

## **OPTYMALIZACJA STATYCZNA PROCESU ODWADNIANIA OSMOTYCZNEGO I PRZECHOWYWANIA TRUSKAWEK**

Przemysław Bartosik, Leon Kukielka

*Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, Politechnika Koszalińska*

Agnieszka Plawgo

*Katedra Biochemii i Biotechnologii, Politechnika Koszalińska*

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki badań dotyczące określenia wpływu parametrów odwadniania osmotycznego na następujące cechy truskawek: zawartość ekstraktu, kwasowość ogólną, wielkość wycieku rozmrażalniczego oraz masę suchej substancji. Proces usuwania wody prowadzony był w roztworach sacharozy o stężeniach 30, 47,5 i 65% przez 6, 15 i 24 h. Następnie owoce zostały zamrożone i przechowywane przez 3 miesiące. Wyznaczono modele cech produktów w funkcji czasu przechowania zamrażalniczego oraz zbiór rozwiązań polioptymalnych (niezdominowanych) ze względu na różne kryteria optymalizacji.

**Słowa kluczowe:** odwadnianie osmotyczne, truskawki, optymalizacja

### **Wprowadzenie**

Odwadnianie osmotyczne jest jednym ze sposobów usuwania wody, który umożliwia opracowanie technologii w dużym stopniu zachowujących wartości odżywcze i sensoryczne utrwalanej żywności [Kowalska, Lenart 2005].

W ostatnich latach odwadnianiu osmotycznemu poświęcono wiele uwagi ze względu na to, że obniżona zawartość wody wpływa na przedłużenie trwałości produktu, zaś większa koncentracja soku komórkowego i obecność substancji osmotycznej poprawiają jego jakość i umożliwiają wykorzystanie do dalszej obróbki [Lazarides i in. 1995; Jarczyk i in. 1994].

Owoce, które uległy uprzedniemu odwodnieniu osmotycznemu ze względu na skład chemiczny i cechy sensoryczne mogą być poddawane mrożeniu. W procesie odwadniania osmotycznego zastosowanie znajdują zarówno owoce świeże jak i mrożone [Jarczyk i in. 1994]. Wprowadzenie określonych warunków odwadniania osmotycznego z udziałem innych sposobów utrwalania np. zamrażania stwarza możliwość wykreowania nowych atrakcyjnych dla konsumentów produktów [Kowalska, Lenart 2005].

Uzyskane w ten sposób produkty można wykorzystywać jako bakalie przy wypieku ciast cukierniczych oraz do produkcji jogurtów, wyrobów mlecznych i lodów [Matusek, Meresz 2002; Gruda, Postolski 1999].

Poszukuje się jednak takich modyfikacji procesu, aby uzyskać jak najlepszy produkt końcowy przy zredukowaniu kosztów [Kamińska, Lewicki 2005; Khin i in. 2005; Kowalska, Lenart 2003].

## **Cel i zakres pracy**

Celem pracy było zbadanie wpływu parametrów odwadniania osmotycznego (czas procesu i stężenie roztworu osmotycznego) truskawek świeżych na następujące cechy: zawartość ekstraktu, kwasowość ogólną, wielkość wycieku rozmrażalniczego oraz masę suchej substancji. Następnie na tej podstawie wyznaczenie modeli cech produktów w funkcji czasu przechowania zamrażalniczego oraz wyznaczenie zbioru rozwiązań polioptymalnych (niezdominowanych) ze względu na różne kryteria optymalizacji.

W zakresie pracy ujęto określenie nastaw procesu, przy których uzyskać można produkt najwyższej jakości przy jednoczesnej minimalizacji kosztów.

## **Metodyka**

Badania prowadzone były na podstawie 3-poziomowego planu eksperymentu. Materiałem badawczym były truskawki odmiany Polka. Surowiec w całości odwadniano w roztworach sacharozy o stężeniach 30, 47,5 i 65%, przy zachowaniu stosunku masy surowca do masy roztworu osmotycznego 1:4. Proces prowadzony był w temperaturze 20°C w czasie 6, 15 i 24 godzin. W zależności od stężeń roztworów i czasu trwania procesu uzyskano 9 kombinacji próbek do badań. Owoce po odwodnieniu odsączono, zapakowano do woreczków foliowych i poddano zamrażaniu. Co 6 tygodni próbki z każdej kombinacji rozmrażano przez 2h w powietrzu i po odsączeniu oznaczano: masę suchej substancji (przy użyciu wagi-suszarki Radwag WPE 30s), zawartość ekstraktu ogólnego metodą refraktometryczną przy użyciu refraktometru PZO RL 3 (wg. PN-90/A-75101.02/AZ1:2002), kwasowość ogólną metodą miareczkowania w obecności wskaźnika (wg PN-90/A-75101.04/AZ1:2002) oraz wielkość wycieku rozmrażalniczego. Wszystkie oznaczenia wykonywane były 3-krotnie.

Wyniki badań poddano analizie w programie Experiment Planner PL wersja 1.0. Do optymalizacji wykorzystany został program Matlab 7.0.

## **Wyniki badań i ich analiza**

Tabela 1 przedstawia uzyskane wyniki badań doświadczalnych.

Optymalizacja statyczna...

Tabela. 1. Wyniki badań  
Table. 1. Research findings

Nr doświadczenia	Ekstrakt $k_1$ [%]	Kwasowość $k_2$ [-]	Sucha masa $k_3$ [%]	Wyciek $k_4$ [%]	Czas odw. $x_1$ [h]	Stężenie $x_2$ [%]	Czas przechowywania $x_3$ [tyg.]	$x_1^{(}$	$x_2^{(}$	$x_3^{(}$
1	20,34	0,742	22,6	3,76	24	0,65	12	1	1	1
2	16,76	0,512	25,4	10,65	24	0,65	6	1	1	0
3	18,33	0,797	22,5	34,75	24	0,65	0	1	1	-1
4	18,13	0,624	21,3	5,03	24	0,475	12	1	0	1
5	13,41	0,648	20,6	7,08	24	0,475	6	1	0	0
6	15,45	0,618	20,2	26,53	24	0,475	0	1	0	-1
7	15,32	0,569	19	6,62	24	0,3	12	1	-1	1
8	11,76	0,64	17,8	6,06	24	0,3	6	1	-1	0
9	11,82	0,506	17,1	30,18	24	0,3	0	1	-1	-1
10	17,13	0,792	20,5	7,61	15	0,65	12	0	1	1
11	12,56	0,76	19,6	6,2	15	0,65	6	0	1	0
12	14,75	0,67	19	22,18	15	0,65	0	0	1	-1
13	15,41	0,728	18,8	8,46	15	0,475	12	0	0	1
14	10,76	0,723	17,9	6,04	15	0,475	6	0	0	0
15	12,87	0,66	17,4	21,02	15	0,475	0	0	0	-1
16	13,68	0,663	17	9,3	15	0,3	12	0	-1	1
17	8,95	0,686	16,2	5,88	15	0,3	6	0	-1	0
18	10,99	0,651	15,7	19,85	15	0,3	0	0	-1	-1
19	14,32	0,768	19,5	10,02	6	0,65	12	-1	1	1
20	5,76	0,832	15,3	5,84	6	0,65	6	-1	1	0
21	12,82	0,646	16,8	17,19	6	0,65	0	-1	1	-1
22	12,68	0,833	16,1	11,9	6	0,475	12	-1	0	1
23	8,1	0,798	15,2	5,01	6	0,475	6	-1	0	0
24	10,29	0,705	14,7	15,52	6	0,475	0	-1	0	-1
25	11,85	0,64	14,6	5,68	6	0,3	12	-1	-1	1
26	7,25	0,813	14,3	8,26	6	0,3	6	-1	-1	0
27	7,81	0,678	12,8	11,91	6	0,3	0	-1	-1	-1

Wyniki badań opracowano statystycznie i otrzymano równania regresji cech produktu w funkcji zmiennych wejściowych, w postaci wielomianów drugiego stopnia z interakcjami:

$$k_1 = 5,1459 + 0,17478 \cdot x_1 + 7,2095 \cdot x_2 - 0,72759 \cdot x_3 + 0,23556 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,010228 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,43937 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,093968 \cdot x_3^2 + 0,024339 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (1)$$

$$k_2 = 0,95541 - 0,021356 \cdot x_1 - 0,46376 \cdot x_2 - 0,018203 \cdot x_3 + 0,034466 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,001393 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,087953 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,00079439 \cdot x_3^2 - 0,0041131 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (2)$$

$$k_3 = 11,882 + 0,065397 \cdot x_1 + 2,1714 \cdot x_2 - 0,030159 \cdot x_3 + 0,48571 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ + 0,003836 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,1746 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0055556 \cdot x_3^2 - 0,0084656 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (3)$$

$$k_4 = 11,878 + 0,39849 \cdot x_1 - 0,057143 \cdot x_2 - 2,4538 \cdot x_3 + 0,44762 \cdot x_1 \cdot x_2 - \\ - 0,069161 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,52444 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,24155 \cdot x_3^2 - 0,028783 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (4)$$

W celu przeprowadzenia procesu optymalizacji należało ustalić zmienne decyzyjne [Tarnowski 2001]. W przypadku optymalizacji procesu odwadniania osmotycznego truskawek zmiennymi decyzyjnymi były czynniki wejściowe z równań regresji: czas odwadniania  $x_1$ , stężenie roztworu  $x_2$  oraz czas przechowywania  $x_3$ . Na każdą ze zmiennych zostały nałożone ograniczenia wynikające bezpośrednio z ich zmian w trakcie badań eksperymentalnych, a więc i z zakresu obowiązywania opracowanych równań regresji.

$$x_1 \in \langle 6; 24 \rangle \text{ [h]} \quad (5)$$

$$x_2 \in \langle 0,3; 0,65 \rangle \text{ [-]} \quad (6)$$

$$x_3 \in \langle 0; 12 \rangle \text{ [tyg]} \quad (7)$$

Proces optymalizacji podzielono na dwa etapy [Plawgo i in. 2009; 2009a]. W początkowym etapie uwzględniano jedynie kryteria związane z jakością produktu. Pierwszym z kryteriów jakości była zawartość ekstraktu  $k_1$ . Przyjęto iż optymalna wartość tego kryterium powinna być jak najwyższa [Błoński i in. 1986]. Drugim kryterium była kwasowość produktu  $k_2$ , przyjęto iż powinna być ona jak najmniejsza [Matusek i Meresz 2002; Puksza 2003]. Trzecim z kryteriów była masa suchej substancji w produkcie  $k_3$ . Związana jest ona z ilością wody w produkcie, co bezpośrednio przekłada się na jego trwałość. Zatem  $k_3$  powinno być jak największe [Błoński i in. 1986]. Ostatnim z kryteriów jakości była wielkość wycieku rozmrażalniczego  $k_4$ . Wyciek rozmrażalniczy jest bezpośrednią informacją o stopniu zniszczenia struktur komórkowych produktu po rozmrożeniu, i z tego powodu powinien być on minimalny [Morejra i Sereno 2003; Palich i Puksza 2001].

Minimalizowana funkcja celu dla pierwszego etapu przyjmuje postać:

$$f_{\text{jakość}} = \sum_{i=1}^4 w_i \cdot f_{\text{cel}_i} \rightarrow \min, \quad (8)$$

gdzie:

$$f_{\text{cel}_i} = \frac{k_i \text{ max} - k_i(x_1, x_2, x_3)}{k_i \text{ max} - k_i \text{ min}}, i=1, 3; \quad f_{\text{cel}_i} = \frac{k_i(x_1, x_2, x_3) - k_i \text{ min}}{k_i \text{ max} - k_i \text{ min}}, i=2, 4, \quad (9)$$

oraz:

$$\sum_{i=1}^4 w_i = 1. \quad (10)$$

W drugim etapie optymalizacji dodano kryteria związane z kosztami produkcji i przechowywania produktu. Jako pierwsze kryterium należy wymienić koszty związane

z czasem odwadniania osmotycznego. Powinien być jak najkrótszy, jest on bowiem bezpośrednio związany z czasem wytworzenia produktu. Drugie kryterium dotyczyło kosztów samego roztworu osmotycznego, które powinny być jak najmniejsze. Trzecim był zysk związany z możliwością długiego przechowywania produktu i powinien być on jak największy. Nie wprowadzone zostały żadne oznaczenia symboliczne tych kryteriów, ponieważ są one bezpośrednio powiązane z odpowiednimi pojedynczymi zmiennymi decyzyjnymi. Funkcja celu dla drugiego etapu przyjmuje postać:

$$f_{cel} = w_{og} \cdot f_{jakość} + (1 - w_{og}) \cdot f_{koszty} \quad (11)$$

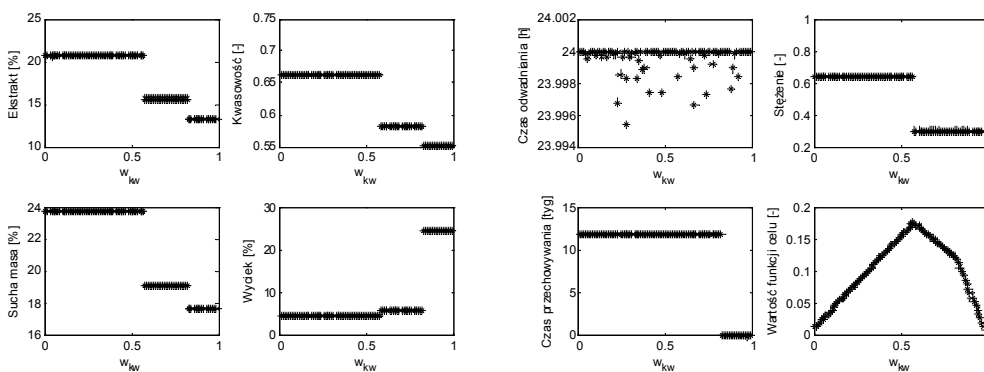
$$f_{koszty} = \sum_{i=5}^7 w_i \cdot f_{cel\_i} \quad (12)$$

$$f_{cel\_i} = \frac{x_i - x_i \min}{x_i \max - x_i \min}, i=5, 6; f_{cel\_7} = \frac{x_7 \max - x_7}{x_7 \max - x_7 \min} \quad (13)$$

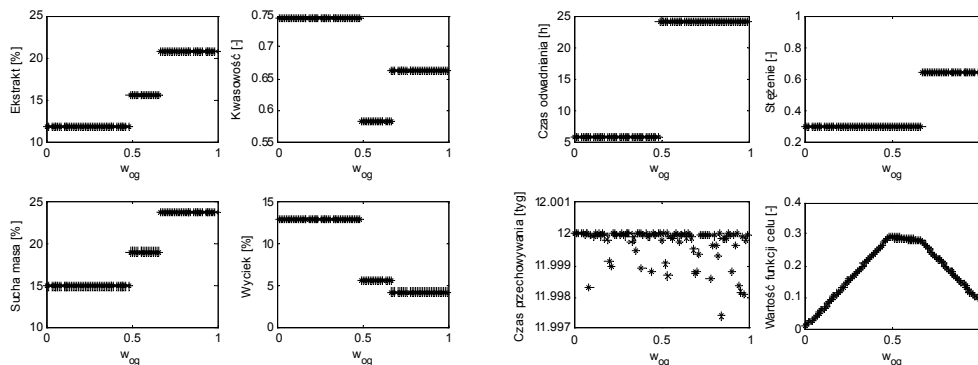
$$\sum_{i=5}^7 w_i = 1 \text{ i } w_{og} \in \langle 0; 1 \rangle \quad (14)$$

Rysunek 1 przedstawia wartości kryteriów i zmiennych decyzyjnych dla pierwszego etapu polioptymalizacji w funkcji wagi kryterium kwasowości produktu.

Wagi dla trzech pozostałych kryteriów były dzielone w stosunku 1/3 dla każdej z nich. Rysunek 2 przedstawia wyniki drugiego etapu polioptymalizacji w funkcji wagi ogólnej. Wagi poszczególnych kryteriów były dzielone po równo, tzn. wagi kryteriów związanych z jakością produktu miały wartość 1/4, natomiast wagi związane z kosztami 1/3.



Rys. 1. Wyniki pierwszego etapu optymalizacji  
 Fig. 1. Results of the first stage of optimization process



Rys. 2. Wyniki drugiego etapu optymalizacji  
 Fig. 2. Results of the second stage of optimization process

## Wnioski

Przedstawiony w pracy algorytm polioptymalizacji oraz aplikacja w programie Matlab umożliwiają wyznaczenie zbioru niezdominowanych wartości zmiennych decyzyjnych w badanym procesie odwadniania osmotycznego. Jednakże to od decydenta zależy, które rozwiązanie wybierze, a przedstawiony schemat postępowania należy traktować jedynie jako narzędzie wspomagające proces podejmowania decyzji.

Dla przyjętego skalarnego kryterium optymalizacji pokazana została jawna zależność pomiędzy jakością, a kosztami produktu.

## Bibliografia

- Kowalska H., Lenart A.** 2005. Zmiany struktury tkanki roślinnej wywołane odwadnianiem osmotycznym. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 9(69), s. 187-195.
- Lazarides H. N., Katsanidis E., Nicolaidis A.** 1995. Mass transfer kinetics during osmotic pre-concentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering*, Nr 25, s. 151-165.
- Kamińska A., Lewicki P.** 2005. Metoda dehydrofreezing (D – F) – znaczenie i przyszłość. *Przemysł Spożywczy*, Nr 9, s. 12-15.
- Khin M., Zhou W., Perera C.** 2005. Development in the combined treatment of coating and osmotic dehydration of food – a review. *International Journal of Food Engineering*, Nr 1, s. 15-27.
- Gruda Z., Postolski J.** 1999. Zamrażanie żywności. WNT, Warszawa. ISBN 83-204-2332-5.
- Jarczyk A., Witter M., Matuska D.** 1994. Charakterystyka składu chemicznego i tekstury wybranych owoców odwodnionych osmotycznie i utrwalonych różnymi metodami. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny*, Nr 9, s. 22-24.
- Błoński Z., Jędrzejczak A., Wąsowicz L.** 1986. Ubytki naturalne zamrożonych owoców i warzyw powstające podczas ich przechowywania. *Chłodnictwo XXI*, 5, s. 19-22.
- Pukszta T.** 2003. Zmiany kwasowości mrożonych owoców podczas przechowywania. *Chłodnictwo XXXVIII*, 2, s. 34-35.

- Palich P., Puksza T.** 2001. Zmiany wielkości wycieku rozmrażalniczego owoców mrożonych. *Chłodnictwo* XXXVI, 1. s. 42-44.
- Matusek A., Meresz P.** 2002. Modelling of sugar transfer during osmotic dehydration of carrots. *Periodica Polytechnica Ser. Chem. Eng.*, 1–2. s. 83-92.
- Moreira R., Sereno A.** 2003. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non – static conditions. *Journal of Food Engineering*, 57. s. 25-31.
- Kowalska H., Lenart A.** 2003. Zmiany współczynnika dyfuzji wody i substancji rozpuszczonych w owocach i warzywach odwadnianych osmotycznie, *Materiały X Sympozjum Suszarnictwa - pełne teksty wystąpień*, red. Pakowski Z., Politechnika Łódzka, Łódź. CD-ROM. s. 557-564.
- Tarnowski W.** 2001. Symulacja i optymalizacja w Matlab'ie. WSM Gdynia, ISBN 8387438812.
- Plawgo A., Szparaga L., Bartosik P., Kubiak M. S.** 2009. Static optimization of Osmotic dehydration and storage process of plums, *Food technology operations New vistas*, Wrocław, s. 233-240.
- Plawgo A., Szparaga L., Bartosik P.** 2009a. Optymalizacja statyczna procesu odwadniania osmotycznego i przechowywania śliwek. *Poliptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania*. Mielno. Tom VII. s. 97-104.

## STATIC OPTIMIZATION OF OSMOTIC DEHYDRATION AND STORAGE PROCESS OF STRAWBERRIES

**Abstract.** The paper presents the results of the research concerning the influence of osmotic dehydration parameters on the following properties of strawberries: extract content, general acidity, volume of thawing spill and mass of dry matter. The water removal process was carried out in sucrose solutions (concentration 30, 47,5 and 65%) for 6, 15 and 24 hours. Then, the fruit were frozen and stored for 3 months. The experimental models of products properties in storage time function and the set of poly-optimal (undominated) results in view of various optimization criteria were determined.

**Key words:** osmotic dehydration, strawberries, optimization

**Adres do korespondencji:**

Przemysław Bartosik; e-mail: bartosikprzemyslaw@o2.pl  
Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów  
Politechnika Koszalińska  
ul. Raclawicka 15-17  
75-620 Koszalin