

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I SORPCYJNE JABŁEK SUSZONYCH METODĄ DWUSTOPNIOWĄ

*Magdalena Śledź, Małgorzata Nowacka, Artur Wiktor, Magdalena Selke,
Dorota Witrowa-Rajchert*

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydział Nauk o Żywności,
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 159c, 02-776 Warszawa
e-mail: magdalena_sledz@sggw.pl

Streszczenie. Celem badania była analiza tekstury oraz zdolności adsorpcji wody jabłek suszonych dwustopniowo: metodą mikrofalowo-konwekcyjną i dosuszanych konwekcyjnie oraz metodą konwekcyjną z dosuszeniem techniką mikrofalowo-konwekcyjną. W pierwszym etapie otrzymywano susz o zawartości wody na poziomie 30 lub 50%, który dosuszano w drugim stopniu do równowagowej zawartości wody. Suszenie konwekcyjne przeprowadzono w temperaturze powietrza 70°C i prędkości jego przepływu 2,5 m·s⁻¹, natomiast podczas suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego zastosowano następujące parametry: moc mikrofal 300 W, temperatura powietrza 40°C i prędkość przepływu powietrza 3,5 m·s⁻¹. W celu analizy właściwości mechanicznych przeprowadzono test cięcia. Właściwości sorpcyjne określano na podstawie zmian masy suszy przetrzymywanych przez 72 godziny w eksykatorze nad nasyconym roztworem NaCl (w środowisku o $a_w = 0,75$). Sposób suszenia dwustopniowego zdecydowanie wpłynął na właściwości mechaniczne oraz sorpcyjne jabłek. Maksymalna siła cięcia oraz praca cięcia mieściły się w zakresach odpowiednio 159-222 N i 178-290 mJ. Natomiast względny przyrost masy po 72 h wyniósł 11-24%, w zależności od metody suszenia. Najwyższe wartości uzyskały jabłka suszone mikrofalowo-konwekcyjnie z dosuszaniem konwekcyjnym od 50% zawartości wody. Z kolei susze konwekcyjne oraz mikrofalowo-konwekcyjne z dosuszaniem konwekcyjnym (od 30% zawartości wody) charakteryzowały się znacząco niższymi wartościami maksymalnej siły i pracy cięcia oraz adsorpcji pary wodnej.

Słowa kluczowe: jabłko, suszenie dwustopniowe, suszenie mikrofalowo-konwekcyjne, suszenie konwekcyjne, właściwości mechaniczne, właściwości sorpcyjne

WYKAZ OZNACZEŃ

K – suszenie konwekcyjne,

MK – suszenie mikrofalowo-konwekcyjne,

K-MK30 – suszenie konwekcyjne do 30% wilgoci, dosuszanie mikrofalowo-konwekcyjne,
K-MK50 – suszenie konwekcyjne do 50% wilgoci, dosuszanie mikrofalowo-konwekcyjne,
MK-K30 – suszenie mikrofalowo-konwekcyjne do 30% wilgoci, dosuszanie konwekcyjne,
MK-K50 – suszenie mikrofalowo-konwekcyjne do 50% wilgoci, dosuszanie konwekcyjne.

WSTĘP

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie suszonymi surowcami roślinnymi, oferowanymi w formie przekąsek. Szczególnie godnym zainteresowania surowcem są jabłka, ze względu na ich relatywnie niską cenę oraz wysoką wielkość produkcji w naszym kraju, wynoszącą 2217,5 tys. ton. w 2010 r. (GUS 2011). Jednym z ważniejszych wyróżników jakości produktów suszonych jest ich tekstura. W trakcie suszenia surowców roślinnych, na skutek zmniejszenia zawartości wody i zwiększającego się stężenia substancji rozpuszczonych, wzrasta sztywność materiału, co wpływa na wzrost wytrzymałości mechanicznej (Lewicki i Jakubczyk 2004, Marzec i in. 2010). Nieodłącznym zjawiskiem jest również skurcz produktu, mający często charakter anizotropowy, decydujący o teksturze suszu. Właściwości mechaniczne suszonych produktów uzależnione są od zawartości w nich wody, gdyż spełnia ona rolę plastyfikatora (Labuza i in. 2004). Wraz ze zwiększeniem zawartości wody produkt z ciała kruchego może stać się ciałem sprężysto-lepkim (Rowicka i in. 2002). Zatem podczas projektowania materiału opakowaniowego i warunków przechowywania suszy powinno się analizować ich właściwości sorpcyjne, aby zapewnić konsumentowi produkt jak najwyższej jakości (Nowacka i Witrowa-Rajchert 2010). Ponadto, zdolność adsorpcji pary wodnej przez materiał może stanowić podstawę do wnioskowania o stopniu uszkodzenia tkanki (Witrowa-Rajchert 1999).

Łączenie różnych technik suszenia może być interesującą metodą przy projektowaniu właściwości mechanicznych i sorpcyjnych produktów suszonych. W hybrydowych metodach suszenia łączy się różne techniki suszenia, m.in. w celu ograniczenia kosztów produkcji, szczególnie w przypadku, gdy jedna z metod jest wysoce energochłonna (Xu i in. 2005, 2006). Ponadto, w wyniku zastosowania suszenia dwustopniowego często możliwe jest otrzymanie suszu o mniejszym skurczu i wyższym stopniu ponownego uwodnienia (Maskan 2001, Namsangan i in. 2004). Suszone owoce i warzywa najczęściej otrzymywane są przy wykorzystaniu metody konwekcyjnej, charakteryzującej się m.in. wysokim skurczem materiału, zdecydowaną zmianą jego struktury, co wpływa na niewielką zdolność sorpcji pary wodnej przez materiał (Witrowa-Rajchert i Rząca 2009, Nowacka i Witrowa-Rajchert 2010). Suszenie mikrofalowe, ze względu na odparowanie wody w całej objętości materiału, zdecydowanie skraca czas suszenia i przyczynia się do zmniejszenia skurczu, jak również uszkodzeń tkanki roślinnej (Schiffmann 2006, Witrowa-Rajchert i Rząca 2009). W przypadku suszenia dwustopniowego (metodą kon-

wekcyjną i mikrofalowo-konwekcyjną), wspomaganie konwekcyjnego procesu za pomocą mikrofal może mieć szczególne znaczenie zarówno na początku procesu, w celu odparowania większości wody, jak i pod jego koniec, kiedy transport wody do powierzchni jest utrudniony (Kowalski i Rajewska 2009).

Celem niniejszej pracy była analiza właściwości mechanicznych i sorpcyjnych suszonych jabłek uzyskanych metodą dwustopniową – mikrofalowo-konwekcyjną z dosuszaniem konwekcyjnym lub konwekcyjną z dosuszaniem mikrofalowo-konwekcyjnym.

MATERIAŁ I METODY

Materiał do badań stanowiły jabłka odmiany *Idared*, pochodzące z Pól Doświadczalnych Katedry Sadownictwa Wydziału Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Surowiec myto i krojono w plastry o grubości $2,5 \pm 0,1$ mm i średnicy 30 mm, z pominięciem skórki i gniazda nasiennego. Tak przygotowany materiał zanurzano w 0,1% wodnym roztworze kwasu cytrynowego, w celu ograniczenia reakcji enzymatycznego brunatnienia. Osuszony na bibule filtracyjnej surowiec układano na sitach i suszono dwustopniowo przy zastosowaniu metod: mikrofalowo-konwekcyjnej z dosuszaniem konwekcyjnym i konwekcyjnej z dosuszaniem mikrofalowo-konwekcyjnym. W trakcie procesu materiał wstępnie podsuszony w pierwszym stopniu (do zawartości wody na poziomie 30 lub 50%) dosuszano w drugim stopniu do równowagowej zawartości wody. Jabłka suszono także jednostopniowo metodą mikrofalowo-konwekcyjną oraz konwekcyjną.

Proces suszenia konwekcyjnego przeprowadzono w laboratoryjnej suszarce w temperaturze powietrza wynoszącej 70°C , przepływającego równolegle do warstwy materiału z prędkością $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Surowiec suszono w jednej warstwie przy obciążeniu sita wynoszącym $1,92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Podczas suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego zastosowano moc mikrofal 300 W oraz poprzeczny przepływ powietrza o temperaturze 40°C z prędkością $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Obciążenie sita wyniosło $2,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Proces suszenia przeprowadzano w dwóch powtórzeniach.

Właściwości mechaniczne analizowano za pomocą testu cięcia w teksturometrze TEXTURE ANALYSER TA-TX2 firmy Stable Micro Systems Ltd. W tym celu wykorzystano nóż o długości 62 mm, szerokości 24 mm i grubości 0,5 mm, przesuwaną się wewnątrz metalowej podstawki ze szczeliną. Prędkość przesuwu głowicy wynosiła $1,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Cięcie rozpoczynało się przy stawianiu oporu przez próbkę na poziomie 0,1 N i trwało do momentu osiągnięcia siły równej 15 N. Pomiaru dokonywano dla 10 plastrów materiału. Wyznaczono maksymalną siłę oraz pracę cięcia suszy.

W celu analizy kinetyki adsorpcji pary wodnej przez susze jabłkowe uprzednio zważony materiał umieszczano w eksykatorze nad nasyconym roztworem NaCl ($a_w = 0,75$) na 72 h. Po upływie 0,5, 1, 3, 5, 8, 10, 24, 48 i 72 h plastry ponownie ważono. Pomiaru dokonywano w sześciu powtórzeniach w stałej temperaturze 25°C.

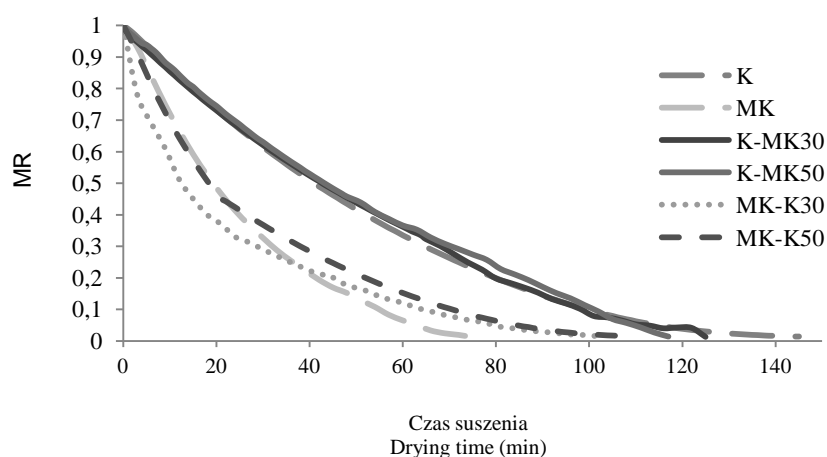
Analiza statystyczna obejmowała jednoczynnikową analizę wariancji ($\alpha = 0,05$) za pomocą testu F-Fischera. Posłużyła ona do oceny wpływu interakcji metody suszenia oraz poziomu zawartości wody, od którego rozpoczynano drugi stopień suszenia. Jednorodność wariancji została sprawdzona testem Levene'a. Podziału na grupy jednorodne dokonano przy użyciu testu Tukeya HSD. Przeprowadzono również dwuczynnikową analizę wariancji bez powtórzeń (celem oceny wpływu każdego z czynników – metody suszenia oraz poziomu zawartości wody, od którego rozpoczynano drugi stopień suszenia) oraz korelację liniową przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

WYNIKI I DYSKUSJA

Jabłka odmiany *Idared* suszono dwustopniowo od początkowej zawartości wody wynoszącej 6,3 kg H₂O·kg s.s.⁻¹. W pierwszym etapie zastosowano metodę mikrofalowo-konwekcyjną lub konwekcyjną do uzyskania 30 lub 50% wilgoci w materiale, co odpowiadało zawartości wody odpowiednio 3,62 i 2,17 kg H₂O·kg s.s.⁻¹. Drugi etap obejmował dosuszenie materiału do zawartości wody około 0,1 kg H₂O·kg s.s.⁻¹ przy zastosowaniu drugiej metody.

Rysunek 1 przedstawia krzywe suszenia jednostopniowego mikrofalowo-konwekcyjnego (MK) i konwekcyjnego (K) oraz dwustopniowego mikrofalowo-konwekcyjnego z dosuszaniem konwekcyjnym (MK-K) i konwekcyjnego z dosuszaniem mikrofalowo-konwekcyjnym (K-MK). Zastosowanie mikrofal do wspomaganego usuwania wody skutkowało zwiększoną szybkością procesu, ze względu na ogrzewanie materiału w całej objętości. Z tego powodu najkrótszy czas suszenia (75 min) zaobserwowano, gdy materiał suszono jednostopniową techniką mikrofalowo-konwekcyjną (MK). Z kolei najmniejszą intensywnością usuwania wody charakteryzował się proces konwekcyjny (K), w przypadku którego czas suszenia wyniósł 145 min. Zastosowanie promieniowania mikrofalowego w początkowym etapie procesu wpłynęło w większym stopniu na skrócenie czasu suszenia, w porównaniu z procesem, w którym mikrofały wykorzystywano do dosuszania produktu. Czas suszenia konwekcyjnego z dosuszaniem mikrofalowo-konwekcyjnym od 30% i 50% zawartości wody wyniósł odpowiednio 125 i 117 min, natomiast gdy wykorzystywano metodę mikrofalowo-konwekcyjną z dosuszaniem konwekcyjnym – 103 minuty (MK-K30) i 110 minut (MK-K50). Zastosowanie metody mikrofalowo-konwekcyjnej jako pierwszego etapu suszenia skróciło czas procesu o 29%,

w przypadku dosuszania konwekcyjnego od 30% zawartości wody i o 24%, gdy materiał dosuszano od 50% zawartości wody, w porównaniu z metodą konwekcyjną. Z kolei wspomaganie drugiego stopnia suszenia za pomocą mikrofal skróciło czas procesu o odpowiednio 14 i 19%. Również dostępne dane literaturowe wskazują na możliwość wykorzystania suszenia dwustopniowego w celu skrócenia czasu procesu konwekcyjnego (Maskan 2001, Xu i in. 2006). Przykładowo, zastosowanie suszenia mikrofalowego od zawartości wody $1,2 \text{ kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg s.s.}^{-1}$ skróciło czas suszenia owoców kiwi o około 40%, w porównaniu z procesem konwekcyjnym (Maskan 2001).

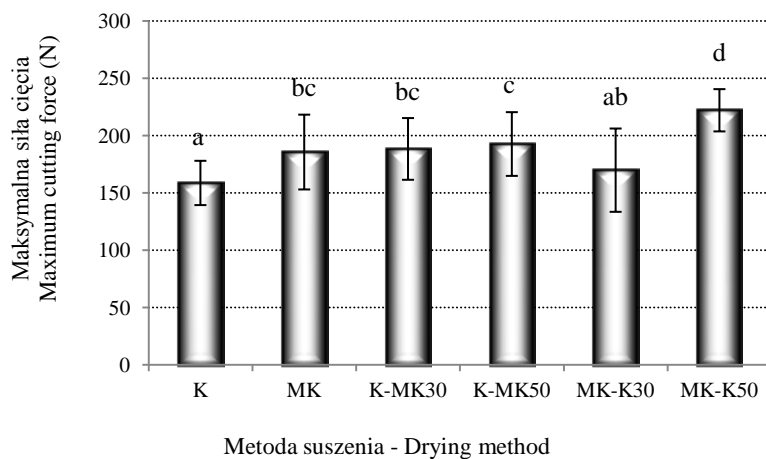


Rys. 1. Krzywe suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego (MK), konwekcyjnego (K) i dwustopniowego (K-MK, MK-K) jabłek; MR – względna zawartość wody

Fig. 1. Drying curves of microwave-convective (MK), convective (K) and two-stage drying (K-MK, MK-K) of apples; MR – relative moisture ratio

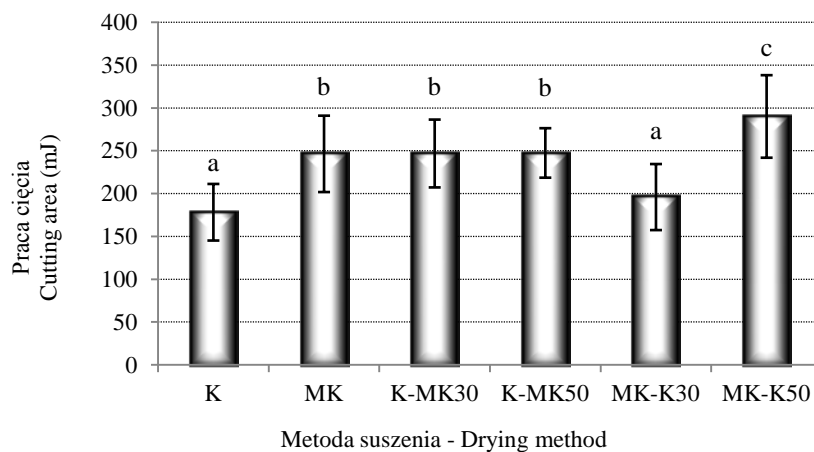
Metoda suszenia znacząco różnicowała właściwości mechaniczne tkanki jabłka – rysunek 2 i 3. Maksymalna siła oraz praca cięcia wahały się w zakresie odpowiednio 159-222 N i 178-290 mJ, w zależności od metody suszenia. Materiał otrzymany przy wykorzystaniu techniki konwekcyjnej charakteryzował się najniższą wytrzymałością mechaniczną. Z kolei przecięcie suszu mikrofalowo-konwekcyjnego wymagało wyższej siły o 17% oraz pracy o 38%, przy zbliżonej zawartości wody (tab. 1). Inni badacze również, analizując test ściskania tkanek roślinnych, zaobserwowali wyższą odporność mechaniczną suszonych mikrofalowo-konwekcyjnie jabłek (Jakubczyk i Lewicki 2002) oraz marchwi (Marzec i Pasik 2008), w porównaniu z suszami otrzymanymi metodą konwekcyjną.

Wykorzystanie suszenia dwustopniowego wpłynęło w sposób statystycznie istotny na teksturę otrzymanych jabłek, co było wynikiem interakcji metody prowadzenia suszenia od poziomu zawartości wody, od którego rozpoczęto drugi



Rys. 2. Maksymalna siła cięcia (średnia \pm odchylenie standardowe) jabłek suszonych różnymi metodami; a, b, c, d – jednakowe litery oznaczają grupy homogeniczne, nie różniące się w ujęciu statystycznym ($\alpha = 0,05$)

Fig. 2. Maximum cutting force (mean \pm standard deviation) of apples dried by different methods; a, b, c, d – the same letters mean homogeneous groups, not differing in statistical approach ($\alpha = 0.05$)



Rys. 3. Praca cięcia (wartości średnie z odchyleniami standardowymi) jabłek suszonych różnymi metodami; a, b, c, d – jednakowe litery oznaczają grupy homogeniczne, nie różniące się w ujęciu statystycznym ($\alpha = 0,05$)

Fig. 3. Cutting work (average values with standard deviations) of apples dried by different methods; a, b, c, d – the same letters mean homogeneous groups, not differing in statistical approach ($\alpha = 0.05$)

stopień suszenia. Dwuczynnikowa analiza wariancji nie potwierdziła natomiast znaczącego wpływu każdego z tych czynników indywidualnie. Najwyższą maksymalną siłę cięcia odnotowano w przypadku jabłka suszonego w pierwszym etapie mikrofalowo-konwekcyjnie do 50% zawartości wody, a następnie konwekcyjnie (MK-K50), co prawdopodobnie wynikało z nieznacznie wyższej zawartości wody, w porównaniu z pozostałymi suszami (tab. 1). Z tego też powodu otrzymane jabłka były bardziej gumiate, co mogło doprowadzić do ściskania tkanki w trakcie cięcia. Przy niższej zawartości wody w produktach roślinnych dochodzi do mikroskopijnych pęknięć w strukturze materiału, przez co maksymalna siła potrzebna do przecięcia suszu jest mniejsza (Rząca i Witrowa-Rajchert 2010).

Tabela 1. Zawartość wody (średnia \pm odchylenie standardowe) w jabłkach suszonych jednostopniowo: konwekcyjnie (K) i mikrofalowo-konwekcyjnie (MK) oraz dwustopniowo (K-MK, MK-K); a, b – jednakowe litery oznaczają grupy homogeniczne, nie różniące się w ujęciu statystycznym ($\alpha = 0,05$)

Table 1. Water content (mean \pm standard deviation) in apples dried using one-stage drying: convective (K) and microwave-convective (MK) and two-stage drying (K-MK, MK-K); a, b – the same letters mean homogeneous groups, not differing in statistical approach ($\alpha = 0.05$)

Metoda suszenia – Drying method	Zawartość wody – Water content (%)
K	9,15 \pm 1,10 ab
MK	9,40 \pm 1,85 ab
K-MK30	9,28 \pm 2,11 ab
K-MK50	6,70 \pm 0,22 a
MK-K30	9,50 \pm 0,82 ab
MK-K50	10,45 \pm 0,52 b

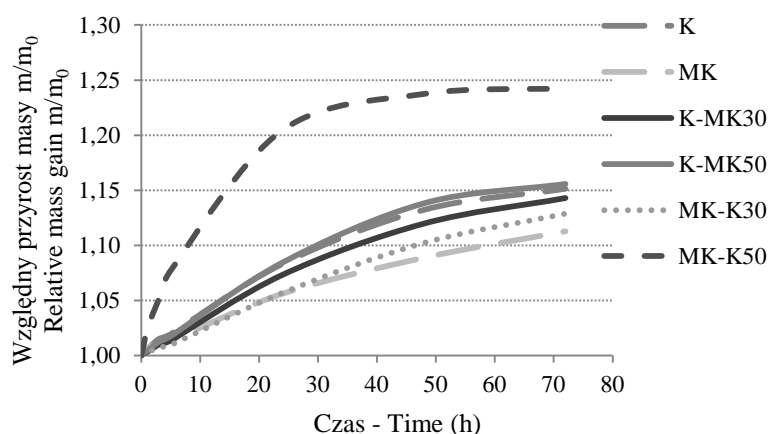
Zawartość wody nie była jedynym czynnikiem wpływającym na otrzymane wyniki testu cięcia. Susz otrzymany metodą dwustopniową mikrofalowo-konwekcyjną z dosuszaniem konwekcyjnym od 30% zawartości wody (MK-K30) charakteryzował się istotnie niższą wytrzymałością mechaniczną, w porównaniu z pozostałymi suszami otrzymanymi techniką dwustopniową, przy jednocześnie porównywalnej zawartości wody. Prawdopodobnie właściwości mechaniczne uzależnione były także od czasu oddziaływania mikrofal podczas suszenia (a zatem przyjętej dawki promieniowania mikrofalowego), przy wysokiej początkowej zawartości wody lub niższej w dalszym etapie procesu. Andrés i in. (2004), stosując różną dawkę mikrofal w zakresie 0-10 W/g, dowiedli, że suszenie mikrofalowo-konwekcyjne powoduje powstanie porowatej struktury, a stopień uszkodzenia tkanki uzależniony był od przyjętej przez materiał dawki promieniowania. Marzec i in. (2010) zaobserwowali większe uszkodzenia przy wyższej dawce mikro-

fal, co według autorów może wpływać na właściwości mechaniczne suszonych jabłek. Ogólnie przyjmuje się, że suszenie mikrofalowe, w przeciwieństwie do metody konwekcyjnej, nie powoduje powstawania utwardzonych struktur w tkance materiału (Chou i Chua 2001, Vadivambal i Jayas 2007, Witrowa-Rajchert i Rząca 2009). Jednak Andrés i in. (2004), w jabłkach otrzymanych przy maksymalnej dawce promieni mikrofalowych, wynoszącej 10 W/g, wyróżnili dwie strefy struktury wewnętrznej jabłek – zewnętrzną, o wysokiej porowatości, gdzie oddziaływanie mikrofal było niewielkie oraz wewnętrzną, zwartą tkankę. Zatem zastosowanie różnych kombinacji procesu podczas suszenia dwustopniowego tkanki jabłka umożliwia projektowanie jej właściwości mechanicznych, w zależności od dalszego przeznaczenia materiału.

Właściwości higroskopijne, analizowane za pomocą kinetyki adsorpcji pary wodnej, przedstawiono na rysunku 4. Względny przyrost masy po 72 godzinach wahał się w zakresie 11-24% masy początkowej, w zależności od metody suszenia. Na zróżnicowanie wyników wpłynęła interakcja metody suszenia oraz początkowej zawartości wilgoci w drugim stopniu suszenia, jednak sama metoda suszenia oraz zawartość wody w suszach nie wpłynęły w istotny sposób na otrzymane wyniki ($p > 0,05$). Końcowy przyrost masy jabłek suszonych mikrofalowo-konwekcyjnie oraz konwekcyjnie wyniósł odpowiednio 11 i 15%, czemu odpowiadała zawartość wody na poziomie $22,8 \pm 2,4$ oraz $26,7 \pm 1,9$ g $H_2O \cdot 100$ g s.s.⁻¹. Z kolei według Nowackiej i Witrowej-Rajchert (2010) równowagowa zawartość wody w przypadku jabłek odmiany *Idared* suszonych mikrofalowo-konwekcyjnie wyniosła $39,7$ g $H_2O \cdot 100$ g s.s.⁻¹ a konwekcyjnie – $29,8$ g $H_2O \cdot 100$ g s.s.⁻¹. Taka rozbieżność może wynikać z faktu, że jabłka badane w niniejszej pracy po 72 h nawilżania nie osiągnęły stanu równowagi, na co wskazują krzywe kinetyki adsorpcji tych suszy (rys. 4), jak również ich niższa zawartość wody.

Najwyższą wartość względnego przyrostu masy, istotnie różniącą się od pozostałych suszy, odnotowano w przypadku jabłek suszonych metodą mikrofalowo-konwekcyjną do 50% zawartości wody i dosuszanych konwekcyjnie (MK-K50), osiągających po 72 h wartość 24% ($38,8 \pm 1,7$ g $H_2O \cdot 100$ g s.s.⁻¹). Natomiast pozostałe susze, otrzymane metodą dwustopniową, adsorbowały znacząco mniej wody, nie różniąc się w ujęciu statystycznym od suszu konwekcyjnego oraz mikrofalowo-konwekcyjnego. Maskan (2001) również ustalił, że możliwe jest także uzyskanie lepszej odtwarzalności kiwi suszonego przy wykorzystaniu metody dwustopniowej (konwekcyjnej z dosuszaniem mikrofalowym), w porównaniu z procesami jedno-stopniowymi. Jabłka suszone mikrofalowo-konwekcyjnie do 50% zawartości wody (MK-K50) charakteryzowały się jednocześnie najwyższą początkową zawartością wilgoci (tab. 1) oraz najwyższą wytrzymałością mechaniczną (rys. 2 i 3). Analiza właściwości tej tkanki wymaga jednak dalszych badań uwzględniających m.in. zjednięcia mikrostruktury. Z kolei maksymalna siła oraz praca cięcia pozostałych ja-

blęć suszonych dwustopniowo były na zbliżonym poziomie. Potwierdza to istotna statystycznie wartość współczynnika korelacji Pearsona pomiędzy przyrostem masy podczas adsorpcji pary wodnej a maksymalną siłą cięcia ($r = 0,745$) oraz pomiędzy względnym przyrostem masy a pracą cięcia ($r = 0,592$).



Rys. 4. Kinetyka adsorpcji pary wodnej przez jabłka suszone jednostopniowo: konwekcyjnie (K) i mikrofalowo-konwekcyjnie (MK) oraz dwustopniowo (K-MK, MK-K)

Fig. 4. Adsorption kinetics of water vapour by apples dried using one-stage drying: convective (K) and microwave-convective (MK) and two-stage drying (K-MK, MK-K)

Wykorzystując suszenie dwustopniowe możliwe jest otrzymanie suszu o twardej teksturze i wysokiej higroskopijności, a zatem i dobrej odtwarzalności. Niemniej jednak, wybór odpowiedniej kombinacji suszenia dwustopniowego podyktowany jest dalszym przeznaczeniem produktu. Z racji odmiennych właściwości teksturalnych oraz higroskopijnych w zależności od zastosowanej kombinacji suszenia, możliwe jest szerokie wykorzystanie otrzymanych suszy, bądź w formie przekąski lub też jako składników koncentratów spożywczych, z przeznaczeniem do szybkiego odtwarzania. Możliwe jest zatem projektowanie cech suszu poprzez modyfikację konwencjonalnych procesów, jednak wymaga to dalszych badań, określających właściwości produktu w zależności od zastosowanych parametrów suszenia.

WNIOSKI

1. Suszenie dwustopniowe mikrofalowo-konwekcyjne z dosuszaniem konwekcyjnym oraz konwekcyjne z dosuszaniem mikrofalowo-konwekcyjnym umożliwiło skrócenie czasu suszenia od 14 do 29%, w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym.

2. W wyniku zastosowania suszenia dwustopniowego wytrzymałość mechaniczna jabłek była większa, a właściwości sorpcyjne w większości eksperymentów były zbliżone do właściwości suszy otrzymanych metodą jednostopniową: konwekcyjną lub mikrofalową.

3. Najwyższą maksymalną siłą i pracą cięcia, jak również najwyższą higroskopijnością, charakteryzował się susz podsuszany metodą mikrofalowo-konwekcyjną i dosuszany konwekcyjnie od 50% zawartości wody (MK-K50).

4. Suszenie dwustopniowe, łączące technikę mikrofalowo-konwekcyjną oraz konwekcyjną, umożliwia projektowanie właściwości mechanicznych oraz sorpcyjnych produktów.

PIŚMIENNICTWO

- Andrés A., Bilbao C., Fito P., 2004. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, 63, 71-78.
- Chou S.K., Chua K.J., 2001. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science and Technology*, 12(10), 359-369.
- GUS., 2011. *Rocznik Statystyczny Rolnictwa*. Warszawa.
- Jakubczyk E., Lewicki P.P., 2002. Wpływ metody suszenia na właściwości mechaniczne i strukturę suszów jabłkowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 486, 435-440.
- Kowalski S.J., Rajewska K., 2009. Effectiveness of hybrid drying. *Chemical Engineering and Processing*, 48, 1302-1309.
- Labuza T., Roe K., Payne C., Panda F., Labuza T.J., Labuza P. S. Krusch L., 2004. Storage stability of dry food systems: influence of state changes during drying and storage. *XIV International Drying Symposium. Proceedings, Ourograf Gráfica e Editora, São Paulo*, vol. A, 48-68.
- Lewicki P.P., Jakubczyk E., 2004. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, 64, 307-314.
- Marzec A., Kowalska H., Zadrozna M., 2010. Analysis of instrumental and sensory texture attributes of microwave-convective dried apples. *Journal of Texture Studies*, 41, 417-439.
- Marzec A., Pasik S., 2008. Wpływ metody suszenia na właściwości mechaniczne i akustyczne suszy marchwiowych. *Inżynieria Rolnicza* 1(99), 291-296.
- Maskan M., 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwi fruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177-182.
- Namsanguan Y., Tia W., Devahastin S., Soponronnarit S., 2004. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes. *Drying Technology*, 22(4), 759-778.
- Nowacka M., Witrowa-Rajchert D., 2010. Zmiany właściwości higroskopijnych suszy jabłkowych w czasie przechowywania. *Acta Agrophysica*, 15(2), 359-370.
- Rowicka R., Nowak D., Lewicki P. P., 2002. Wpływ aktywności wody na właściwości mechaniczne kostek jabłka suszonych sublimacyjnie. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 9(1), 66-78.
- Rząca M., Witrowa-Rajchert D., 2010: Wpływ metody suszenia na wybrane właściwości fizyczne suszonej tkanki roślinnej. Wpływ procesów technologicznych na właściwości materiałów i surowców roślinnych. *Monografia Wydawnictwa Naukowego FRNA, Komitet Agrofizyki PAN, Lublin*, 9-18.
- Schiffmann R.F., 2006. *Microwave and Dielectric Drying*. In: *Handbook of Industrial Drying*, 3rd Edition (ed. A. S. Mujumdar), CRC Press, New York, pp. 285-305.

- Vadivambal R., Jayas D. S., 2007. Changes in quality of microwave-treated agricultural products – a review. *Biosystems Engineering*, 98, 1-16.
- Witrowa-Rajchert D., 1999. Rehydracja jako wskaźnik zachodzących w tkance roślinnej w czasie suszenia. Wydawnictwo Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa.
- Witrowa-Rajchert D., Rząca M., 2009. Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. *Drying Technology*, 27, 903-909.
- Xu Y., Zhang M., Mujumdar A.S., Duan X., Sun J., 2006. A two-stage vacuum freeze and convective air drying method for strawberries. *Drying Technology*, 24, 1019-1023.
- Xu Y., Zhang M., Tu D., Sun J., Zhou L., Mujumdar A.S., 2005. A two-stage convective air and vacuum freeze-drying technique for bamboo shoots. *International Journal of Food Science and Technology*, 40, 589-595.

MECHANICAL AND SORPTION PROPERTIES OF TWO-STAGE DRIED APPLES

*Magdalena Śledź, Małgorzata Nowacka, Artur Wiktor, Magdalena Selke,
Dorota Witrowa-Rajchert*

Department of Food Engineering and Process Management, Faculty of Food Sciences,
Warsaw University of Life Sciences,
ul. Nowoursynowska 159c, 02-776 Warszawa
e-mail: magdalena_sledz@sggw.pl

Abstract. The purpose of the study was the analysis of texture and the water adsorption properties of two-stage dried apples: microwave-convective with convective finishing drying method, and convective with microwave-convective finishing drying technique. In the first stage apples with a water content of 30 or 50% were obtained, afterwards they were dried in the second stage until equilibrium water content was reached. Convective drying was carried out at the temperature of 70°C and air velocity 2.5 m s⁻¹, while during microwave-convective drying the following parameters were applied: microwave power 300 W, air temperature 40°C and air velocity 3.5 m s⁻¹. In order to analyse the mechanical properties, the cutting test was performed. Sorption properties were determined based on the mass changes of dried apples kept for 72 hours in an exsiccator over saturated NaCl solution (in an environment with $a_w = 0.75$). The method of two-stage drying significantly influenced the mechanical and sorption properties of apples. The maximum cutting force and cutting work fell in ranges of 159-222 N and 178-290 mJ, respectively. The relative mass gain after 72 hours amounted to 11-24%, depending on the drying method. The highest values were obtained for microwave-convective dried apples with convective finishing drying from 50% of water content. In turn, materials dried using the convective technique and the microwave-convective with convective finishing drying method (from 30% of water content) were characterised by significantly lower values of maximum cutting force and cutting work, as well as value of water vapour adsorption.

Keywords: apple, two-stage drying, microwave-convective drying, convective drying, mechanical properties, sorption properties