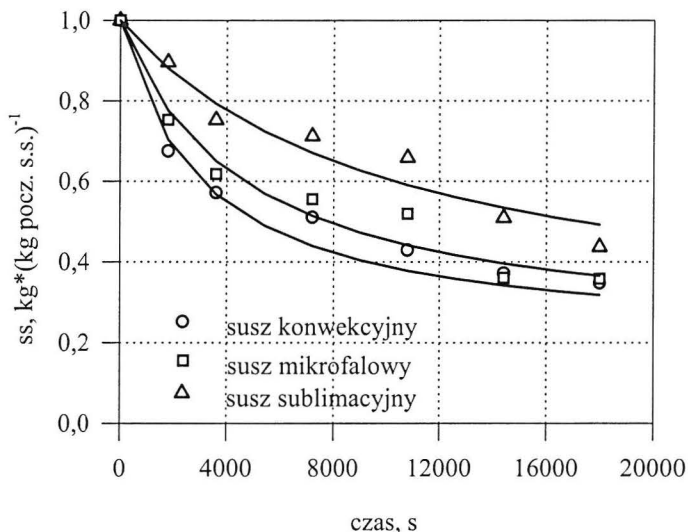
Na podstawie średniej wartości K_2 oraz wartości K_1 zaproponowano równania (równanie 5) służące do modelowania procesu wchłaniania wody w różnych temperaturach. Zgodność pomiędzy tymi równaniami i danymi doświadczalnymi oceniano na podstawie średniego odchylenia procentowego P (Tab. 1). Pomiedzy danymi eksperymentalnymi a przewidywanymi na podstawie modelu matematycznego nie ma znaczących statystycznie różnic, a zbieżność między nimi jest bardzo dobra ($P < 5\%$) lub dobra ($5\% < P < 10\%$).

W literaturze można znaleźć informacje na temat zależności współczynnika dyfuzji wody od temperatury, opisywanej równaniem Arrheniusa [5,6]. Wartość współczynnika dyfuzji zwiększa się ze wzrostem temperatury, odwrotnie niż wartość stałej K_1 . Aby empiryczny model Pelega mógł być wykorzystywany do analizy rzeczywistych procesów zachodzących w czasie wnikania wody do tkanki roślinnej, podjęto próbę określenia zależności pomiędzy odwrotnością stałej K_1 i temperatury za pomocą równania Arrheniusa, otrzymując współczynniki determinacji w zakresie 0,9224 – 0,9998. Na podstawie wartości współczynników kierunkowych prostych $\ln(1/K_1) = f(1/T)$ określono energię aktywacji, która wynosi dla suszu konwekcyjnego, konwekcyjno-mikrofalowego i sublimacyjnego odpowiednio 14,29; 11,35 i 17,29 kJ·mol⁻¹. Wartości te świadczą, że odwrotność K_1 dla suszu sublimacyjnego jest najbardziej wrażliwa na zmiany temperatury. Ponieważ jednostką odwrotności K_1 jest kg·(kg pocz. s.s.)⁻¹·s⁻¹, można zauważyć, że wartość energii aktywacji informuje o wpływie temperatury na szybkość absorpcji wody przez materiał. Wzrost temperatury rehydracji suszonej sublimacyjnie tkanki jabłka powoduje bardziej znaczące zwiększenie ilości wchłoniętej wody niż w przypadku pozostałych suszy.

W czasie rehydracji substancje rozpuszczalne dyfundują z próbek do otaczającej wody. Jest to spowodowane uszkodzeniem struktury wewnętrznej błon i ścian komórkowych, które w czasie rehydracji nie są w stanie odtworzyć swych właściwości, ulegają rozerwaniu, powodując przepływ składników roztworu cytoplazmatycznego do otaczającej wody [12].

Jednak nie tylko sam fakt usunięcia wody z tkanki roślinnej, ale również metoda suszenia wpływa na stopień uszkodzenia struktury wewnętrznej i w związku z tym na ilość rozpuszczalnych składników suchej substancji wypływających z materiału. Przykładowe zmiany zawartości suchej substancji w suszonym jabłku w czasie rehydracji w temperaturze 4°C przedstawia Rys. 2. Z jabłka suszonego sublimacyjnie w tych warunkach dyfunduje po 5 godzinach procesu około 45% suchej substancji, a w przypadku materiału suszonego pozostałymi metodami około 65% i nie stwierdzono istotnych różnic w ilości wymywanych składników pomiędzy tymi metodami. Omówione tendencje znajdują potwierdzenie podczas rehydracji w pozostałych temperaturach, przy czym im wyższa temperatura uwadniania, tym więcej rozpuszczalnych składników suchej substancji dyfunduje do otaczającego środowiska. Po 3 godzinach uwadniania w temperaturze 25°C zawartość suchej substancji w suszu sublimacyjnym zmniejsza się o 50%, a w pozostałych suszach

o około 65%. Odpowiednie wartości dla temperatury 40°C wynoszą około 60 i 70%. Wartości te świadczą, że w porównaniu z innymi badanymi metodami, suszenie sublimacyjne w mniejszym stopniu niszczy strukturę i charakter półprzepuszczalny błon komórkowych.



Rys. 2. Ubytek rozpuszczalnych składników suchej substancji z jabłka w czasie rehydracji w temperaturze 4°C (linie ciągłe – model).

Fig. 2. Soluble leakage from apple during rehydration at temperature 4°C (solid lines – predicted).

Do modelowania ubytku suchej substancji zastosowano równanie (8). Wartości stałych w zmodyfikowanym równaniu Pelega przedstawiono w Tabeli 2. Na podstawie analizy statystycznej (test *t*-Studenta) nie stwierdzono różnic pomiędzy wartościami średnimi stałej K_2' dla poszczególnych metod suszenia i jest ona niezależna od temperatury procesu. Może być traktowana jako parametr charakteryzujący zdolność do wypływu z materiału do środowiska (lub zatrzymywania w tkance) rozpuszczalnych składników suchej substancji. Bardzo dobrą i dobrą zgodność pomiędzy równaniami modelowymi, w których zastosowano średnią wartość K_2' , i danymi eksperymentalnymi stwierdzono dla wszystkich przeprowadzonych eksperymentów, za wyjątkiem rehydracji w temperaturze 40°C jabłka suszonego sublimacyjnie (Tab. 2). Tak więc dla suszu konwekcyjnego i konwekcyjno-mikrofalowego, na podstawie liniowej zależności $\ln(1/K_1') = f(1/T)$, można

wyznaczyć energię aktywacji, która wynosi odpowiednio 18,94 i 23,77 kJ·mol⁻¹. W tym przypadku wartość energii aktywacji informuje o wpływie temperatury na szybkość dyfuzji rozpuszczalnych składników suchej substancji. Wzrost temperatury rehydracji suszonego konwekcyjnie-mikrofalowo jabłka powoduje bardziej znaczące zwiększenie ilości dyfundujących składników suchej substancji w porównaniu z suszem konwekcyjnym.

Tabela 2. Wartości stałych K_1' i K_2' w zmodyfikowanym równaniu Pelega

Table 2. Values of constants K_1' and K_2' in modified Peleg's equation

Metoda suszenia	Temperatura °C	K_1'	K_2'	Średnia wartość K_2	P %	E_a kJ·mol ⁻¹
konwekcyjna	4	3814	1,344	1,255	6,81	18,94 $r^2=0,8410$
	25	2970	1,245		3,96	
	40	1404	1,230		9,46	
konwekcyjno- mikrofalowa	4	5777	1,294		9,31	23,77 $r^2=0,9988$
	25	2699	1,289		4,11	
	40	1772	1,257		6,55	
sublimacyjna	4	12832	1,143		6,37	-
	25	8728	1,267		2,90	
	40	2510	1,237		14,39	

PODSUMOWANIE

Do modelowania procesu rehydracji suszonej tkanki jabłka można wykorzystać zaproponowane przez Pelega równanie. Równania te mogą służyć do przewidywania ilości wchłoniętej wody i wypływających składników suchej substancji po określonym czasie i w określonej temperaturze. Stałe K_1 i K_2' , których wartości nie zależą od temperatury, mogą być traktowane jako parametry charakteryzujące właściwości sorpcyjne materiału lub zdolność do wypływu rozpuszczalnych składników suchej substancji. Wartości energii aktywacji pozwalają oszacować zmiany w ilości wchłanianej wody i wypływającej suchej substancji na skutek zmian temperatury.

STOSOWANE OZNACZENIA

E_a – energia aktywacji, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$

K_1 – stała Pelega 1, $(\text{kg pocz. s.s.})\cdot(\text{kg H}_2\text{O})^{-1}\cdot\text{s}$

K_2 – stała Pelega 2, $(\text{kg pocz. s.s.})\cdot(\text{kg H}_2\text{O})^{-1}$

K'_1 – stała 1 w zmodyfikowanym równaniu Pelega, $(\text{kg pocz. s.s.})\cdot(\text{kg s.s.})^{-1}\cdot\text{s}$

K'_2 – stała 2 w zmodyfikowanym równaniu Pelega, $(\text{kg pocz. s.s.})\cdot(\text{kg s.s.})^{-1}$

M – zawartość wody, $(\text{kg H}_2\text{O})\cdot(\text{kg s.s.})^{-1}$

P – średnie odchylenie procentowe

R – stała gazowa ($8,318 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

ss – zawartość suchej substancji, $\text{kg}\cdot(\text{kg pocz. s.s.})^{-1}$

T – temperatura absolutna, K

u – zawartość wody, $\text{kg}\cdot(\text{kg pocz. s.s.})^{-1}$

τ – czas, s

Indeksy dolne

e – równowagowy

o – początkowy

s – powierzchniowy

τ – w danym czasie

PIŚMIENNICTWO

1. **Abdel Kader Z.M.:** Study of some factors affecting water absorption by fava beans during soaking. *Food Chem.*, 53, 235-238, 1995.
2. **Abu-Ghannam N., McKenna, B.:** Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris L.*). *J. Food Sci.*, 62, 520-523, 1997.
3. **Bhattacharya S.:** Kinetics of hydration of raw and roasted corn semolina. *J. Food Engng*, 25, 21-30, 1995.
4. **Becker H.A.:** On the absorption of liquid water by the wheat kernel. *Cereal Chem.*, 37, 309-323, 1960.
5. **Engels C., Hendrickx M., Tobback P.:** Limited multilayer desorption of brown, parboiled rice. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 22, 219-223, 1987.
6. **Hsu K.H., Kim C.J., Wilson L.A.:** Factors affecting water uptake of soybeans during soaking. *Cereal Chem.*, 60, 208-211, 1983.
7. **Mazza G., Le Maguer M.:** Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. *J. Food Technol.*, 18, 113-123, 1980.
8. **Oliveira F.A.R., Ilincanu L.:** Rehydration of dried plant tissues: Basic concepts and mathematical modelling. *Processing Foods* (eds. F.A.R. Oliveira & J.C. Oliveira). CRC Press LLC, 201-227, 1999.

9. **Peleg M.:** An empirical model for the description of moisture sorption curves. *J. Food Sci.*, 53, 1216-1217, 1219, 1988.
10. **Sopade P.A., Ajisegiri E.S., Badau M.H.:** The use of Peleg's equation to model water absorption in some cereal grains during soaking. *J. Food Engng*, 15, 269-283, 1992.
11. **Sopade P.A., Obekpa J.A.:** Modelling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using Peleg's equation. *J. Food Sci.*, 55, 1084-1087, 1990.
12. **Willis C.A., Teixeira A.A.:** Controlled reduction of water activity in celery: Effect of membrane integrity and biophysical properties. *J. Food Sci.*, 53, 111-116, 1988.
13. **Witrowa-Rajchert D.:** Rehydracja jako wskaźnik zmian zachodzących w tkance roślinnej w czasie suszenia. Praca habilitacyjna. Wydawnictwo „Rozwój SGGW”, Warszawa, 1999.
14. **Witrowa-Rajchert D., Marcjasz E.:** Wpływ metody suszenia na przebieg rehydracji marchwi. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 25, 139-146, 1999.

MATHEMATICAL MODELLING OF DRIED APPLE TISSUE REHYDRATION PROCESS

D. Witrowa-Rajchert

Department of Food Engineering and Process Management, Warsaw Agricultural University
ul. Nowoursynowska 159c, 02-776 Warszawa

Abstract. Water absorption and soluble leakage during rehydration of convective, microwave-convective and freeze dried apple at 4, 25 and 40°C was studied using Peleg's equation and its modification. The equations gave a reasonable fit to experimental data for almost all experiments, but could not be used for mathematical description of soluble leakage from freeze dried material during rehydration at 40°C. Peleg constants K_2 and K_2' , characterised sorption properties and ability to soluble leakage, were unaffected by temperature of rehydration. Temperature dependence of the reciprocal of the constants K_1 and K_1' was determined using an Arrhenius equation. Activation energy was calculated, what could give an indication of the temperature sensitivity of the sorption characteristics and ability to soluble leakage of dried apple.

Keyword: Peleg's equation, activation energy, water absorption, soluble leakage.