

WPŁYW METODY SUSZENIA NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I AKUSTYCZNE SUSZY MARCHWIOWYCH

Agata Marzec, Szymon Pasik

*Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji,
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*

Streszczenie. Celem pracy było badanie wpływu metody suszenia na właściwości mechaniczne i akustyczne uzyskanych produktów oraz analiza korelacji pomiędzy wyznaczonymi wyróżnikami tekstury. Przeprowadzone badania wykazały, że metoda suszenia wpływa na właściwości mechaniczne i akustyczne suszy marchwiowych. Praca i siła ściskania były największe dla suszu fluidalnego i mikrofalowego. Susze różniły się zarówno liczbą zdarzeń emisji akustycznej jak i zakresem emitowanych częstotliwości. Współczynnik nachylenia charakterystyki widmowej był najwyższy dla suszu sublimacyjnego i różnił się istotnie od wartości uzyskanych dla suszu fluidalnego, mikrofalowego i konwekcyjnego. Nie stwierdzono istotnych korelacji pomiędzy wyróżnikami tekstury akustycznymi i mechanicznymi, natomiast wykazano, że parametry akustyczne zależą od porowatości materiału.

Słowa kluczowe: suszona marchew, właściwości mechaniczne, właściwości akustyczne, porowatość

Wprowadzenie

Ze względu na sezonowość zbioru owoców i warzyw istnieje na ogół potrzeba ich utrwalania i przetwarzania. Jednym z najstarszych sposobów jest suszenie. Ubytek wody i zwiększenie stężenia składników rozpuszczalnych zwiększa sztywność ścian komórkowych [Jakubczyk i Lewicki 2003]. Ocena jakości suszy może być przeprowadzona wieloma sposobami. Konsument ocenia walory organoleptyczne suszu tj. smak, zapach, barwę, a także poprzez gryzienie chrupkość i teksturę. Podstawowymi instrumentalnymi metodami pomiaru tekstury są testy mechaniczne. Stosując je nie uzyskuje się pełnej charakterystyki tekstury. Owoce i warzywa pod wpływem obciążeń mechanicznych wykazują cechy lepko-sprężyste, na które wpływa między innymi wartość przyłożonej siły i szybkość obciążenia [Jakubczyk i Lewicki 2003]. Istotny jest również kształt i wielkość badanej próbki. Ostatnio coraz powszechniej stosowane są metody akustyczne [Vincent 2004], szczególnie ze względu na wysokie korelacje, jakie występują pomiędzy akustycznymi wyróżnikami tekstury a oceną sensoryczną produktów [Harker i in. 2006]. Przede wszystkim, częstotliwość dźwięku zależy od materiału, który jest deformowany [Wavers 1997]. W przypadku suszu za emisję akustyczną odpowiedzialna jest jego struktura wewnętrzna. Różnice w strukturze suszy mogą być wywołane zastosowaniem różnych technik suszenia materiału.

Celem pracy było badanie wpływu metody suszenia na właściwości mechaniczne i akustyczne uzyskanych produktów oraz analiza korelacji pomiędzy wyznaczonymi wyróżnikami tekstury.

Materiał i metody

Materiał badawczy stanowiła marchew odmiany Joba, którą przed suszeniem pokrojono w plastry o wymiarach 5 mm wysokości i 20 mm średnicy. Stosowane były cztery różne metody suszenia w warunkach laboratoryjnych: konwekcyjna w temperaturze 70°C, przy przepływie powietrza 2 m/s; fluidalna w 70°C z prędkością przepływu powietrza 7m·s⁻¹; mikrofalowo-konwekcyjna w 40°C i przy mocy generatora mikrofal 200 W oraz sublimacyjna (zamrożone w -21°C plasterki marchwi suszono 24 godziny przy ciśnieniu 63 Pa i temperaturze półki 20°C). Materiał suszono do osiągnięcia stałej równowagowej zawartości wody. Po suszeniu produkty miały a_w około 0,20 i były przechowywane w kontrolowanych warunkach w celu wyrównania, jak i obniżenia ich aktywności wody.

Oznaczono aktywność wody (a_w) suszy w aparacie Rotronic oraz ich gęstość rzeczywistą i pozorną za pomocą piknometru helowego. Obliczono porowatość materiału wg zależności: $\epsilon=1-(\rho_L \cdot \rho^{-1})$ gdzie: ρ_L - gęstość pozorna, ρ - gęstość rzeczywista.

Wykonano testy ściskania w maszynie wytrzymałościowej Zwick z prędkością 20 mm·min⁻¹ jednocześnie rejestrując emisję akustyczną (EA) generowaną podczas niszczenia próbek w 20 powtórzeniach. Do rejestracji dźwięków wykorzystano akcelerometr typu 4381 firmy Brüel&Kjær. Sygnał emisji akustycznej wzmacniano (40 dB) w liniowym wzmacniaczu niskoszumnym, a następnie zapisywano w pamięci komputera PC przy zastosowaniu dźwiękowej karty przetwarzania analogowo-cyfrowego firmy Adlink Technology Inc. typu 9112 z częstotliwością próbkowania 44,1 kHz. Karta ta umożliwiła zapis siły obciążającej badaną próbkę łącznie z zapisem emisji akustycznej. Sygnał emisji akustycznej analizowano w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 15 kHz. Analizowano wyróżniki tekstury mechaniczne: siłę i pracę oraz akustyczne takie jak: amplituda, liczba zdarzeń emisji akustycznej, energia dźwięku, charakterystyki widmowe. Wyznaczono współczynnik nachylenia charakterystyki widmowej (β) jako iloraz energii sygnału w paśmie wysokich częstotliwości do energii sygnału w paśmie niskich częstotliwości charakterystycznych dla poszczególnych produktów. Obliczono energię zarejestrowanego sygnału akustycznego w jednostkach umownych za pomocą programu komputerowego Policz dla Windows XP.

Pracę ściskania liczono z zależności: $W = v \int_0^t F(t) dt$; gdzie: F(t) – kolejna siła

w funkcji czasu [N], v – prędkość ściskania [mm·min⁻¹], t – czas ściskania materiału [s].

Badania wykonano w 20 powtórzeniach, z czego wybierano 15-20 s próbek zapisu siły i emisji akustycznej (EA) do dalszej analizy. Analizę statystyczną wyników przeprowadzono w programie Excel dla Windows XP.

Wyniki badań i ich analiza

Badane susze marchwiowe charakteryzowały się zbliżonymi wartościami aktywności wody na poziomie około $0,10 \pm 0,01$. Porowatość produktów zależała od zastosowanej metody suszenia (tab. 1). Największą porowatością charakteryzował się susz sublimacyjny, natomiast najmniejszą marchew wysuszona metodą konwekcyjną. Przyczyną tego jest duży skurcz materiału w czasie suszenia konwekcyjnego. Wszystkie metody suszenia, za wyjątkiem liofilizacji, powodują zmniejszenie pola powierzchni komórek względem surowego materiału, co najprawdopodobniej związane jest ze skurczem materiału. Na wielkość skurczu mają wpływ warunki procesu suszenia, takie jak: temperatura i szybkość suszenia [Nowak i in. 1998; Piwowarski i in. 1999].

Tabela 1. Średnie wartości czasu suszenia, porowatości i parametrów mechanicznych badanych materiałów

Table 1. Mean values of time drying, porosity and the mechanical parameters of studied materials

Rodzaj suszu marchwiowego	Czas suszenia [min]	Porowatość	Siła [N]	Praca ściskania [J]
Fluidalny	190	0.594	332.33 ± 70.00	0.60 ± 0.13
Konwekcyjny	280	0.587	124.84 ± 42.78	0.33 ± 0.11
Mikrofalowy	150	0.605	254.24 ± 86.77	0.71 ± 0.15
Sublimacyjny	-	0.702	148.83 ± 39.23	0.40 ± 0.12

Źródło: obliczenia własne autorów

Analiza pracy ściskania wykazała, że susze fluidalne i mikrofalowe charakteryzują się największą wytrzymałością materiału, zaś niższą konwekcyjne i sublimacyjne (tab. 1). Najmniejszą twardość określoną na podstawie siły ściskania wykazywała marchew suszona konwekcyjnie, największą próbki suszone fluidalnie (tab. 1). Takie zachowanie się materiałów pod wpływem przyłożonego obciążenia wynika m.in. z różnego czasu suszenia i w efekcie uzyskanej różnej porowatości materiału. Ponadto im produkt suszy się szybciej tym prawdopodobieństwo wystąpienia stanu szklanego większe. Długi czas suszenia powoduje, że produkt staje się gumowaty i charakteryzuje się niską wytrzymałością.

Właściwości akustyczne analizowano na podstawie charakterystyk amplitudowo-czasowych i stwierdzono, że marchew wysuszona fluidalnie podczas ściskania emitowała najmniejszą ilość impulsów dźwiękowych (liczba zdarzeń EA), natomiast największą ilość zdarzeń emisji akustycznej zanotowano dla suszu mikrofalowego (tab. 2). Podobne zależności stwierdzono w przypadku analizy energii dźwięku (tab. 2).

Nie zaobserwowano wpływu metody suszenia na maksymalną amplitudę dźwięku (tab. 2). Współczynnik nachylenia charakterystyki widmowej, który informuje o ilości dźwięku emitowanego w pasmach wysokich i niskich częstotliwości był znacznie wyższy od 1, ale tylko dla marchwi suszonej metodą sublimacyjną. Oznacza to, że susz sublimacyjny emitował więcej dźwięków o wysokich niż o niskich częstotliwościach. Pozostałe

susze charakteryzowały się wartościami współczynnika β , znacznie niższymi od 0,5, co świadczy, że w sygnale emisji akustycznej większy był udział dźwięków o niskich częstotliwościach. Wydaje się, że główną przyczyną takiej generacji sygnału EA jest różna porowatość suszy.

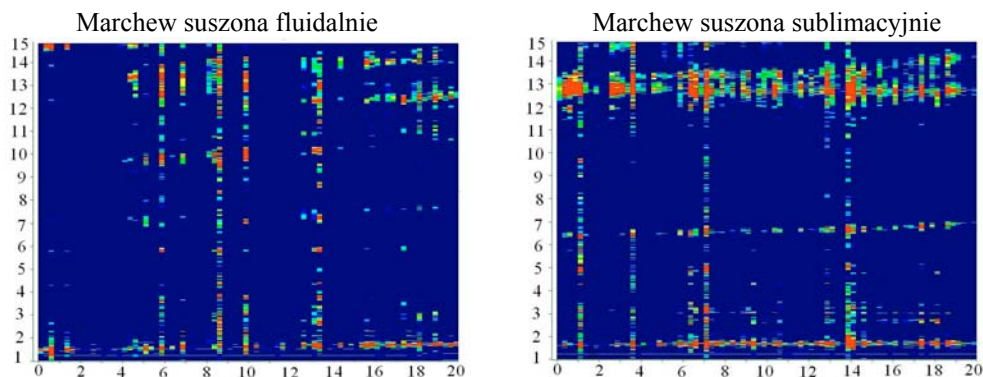
Tabela 2. Średnie wartości deskryptorów emisji akustycznej i parametrów mechanicznych badanych materiałów

Table 2. Average values of drying time, porosity and mechanical parameters of tested materials

Rodzaj suszu marchwiowego	Maksymalna amplituda dźwięku [V]	Współczynnik nachylenia charakterystyki widmowej	Liczba zdarzeń EA [l.zdarzeń·s ⁻¹]	Energia sygnału EA [mV]
Fluidalny	2.39 ± 0.39	0.47 ± 0.34	125.4 ± 60.2	56.67 ± 28.80
Konwekcyjny	2.75 ± 0.26	0.35 ± 0.27	162.6 ± 32.2	78.85 ± 19.22
Mikrofalowy	2.61 ± 0.29	0.19 ± 0.10	276.0 ± 59.3	145.36 ± 31.90
Sublimacyjny	2.25 ± 0.33	1.86 ± 0.52	164.3 ± 24.0	78.90 ± 13.29

Źródło: obliczenia własne autorów

W badaniach właściwości akustycznych wykazano, że produkty zbożowe takie jak: pieczywo chrupkie, ciastka, chleb charakteryzują się indywidualnym widmem spektralnym. Wykazano również, że na zakres emitowanych częstotliwości istotnie wpływa technologia wytwarzania produktu [Marzec i in. 2005]. Przede wszystkim, częstotliwość dźwięku zależy od materiału, który jest deformowany [Wavers 1997]. W niniejszej pracy wykazano, że metoda suszenia istotnie wpływała na częstotliwość emitowanych dźwięków. Na rys. 1. przedstawiono akustogramy wybranych suszy: fluidalnego i sublimacyjnego. Są one graficznym przedstawieniem zmian częstotliwości i natężenia dźwięku w funkcji czasu. Kolory obrazują natężenie sygnału akustycznego (wysokość prążków) badanego produktu. Znaczenie kolorów jest następujące, jeśli dla danej częstotliwości prążki są w przedziale: 0 dB - ciemno niebieski, -16 - -14 dB - niebieski, -14 - -10 dB - jasno niebieski, -6 - -2 dB - zielony, -2 - +2 dB - żółty, powyżej +2 dB - czerwony. Widać na akustogramach charakterystyczne pasma częstotliwości i natężenie sygnału akustycznego w tych pasmach (barwa prążków) oraz efekt wyraźnego wpływu metody suszenia na natężenie dźwięku. Marchew suszona fluidalnie w trakcie ściskania generowała sygnał EA o słabym natężeniu dźwięku z około 1 sekundowymi przerwami, głównie w zakresie częstotliwości niskich, 1-2 kHz i wysokich, 13-15 kHz (rys. 1). Marchew suszona metodą sublimacyjną charakteryzowała się bardzo dużą aktywnością akustyczną podczas całego procesu ściskania próbki. Największe natężenie sygnału akustycznego występowało w zakresie 1-8 kHz i 11-14 kHz (rys. 1). Akustogramy potwierdzają, że suszone materiały różnią się porowatością. Badane próbki emitowały sygnały akustyczne przy różnym poziomie zniszczenia materiału. Także zakresy częstotliwości zarejestrowanych dźwięków były różne.



Rys. 1. Aktywność akustyczna suszy marchwiowych (oś x- czas [s]; oś y – częstotliwość dźwięku [kHz]; barwa – natężenie dźwięku [dB])

Fig. 1. Acoustic activity of dried carrot (the x axis - time [s]; the y axis - sound frequency [kHz]; tone quality – sound intensity [dB])

Analizowano zależności pomiędzy wyróżnikami tekstury akustycznymi i mechanicznymi oraz porowatością. Istotne zależności zaobserwowano pomiędzy porowatością i współczynnikiem β . Natomiast słabe korelacje wystąpiły między parametrami mechanicznymi i akustycznymi oraz porowatością (tab. 3). Zależności te pokazują, że właściwości akustyczne suszy są zależne od porowatości materiału.

Tabela 3. Współczynniki regresji liniowej pomiędzy wyróżnikami tekstury mechanicznymi i akustycznymi oraz porowatością suszy marchwiowych

Table 3. Linear regression coefficients between mechanical and acoustic discriminants of texture and dried carrot porosity

	Porowatość	Siła ściskania [N]	Praca [J]
Porowatość		-0,455	-0,353
Maksymalna amplituda dźwięku [V]	-0,764	-0,174	-0,145
Energia akustyczna [mV]	-0,081	-0,037	0,300
Liczba zdarzeń EA	-0,072	-0,040	0,299
Współczynnik nachylenia charakterystyki widmowej	0,966	-0,463	-0,454

Źródło: obliczenia własne autorów

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że metoda suszenia wpływa na właściwości mechaniczne i akustyczne suszy marchwiowych. Praca i siła ściskania były największe dla suszu fluidalnego i mikrofalowego. Susze różniły się zarówno liczbą zdarzeń emisji akustycznej jak i zakresem emitowanych częstotliwości. Współczynnik nachylenia charakterystyki widmowej był najwyższy dla suszu sublimacyjnego i różnił się istotnie od wartości uzyskanych dla suszu fluidalnego, mikrofalowego i konwekcyjnego. Nie stwierdzono istotnych korelacji pomiędzy wyróżnikami tekstury akustycznymi i mechanicznymi, natomiast wykazano, że parametry akustyczne zależą od porowatości materiału.

Bibliografia

- Harker F. R., Maindonald J., Murray S. H., Gunson F. A., Hallett I. C., Walker S. B. 2006. Sensory interpretation of instrumental measurements I: texture of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 39. s. 185-192.
- Jakubczyk E., Lewicki P.P. 2003. Właściwości mechaniczne tkanki jabłka w odniesieniu do jej struktury. *Acta Agrophysica*. 2(3). s. 549-557.
- Marzec A., Lewicki P.P., Ranachowski Z. 2005. Właściwości mechaniczne i akustyczne suchych produktów zbożowych. *Inżynieria Rolnicza*. 9(69). s. 207-214.
- Nowak D., Witrowa-Rajchert D., Lewicki P.P. 1998. Skurcz objętościowy i zmiana gęstości marchwi i ziemniaka podczas suszenia konwekcyjnego. *Teoretyczne i Aplikacyjne Problemy Inżynierii Rolniczej. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. z. 454. s. 461-468. ISSN 0084-5477.
- Piwowski E., Lewicki P.P., Witrowa-Rajchert D. 1999. Porównanie zmian struktury materiału roślinnego powstałych w wyniku zastosowania różnych metod suszenia, *Inżynieria Chemiczna i Procesowa, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, (red. P. Wodziński). 25. s. 121-128. ISSN 1505-2095.
- Wavers M. 1997. Listening to the sound of materials: acoustic emission for the analysis of material behaviour. *NDT E Inter*. 30(2). s. 99-106.
- Vincent J. F. V. 2004. Application of fracture mechanics to the texture of food. *Eng. Failure Analysis*. 11. s. 695-704.

INFLUENCE OF DRIED METHOD OF THE MECHANICAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF DRIED CARROT

Abstract. The aim of this work was to investigate the influence of drying method on mechanical and acoustic properties of carrots. The correlations between the acoustic emission descriptors and mechanical features of texture of dried product were analyzed. Carrot of the Joba variety was cut into slices and then dried by convective method as well as by freeze-drying, fluidal and microwave. Samples of dried material were subjected to compression test. The test was performed with the application of the Zwick loading machine equipped with the system for registration of AE. Results showed that acoustic and mechanical properties were dependent on the drying method. The sound generated by the dried carrot differed in frequency according to the drying method. There was no correlation between mechanical and acoustic properties of the dry material. However, acoustic descriptors were correlated with porosity of dried carrot.

Key words: dried carrot, mechanical properties, acoustic properties, porosity

Adres do korespondencji:

Agata Marzec; e-mail: agata_marzec@sggw.waw.pl
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 159C
02-786 Warszawa