

ANALIZA SPRĘŻYSTOŚCI SUSZU OWOCOWEGO Z AVOCADO

Bogdan Stępień, Roman Stopa, Piotr Komarnicki, Bartosz Jaźwiec
Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Analizowano sprężystość suszonego owocu avocado odwadnianego trzema metodami: konwekcyjnie (SK), sublimacyjnie (SS) oraz techniką kombinowaną: mikrofalową w warunkach obniżonego ciśnienia z konwekcyjnym podsuszaniem (SMK). Stwierdzono większą przydatność analizy sprężystości w oparciu o znormalizowane funkcje relaksacji naprężeń niż na podstawie reologicznego modelu Maxwella. Kombinowana metoda suszenia pozwala uzyskać susz o najwyższej sprężystości. Warunki prowadzenia suszenia poszczególnymi technikami istotnie zmieniają sprężystość produktu. Zmiany temperatury i prędkości przepływu czynnika suszącego podczas suszenia konwekcyjnego oraz sposobu dostarczania ciepła podczas suszenia sublimacyjnego wpływają na sprężystość suszonego avocado.

Słowa kluczowe: suszenie, sprężystość, avocado, model reologiczny

Wprowadzenie i cel badań

Avocado jest owocem o dużej kaloryczności dochodzącej do $160 \text{ kcal} \cdot (100\text{g})^{-1}$ i wysokiej zawartości tłuszczu, do $15,3 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$. Posiadanie błonnika, witamin i substancji mineralnych powoduje, że nie powinien zniknąć z menu człowieka nawet będącego na diecie. Posiada zdolność obniżania poziomu „złego” cholesterolu we krwi, chroni przed udarem, korzystnie wpływa na wzrok, a także przypisuje mu się działanie antynowotworowe.

Akceptacja produktu spożywczego przez konsumenta następuje w oparciu o takie cechy materiału jak: tekstura, smak czy wygląd. Tekstura, która może być oceniana ustnie, wizualnie lub manualnie pozwala określić twardość, spoistość, kleistość oraz sprężystość produktu [Smewing 2000]. Można ją określić przy pomocy subiektywnych technik sensorycznych lub obiektywnych analiz instrumentalnych. Wyniki badań instrumentalnych najczęściej nie oddają w pełni wrażeń konsumenta. Mają jednak tę istotną przewagę nad analizami sensorycznymi, że są mniej czasochłonne, powtarzalne i znacznie tańsze. Pojawia się problem dotyczący możliwości wykorzystania wyników badań instrumentalnych do wstępnej selekcji produktów przeznaczonych do analizy sensorycznej.

Proces relaksacji naprężeń jest wykorzystywany do wyznaczania właściwości lepko-sprężystych wielu surowców rolniczych [Chen 1986; Gołacki 1998]. Krzywe zmiany naprężeń w czasie testu są najczęściej aproksymowane równaniem wykładniczym, które jest rozwiązaniem modelu Maxwella [Gołacki, Stropek 2001; Figiel 2008]. Dokładność aproksymacji najczęściej uzyskuje się dzięki zwiększeniu liczby składników równania opisującego przebieg procesu relaksacji naprężeń. Najczęściej zadawalającą dokładność aproksymacji uzyskuje się przy liczbie składników równania wynoszącej 4-6. Powoduje to jednak trudności przy porównywaniu krzywych uzyskanych dla różnych materiałów, ponieważ stałe mogą zmieniać się niezależnie. Stropek i Gołacki [2006] zaproponowali procedurę, która prowadzi do uzyskania wskaźników posiadających interpretację fizyczną pozwalającą jednoznacznie ocenić sprężystość różnych materiałów.

Celem pracy była analiza sprężystości suszonego owocu avocado, zmieniającej się pod wpływem różnych technik suszenia oraz różnych warunków prowadzenia procesu.

Metodyka badań

Z owocu avocado wycinano walcowe próbki o wysokości 10 mm i średnicy równej 20 mm. Doboru wysokości i średnicy próbek dokonano empirycznie dążąc do uzyskania suszy o możliwie niewielkim skurczu suszarniczym i ograniczonym efekcie „puffingu” dla suszy uzyskanych metodą kombinowaną: mikrofalowo-konwekcyjną. Do właściwego przygotowania próbek wykorzystano wykrojniki własnej konstrukcji, dzięki którym uzyskano dwie równoległe do siebie powierzchnie walców.

Zastosowano trzy techniki suszenia: suszenie konwekcyjne SK (temperatura czynnika suszącego 40°C i prędkość przepływu powietrza 0,5 m·s⁻¹ oraz odpowiednio 70°C/1,5 m·s⁻¹), sublimacyjne SS (szybkość zamrażania 1°C·min⁻¹, ciśnienie w komorze suszenia 100 Pa, temperatura płyty grzejnej 20°C, kontaktowy lub radiacyjny sposób dostarczania ciepła). Trzecia metoda odwadniania była metodą kombinowaną (SMK) polegającą na wstępnym podsuszaniu konwekcyjnym (40°C/0,5 m·s⁻¹) przez 2 godziny, a następnie dosuszaniu mikrofalowym w warunkach obniżonego ciśnienia. Zastosowano trzy poziomy mocy mikrofal wynoszące 240, 360 i 480W, amplitudowe sterowanie magnetronów, ciśnienie w komorze suszenia w zakresie 4-10 kPa. Zastosowanie kombinowanej metody suszenia, a nie standardowej z wykorzystaniem nagrzewania mikrofalami wynikało z wysokiej zawartości tłuszczu w avocado, co powodowało sklejanie się próbek w trakcie suszenia mikrofalowego. Wstępne podsuszanie rozwiązało ten problem. Metoda mikrofalowo-konwekcyjna jest często stosowana do odwadniania surowców rolniczych [Sanga i in. 2002; Piotrowski i in. 2004; Alibas 2007].

Testy relaksacji naprężeń wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566. Poziom naprężenia, od którego rozpoczynano rejestrację przebiegu procesu ustalono w wysokości odpowiadającej naprężeniu pojawiającemu się w materiale odkształconym o 20% jego wysokości początkowej. Pierwsza faza procesu, związana z odkształcaniem materiału, została przeprowadzona z prędkością wynoszącą 10 mm·min⁻¹. Badania wykonano w 5 powtórzeniach. Wieloczynnikowa analiza wariancji posłużyła do określenia istotności wpływu poszczególnych zmiennych na wartości analizowanych wskaźników.

Analiza wyników

Sprężystość suszonego avocado analizowano w oparciu o wartości modułów sprężystości obliczonych dla elementów sprężystych reologicznego modelu Maxwella. Równanie wykładnicze będące rozwiązaniem tego modelu przyjmuje postać:

$$F(\tau) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot e^{-B_i \tau} \quad (1)$$

gdzie:

$F(\tau)$ – siła relaksacji po czasie τ [N],

A_i, B_i – stałe równania wykładniczego.

Satysfakcjonującą dokładność aproksymacji uzyskano stosując 5-elementowy model Maxwella. Stosunek naprężenia wywołanego w i -tym elemencie sprężystym modelu reologicznego do wartości odkształcenia względnego pozwolił wyznaczyć wartości każdego z trzech modułów sprężystości [Stępień 2008], które przedstawiono na rysunkach 1-3.

$$E_i = \frac{\delta_i}{\varepsilon} \quad (2)$$

gdzie:

E_i – moduł sprężystości i -tego elementu sprężystego modelu [kPa],

σ_i – naprężenie w i -tym elemencie sprężystym modelu [kPa],

ε – odkształcenie względne [-].

Wyniki analizy statystycznej wpływu metody suszenia na wartości modułów sprężystości oraz na wartości analizowanych wskaźników przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki analizy statystycznej wpływu metody suszenia na wartości badanych parametrów
Table 1. Results of the statistical analysis of drying method influence on the values of the examined parameters

Zmienna	a [-]	b [-]	E_1 kPa	E_2 kPa	E_0 kPa
Metoda suszenia	0,044667	0,001698	0,000000	0,000000	0,000671

Źródło: obliczenia własne

Wartości każdego parametru w sposób istotny zależą od techniki odwadniania. Różne metody suszenia charakteryzują się odmiennymi mechanizmami usuwania wody z odwadnianych materiałów. Przez to następują zmiany w strukturze wewnętrznej materiału, szczególnie w obrębie ścian komórkowych, które stanowią szkielet konstrukcji. Im większe zmiany powstają w obrębie ścian komórkowych, tym produkt traci więcej sprężystości w stosunku do surowca. Potwierdzają tę tezę badania Mayora i in. [2007], którzy odwadniali osmotycznie dynię zwyczajną.

Wyniki analizy statystycznej wpływu warunków prowadzenia suszenia oraz zastosowania blanszowania jako obróbki wstępnej na wartości modułów sprężystości oraz na wartości analizowanych wskaźników przedstawiono w tabeli 2.

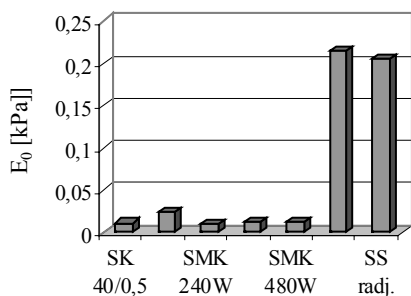
Tabela 2. Wyniki analizy statystycznej wpływu warunków prowadzenia suszenia oraz obróbki wstępnej na wartości badanych parametrów

Table 2. Results of the statistical analysis of carrying out drying and pretreatment on the values of the examined parameters

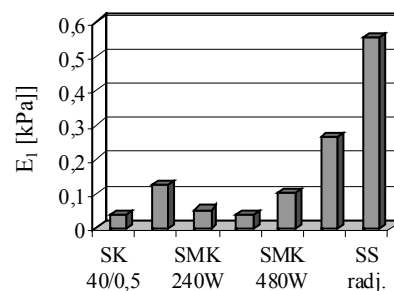
Metoda suszenia	Zmienna	a [-]	b [-]	E_1 [Kpa]	E_2 [Kpa]	E_0 [Kpa]
SK	Temp./prędkość	0,000245	0,001242	0,000024	0,000066	0,000002
SMK	Moc mikrofal	0,4434	0,01817	0,04618	0,0388	0,00081
SS	Sposób dostarczania ciepła	0,0476	0,04942	0,000215	0,000391	0,19697

Źródło: obliczenia własne

Jedynie sposób dostarczania ciepła w trakcie suszenia sublimacyjnego nie miał znaczenia na uzyskiwane wartości E_0 (rys. 1). Avocado suszone sublimacyjnie charakteryzuje się wysokimi wartościami modułów sprężystości E_0 i E_1 , co świadczy o zachowaniu sprężystości uzyskanego produktu. Badania Krokidy i in. [1999] wskazują, że liofilizowane banany, jabłka, ziemniaki i marchew tracą swoją sprężystość i stają się bardziej plastyczne. Przy radiacyjnym sposobie dostarczania ciepła rejestrowano istotnie wyższe wartości modułów E_1 i E_2 w stosunku do kontaktowego sposobu dostarczania ciepła (rys. 2 i 3). Wzrost temperatury oraz prędkości przepływu czynnika suszącego podczas suszenia konwekcyjnego powodował wzrost wartości wszystkich modułów sprężystości modelu reologicznego.



Źródło: obliczenia własne



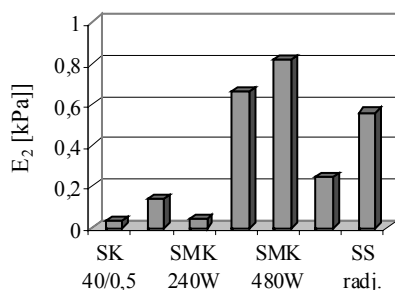
Źródło: obliczenia własne

Rys. 1. Wartości modułu sprężystości E_0 dla suszonego avocado

Fig. 1. Values of the elasticity module E_0 for dried avocado

Rys. 2. Wartości modułu sprężystości E_1 dla suszonego avocado

Fig. 2. Values of the elasticity module E_1 for dried avocado



Źródło: obliczenia własne

Rys. 3. Wartości modułu sprężystości E_2 dla suszonego avocado
 Fig. 3. Values of the elasticity module E_2 for dried avocado

Lewicki i Jakubczyk [2004] dowiedli, że dopiero zwiększenie temperatury czynnika suszącego do poziomu 80°C powoduje istotne obniżenie sprężystości suszonych jabłek. Moc mikrofal miała statystycznie istotny wpływ na wartości wszystkich modułów sprężystości. Największe różnice zaobserwowano dla modułu E_2 (rys. 3). Nie stwierdzono jednego i jednoznacznego trendu dotyczącego wpływu wzrostu mocy mikrofal w trakcie suszenia mikrofalowego w warunkach obniżonego ciśnienia na wartości modułów sprężystości modelu reologicznego.

Analiza wszystkich modułów sprężystości pozwala dostrzec pewne zależności w obrębie każdego z nich. Jednakże wnioskowanie o sprężystości całego

modelu jest utrudnione, ponieważ wartości poszczególnych modułów najczęściej zmieniają się niezależnie. Stąd przydatność takiej analizy przy ocenie tekstury produktów jest bardzo ograniczona.

Procedurę pozwalającą porównywać przebiegi krzywych relaksacji naprężeń dla różnych materiałów zaproponowali Stropiek i Gołacki [2006]. W pierwszym kroku należy dokonać normalizacji krzywych relaksacji naprężeń poprzez wprowadzenie współczynnika:

$$Y(\tau) = \frac{F_0 - F(\tau)}{F_0} \quad (3)$$

gdzie:

- $Y(\tau)$ – znormalizowana funkcja relaksacji naprężeń [-],
- F_0 – początkowa siła relaksacji [N],
- $F(\tau)$ – siła relaksacji po czasie τ [N].

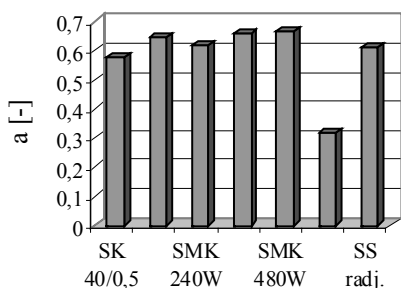
Przebieg zmian znormalizowanej funkcji relaksacji $Y(\tau)$ w czasie testu można opisać następującym równaniem:

$$Y(\tau) = \frac{a \cdot b \cdot \tau}{1 + b \cdot \tau} \quad (4)$$

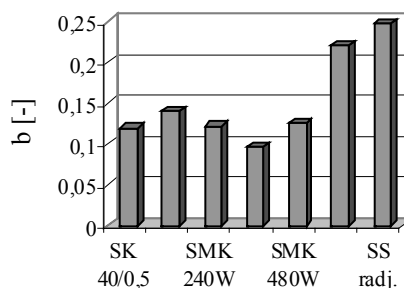
Stałe a i b posiadają precyzyjną interpretację fizyczną. Wartość a określa poziom, do którego zanikają naprężenia podczas relaksacji. Dla ciał rzeczywistych wartość stałej mieści się w zakresie $0 < a < 1$. Dla ciał, które charakteryzują się większą sprężystością, osiągnięte są niższe wartości stałej a . Jeśli wartość $a=0$, mamy do czynienia z ciałem idealnie sprężystym. Stała b informuje o prędkości zaniku naprężeń w trakcie testu. Jeśli $b=0$, relaksacja

naprężeń nie występuje, ponieważ spadek naprężenia w trakcie testu do poziomu $a/2$ wymaga nieskończenie długiego czasu. Wówczas badane ciało charakteryzuje się idealną sprężystością. Wartości wskaźników a i b przedstawiono na rysunkach 4-5.

Analiza statystyczna wykazała, że technika suszenia, temperatura jak i prędkość przepływu czynnika suszącego w trakcie suszenia konwekcyjnego oraz sposób dostarczania ciepła podczas suszenia sublimacyjnego mają istotny wpływ na wartości wskaźników a i b . Moc mikrofal istotnie zmienia jedynie wartość wskaźnika b . Najwyższą sprężystością charakteryzuje się susz uzyskany metodą kombinowaną: mikrofalową w warunkach obniżonego ciśnienia z podsuszaniem konwekcyjnym, o czym decydują najniższe wartości wskaźnika b , świadczące o niskiej prędkości zaniku naprężeń w trakcie testu relaksacji. Wyższą sprężystością charakteryzują się susze konwekcyjne uzyskane w warunkach niższej temperatury i niższej prędkości przepływu powietrza, co jest zbieżne z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy [Lewicki, Jakubczyk 2004; Gawalek 2005]. Dla suszy uzyskanych metodą sublimacyjną z kontaktowym sposobem dostarczania ciepła otrzymano niższe wartości obu wskaźników, co świadczy o większej sprężystości w stosunku do produktów odwadnianych z zastosowaniem radiacyjnego sposobu dostarczania ciepła. Spostrzeżenie to nie jest zgodne z dotychczas przyjętym poglądem mówiącym, że kontaktowy sposób dostarczania ciepła w trakcie suszenia sublimacyjnego pogarsza jakość suszy [Kramkowski i in. 2003]. Może to wynikać z wysokiej zawartości tłuszczu w surowym owocu avocado, która mogła mieć wpływ na wielkość kryształków lodu powstających w trakcie zamrażania surowca. To z kolei ma bardzo istotny wpływ na destrukcję struktury wewnętrznej suszonego materiału.



Źródło: obliczenia własne



Źródło: obliczenia własne

Rys. 4. Wartość wskaźnika a dla suszonego avocado

Fig. 4. Index value a for dried avocado

Rys. 5. Wartość wskaźnika b dla suszonego avocado

Fig. 5. Index value b for dried avocado

Analiza sprężystości suszonego owocu avocado przeprowadzona przy wykorzystaniu 5-elementowego modelu reologicznego Maxwella pozwala sformułować wnioski, których treść może być zbieżna z analizą wykonaną w oparciu o znormalizowaną funkcję relaksacji. Założono występowanie w modelu reologicznym równoległe połączonego pojedynczego elementu sprężystego, ponieważ badania wstępne wykazały, iż spadek naprężenia

w trakcie testu relaksacji suszonego avocado nie następuje do poziomu zerowego, co jest bardzo charakterystyczne dla materiałów biologicznych. Trudności pojawiają się w sytuacji, gdy przebieg procesu relaksacji naprężeń trzeba aproksymować przy użyciu większej liczby składników równania. Może wówczas powstać trudność z określeniem jak sprężystości poszczególnych elementów sprężystych wpływa na sprężystość całego modelu, która jest odpowiednikiem sprężystości badanego materiału. Jest to bardzo istotny aspekt przy wielu badaniach aplikacyjnych. Analiza wskaźników pozwalających ocenić poziom oraz prędkość zaniku naprężeń w czasie testu relaksacji jest lepszym rozwiązaniem, szczególnie przy konieczności porównywania przebiegu krzywych relaksacji naprężeń dla różnych materiałów.

Wnioski

1. W przypadku konieczności porównania przebiegu krzywych relaksacji naprężeń dla różnych produktów bardziej przydatna jest metoda polegająca na normalizacji funkcji relaksacji, niż analiza modelu reologicznego Maxwella.
2. Spośród analizowanych technik suszenia, metoda kombinowana: mikrofalowo-konwekcyjna – pozwala uzyskać susze o najwyższej sprężystości.
3. Wzrost temperatury i prędkości przepływu czynnika suszącego w trakcie suszenia konwekcyjnego najistotniej wpływają na obniżenie sprężystości suszonego owocu avocado.

Bibliografia

- Alibas I.** (2007): Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering*, 96(4), 495-502.
- Chen P., Chen S.** (1986): Stress-relaxation functions of apples high strain loading rates. *Transaction of the ASAE*, 29(6), 1754-1759.
- Figiel A.** (2008): Właściwości reologiczne tworzywa biodegradowalnego wyznaczone na podstawie cyklicznego testu relaksacji naprężeń. *Inżynieria Rolnicza*, 4(102), 271-277.
- Gawalek J.** (2005): Wpływ warunków konwekcyjnego i sublimacyjnego suszenia korzeni marchwi na jakość suszu. *Inżynieria Rolnicza*, 11(71), 119-127.
- Golacki K.** (1996): Test relaksacji naprężeń dla korzenia marchwi. *ZPPNR*, 347-351.
- Golacki K., Stropek Z.** (2001): Viscoelastic properties of jonagold apple flesh. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Agricultural Engineering*, vol. 4, issue 2.
- Golacki K., Stropek Z.** (2006): Metoda porównania przebiegów krzywej relaksacji naprężeń różnych materiałów roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 473-479.
- Kramkowski R., Stępien B., Peroń S.** (2003): Selected aspects of freeze-drying in the production of instantly reconstituable foodstuffs. *Acta Agrophysica*, 2(2), 339-346.
- Krokida M.K., Kiranoudis C.T., Maroulis Z.B.** 1999): Viscoelastic behavior of dehydrated products during rehydration. *Journal of Food Engineering*, 40, 269-277.
- Lewicki P.P., Jakubczyk E.** (2004): Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, 64, 307-314.
- Mayor L., Cunha R.L., Sereno A.M.** (2007): Relation between mechanical properties and structural changes during osmotic dehydration of pumpkin. *Food research International*, 40, 448-460.

- Piotrowski D., Lenart A., Wardzyński A.** (2004): Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. *Journal of Food Engineering*, 65, 519-525.
- Sanga E.C.M., Mujumdar A.S., Raghavan G.S.V.** (2002): Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material. *Chemical Engineering and Processing*, 41, 487-499.
- Smewing J.** (2000): W jaki sposób analiza tekstury poprawia jakość. *Przemysł Spożywczy*, 7, 38-40.
- Stępień B.** (2008): Impact of vacuum-microwave drying on selected mechanical and rheological features of carrot. *Biosystems Engineering*, 99, 234-238.

ANALYSIS OF AVOCADO DRIED FRUIT ELASTICITY

Abstract. The analysis concerned avocado dried fruit elasticity dehydrated with three methods: convectonal (SK), sublimation (SS) and with a combined technique: microwave in conditions of lowered pressure with a convective drying (SMK). A greater usefulness of the analysis of elasticity based on normalised functions of stresses relaxation than based on Maxwell rheological model was determined. A combined method of drying allowed for obtaining dried fruit of the highest elasticity. Conditions of carrying out drying with particular techniques significantly change the product elasticity. Changes of temperature and speed of the drying factor flow during convective drying and the method of supplying heat during sublimation drying, influence dried avocado elasticity.

Key words: drying, elasticity, avocado, rheological model.

Adres do korespondencji:

Bogdan Stępień; e-mail: bogdan.stepien@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chelmońskiego 37/41
51-630 Wrocław