

RENATA ROWICKA, DOROTA NOWAK, PIOTR P. LEWICKI

WPLYW AKTYWNOŚCI WODY NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE KOSTEK JABŁKA SUSZONYCH SUBLIMACYJNIE

Streszczenie

Celem pracy było określenie wpływu aktywności wody na właściwości reologiczne kostek jabłka suszonych sublimacyjnie. Suszone kostki jabłka były przechowywane w środowiskach, których aktywność wody wynosiła 0,328; 0,432; 0,648 i 0,810. Po zadanim okresie przechowywania poddawano je testowi kompresji–relaksacji. Stwierdzono, że aktywność wody w istotny sposób kształtowała właściwości mechaniczne liofilizowanych jabłek. Podwyższona aktywność wody działała uplastyczniająco na badany materiał i powodowała załamanie jego struktury. Wraz ze wzrostem aktywności wody malała praca potrzebna do odkształcenia kostek jabłka o 50% ich wysokości, zmniejszała się siła niezbędna do odkształcenia materiału, malał udział elementu sprężystego we właściwościach mechanicznych oraz zmniejszała się twardość materiału. W przedziale aktywności wody 0,45–0,55 relaksacja zachodziła najszybciej i w największym stopniu.

Wstęp

Jakość produktów spożywczych jest związana z ich właściwościami reologicznymi, istotnie wpływającymi na ocenę tekstury. Dla konsumenta tekstura produktów żywnościowych jest istotną częścią ich jakości, stawianą na ogół na drugim miejscu po smakowitości, a w niektórych przypadkach nawet decydującą o wyborze produktu. Dla wytwórcy zaś tekstura surowca jest miernikiem uzyskania dojrzałości przerobowej, wskaźnikiem standardowości wyrobu w kontroli jakości, istotnym elementem w projektowaniu rozwiązań technicznych maszyn i urządzeń produkcyjnych, transportowych oraz ich przydatności eksploatacyjnej. Z powyższych względów istotna jest zna-

jomość parametrów procesów przetwórczych i warunków przechowywania, które zachowują lub pozwalają uzyskać teksturę pożądaną przez konsumenta.

Jabłko jako produkt żywnościowy, to wieloskładnikowy i wielofazowy układ zawierający molekuly proste i polimery. Składniki chemiczne jabłka są ze sobą ściśle powiązane i tworzą wewnętrzną strukturę materiału. Jędrność i sztywność tkanek roślinnych zależą od właściwości reologicznych ścian komórkowych, błon i membran, a także relacji pomiędzy fazą stałą, ciekłą i gazową. Właściwości jabłek wynikają między innymi z ich odmiany, dojrzałości, nawożenia i okresu zbioru.

Reologiczne właściwości jabłka suszonego są ściśle związane z zawartością wody. Surowe jabłko jest ciałem lepko-sprężystym i im więcej wody jest z niego usunięte w trakcie suszenia tym staje się ono bardziej plastyczne [4]. Wzrost plastyczności materiału jest spowodowany usunięciem części cieczy z matrycy ciała stałego, rozerwaniem matrycy i zastąpieniem wody przez powietrze. Jakubczyk i wsp. [3] wykazali wpływ aktywności wody na właściwości mechaniczne suszonych jabłek. Wzrost a_w suszów powodował mniejszą odporność na odkształcenie. Ponadto przy $a_w = 0,11$ zauważono obecność stanu szklistego i utwardzenie struktury materiału suszonego sublimacyjnie.

Proces suszenia sublimacyjnego polega na usuwaniu wody z zamrożonego produktu. Parametry suszenia muszą zapewniać właściwe warunki do sublimacji, czyli przejścia lodu w stan pary, z pominięciem stanu ciekłego. Zamrażanie i suszenie to główne etapy liofilizacji, które kształtują właściwości uzyskanego suszu. Już w pierwszym etapie struktura materiału jest niszczone przez powstające kryształy lodu. W trakcie suszenia następuje sublimacja kryształów lodu, a w ich miejsce powstają puste pory. Suszenie zmienia strukturę materiału, jego skład i stopień uporządkowania składników. W wyniku usunięcia wody, zniszczenia naturalnej struktury, utraty półprzepuszczalności błon ulegają również zmianie właściwości reologiczne. Stwierdzono, że w miarę obniżania zawartości wody produkty zmieniają swoje właściwości ze sprężysto-plastyczno-lepkich w kierunku ciał kruchych [8]. Podczas suszenia znacznemu obniżeniu ulega wytrzymałość mechaniczna, co jest spowodowane zniszczeniem struktury wewnętrznej, denaturacją termiczną związków wielkocząsteczkowych oraz plazmolizą komórek. Utrata jędrności w wyniku utraty turgoru komórki oraz niższa zawartość wody prowadzą do obniżenia wytrzymałości materiału [6].

Woda wpływa na przebieg wielu procesów i reakcji, które determinują jakość i stabilność przechowalniczą żywności. O możliwości przebiegu tych procesów i reakcji decyduje stan wody w żywności charakteryzowany przez jej aktywność. Właściwości reologiczne produktów liofilizowanych są szczególnie zależne od aktywności wody, ze względu na ich porowatość i łatwą adsorpcję wody. Znajomość wpływu aktywności wody na właściwości reologiczne produktów liofilizowanych może być przydatna nie

tylko do optymalizacji procesu suszenia sublimacyjnego, ale także do projektowania właściwości gotowego produktu.

Celem pracy było określenie wpływu aktywności wody na właściwości reologiczne kostek jabłka suszonych sublimacyjnie.

Materiał i metody badań

Materiał do badań stanowiły jabłka odmiany Idared przechowywane w temperaturze 4°C, przy wilgotności 80–90%. Krojono je w kostkę o boku 1 cm, po czym układano na półkach i mrożono owiewowo w temperaturze –30°C przez ok. 2 godziny. Następnie materiał suszono sublimacyjnie w liofilizatorze ALPHA 1-4 firmy Christ, przy ciśnieniu 22 Pa i temperaturze płyt grzejnych 15°C przez ok. 20 godzin. Po tym czasie obniżano ciśnienie do 16 Pa i podwyższano temperaturę płyt do 30°C i w takich warunkach pozostawiano materiał w liofilizatorze na 2 godziny w celu dosuszenia. Wysuszony produkt pakowano w torebki i przechowywano przez 2–3 dni w eksykatorze zawierającym bezwodny CaCl₂, w celu wyrównania zawartości wody.

Po 20 kostek danego produktu umieszczano na szalkach Petriego, ważono i wstawiano do eksykatorów zawierających nasycone roztwory soli, w których panowała wilgotność względna powietrza: 32,8; 43,2; 64,8 i 81,0%. Po zadanych okresach czasu próbki wyjmowano z eksykatorów, ważono i poddawano testowi kompresja-relaksacja w analizatorze tekstury TA XT2 firmy Stable Micro Systems. Badanie polegało na ścisaniu próbek materiału pomiędzy dwoma równoległymi płytkami, z których jedna była nieruchoma, a druga poruszała się ze stałą prędkością 0,2 mm/s. Próbki materiału ścisano do 50% odkształcenia ich wysokości i obserwowano zmiany siły podczas ścisania i relaksacji trwającej 60 sekund. Testowi ścisania i relaksacji poddawano kostki bezpośrednio po suszeniu oraz po przechowywaniu w środowiskach o określonej aktywności wody po odpowiednich okresach. Badania te wykonano w 10 próbach. Po teście mierzono aktywność wody poszczególnych próbek w urządzeniu AQUA Lab CX-2 firmy Decagon Devices, Inc. Mierzono również aktywność wody materiału suchego. Pomiaru te przeprowadzano w dwóch powtórzeniach.

Charakterystyki opisujące własności mechaniczne kostek jabłka obliczano z następujących równań:

- naprężenie

$$\delta = \frac{F}{s} \cdot 10000$$

gdzie: δ – naprężenie, Pa; F – siła, N; s – pole przekroju poprzecznego kostki, cm²

- odkształcenie względne

$$\varepsilon_w = \frac{h_o - h}{h_o}$$

gdzie: ε_w – odkształcenie względne próbki; h_0 – wysokość boku kostki materiału nie-odkształconego, cm; h – wysokość boku kostki materiału po odkształceniu, cm

- odkształcenie rzeczywiste

$$\varepsilon = -\ln(1 - \varepsilon_w)$$

gdzie: ε – odkształcenie rzeczywiste

- krzywą pełzania

$$F = A \cdot \varepsilon_w^n$$

Wartości współczynników A i n krzywych ściskania wyliczono w zakresie odkształceń od 0 do 0,1.

- krzywą relaksacji zlinearyzowano zgodnie z Pelegiem [7]:

$$\frac{F_o \cdot t}{F_o - F_{(t)}} = k_1 + k_2 \cdot t$$

gdzie: F_o – początkowa siła relaksacji, N; t – czas trwania relaksacji, s; $F_{(t)}$ – siła relaksacji po czasie t , N; k_1 , k_2 – współczynniki relaksacji

Pracę ściskania wyznaczano jako pole pod krzywą w układzie siła-czas, przeliczając na objętość 1 cm³ próbki po suszeniu [mJ/cm³].

Przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji, aby wykazać istotność wpływu aktywności wody na wartości: siły maksymalnej, pracy ściskania, współczynników A i n . Posłużono się w tym celu programem Table Curve 2D firmy Jandel Scientific.

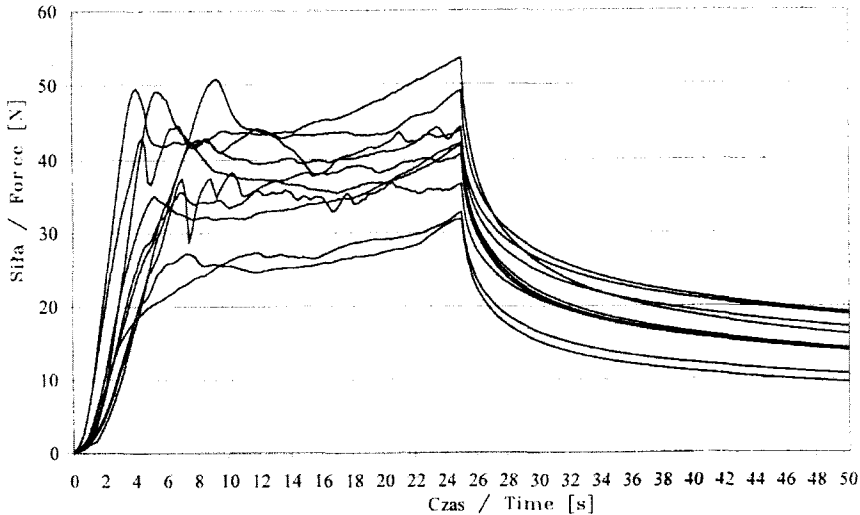
Wyniki i dyskusja

Kompresja

Charakterystyka krzywych ściskania

W wyniku suszenia sublimacyjnego w kostkach jabłka zmniejszyła się zawartość wody z 84,24% (5,34 g H₂O/g s.s.) do 5,16% (0,05 g H₂O/g s.s.). Aktywność wody uzyskanego suszu wynosiła 0,183. Test ściskania takiego produktu uwidocznił duże jego zróżnicowanie, co przejawiało się w odmiennym przebiegu krzywych ściskania poszczególnych kostek (rys. 1). Zjawisko to było najbardziej zauważalne w przypadku jabłka suchego. Można stwierdzić, że każda z kostek poddawanych testowi kompresji reprezentowała pod względem właściwości mechanicznych nieco odmienny materiał. Badania Lewickiego i wsp. [4] potwierdziły heterogeniczność jabłka jako tkanki roślinnej, z punktu widzenia wytrzymałości mechanicznej. Suche kostki jabłka jako jedyne wykazywały wewnętrzne pęknięcia podczas kompresji, a tym samym były mate-

riałem kruchym. Wzrost aktywności wody powodował zwiększenie udziału elementu plastyczno-lepkiego oraz mniejszą rozbieżność w odpowiedzi produktu na działającą siłę. Krzywe ściskania miały podobny przebieg, co spowodowane było ujednocnieniem się materiału. Przy aktywności wody równej 0,703 krzywe ściskania biegły niemal równoległe do siebie (rys. 2).

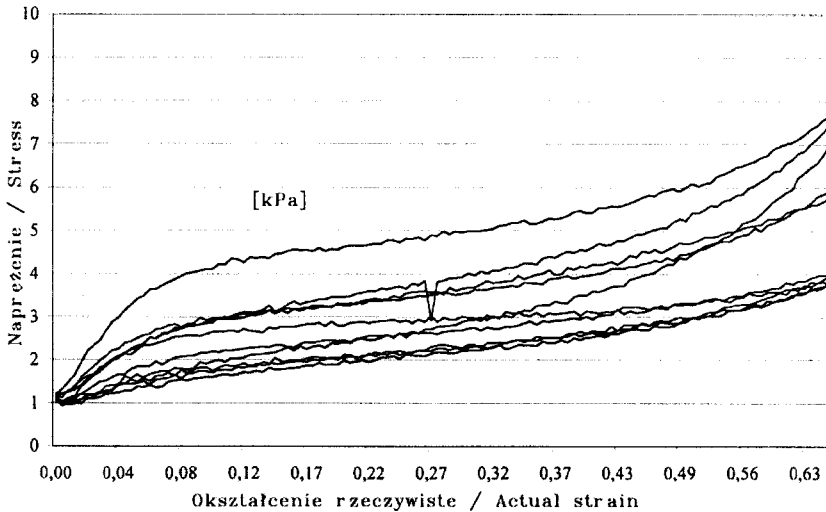


Rys. 1. Krzywe kompresji-relaksacji suchego jabłka, $a_w = 0,183$.

Fig. 1. Compression-relaxation curves of freeze-dried apple, $a_w = 0.183$.

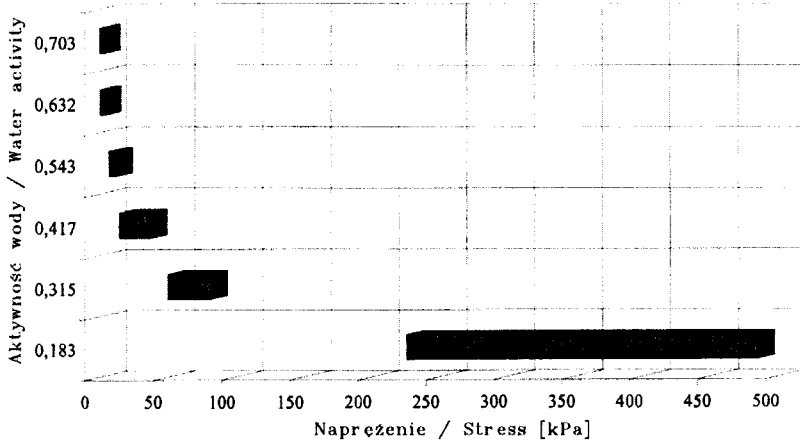
Na rys. 3. przedstawiono rozrzut wartości naprężenia w funkcji aktywności wody, przy odkształceniu rzeczywistym równym 0,25. Jak wynika z wykresu, im wyższa aktywność wody tym mniejszy rozrzut wartości naprężenia wywołanego w kostce. Obserwowano również, że przy niższych aktywnościach wody rozrzut wyników zmieniał się w sposób znaczący, natomiast po przekroczeniu aktywności wody równej 0,5 zmiany te były niewielkie.

Analizując przebieg krzywych kompresji (rys. 2) można w nich wyróżnić 3 etapy. Przy każdej aktywności wody i w odniesieniu do każdej kostki jabłka podział na 3 etapy ma miejsce przy innym odkształceniu. W pierwszym etapie następowało niszczenie struktury kostki jabłka i jej odkształcanie. Na wykresach obserwowano szybki wzrost naprężeń przy nieznacznym odkształceniu materiału. Następnie w przebiegu krzywych ściskania obserwowano drugi etap, w którym następowało upakowywanie (zagęszczanie) zniszczonej struktury materiału. W większości przypadków obrazuje to niemal płaski przebieg krzywych. Dalsze odkształcanie kostek jabłka odbywało się przy ponownym wzroście naprężeń. W tym etapie następowało dalsze odkształcanie zagęszczonego materiału.



Rys. 2. Krzywa ściskania kostek jabłka, $a_w = 0,703$.

Fig. 2. Compression curves of freeze-dried apple cubes, $a_w = 0.703$.



Rys. 3. Rozrzut wartości napężenia przy odkształceniu równym 0,25 w funkcji aktywności wody.

Fig. 3. Spread of stress values at deformation equal to 0.25 in water activity function.

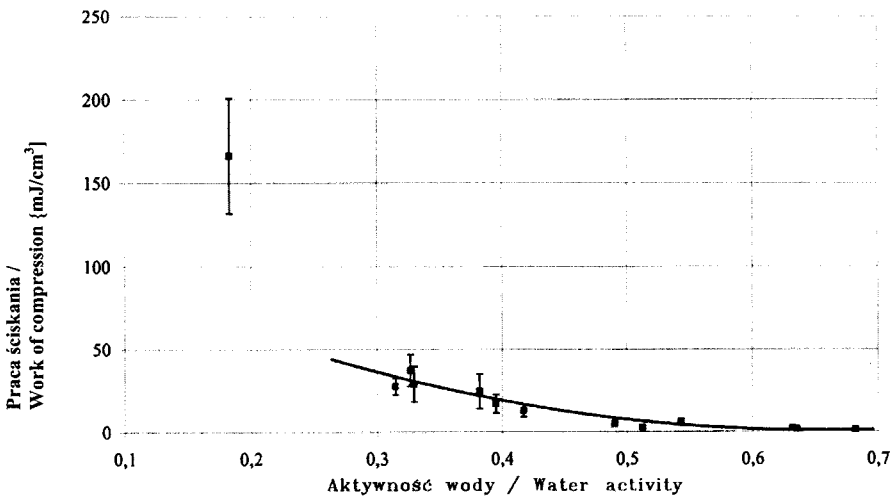
Wraz ze wzrostem aktywności wody zmniejszała się wartość napężenia w kostkach poddanych odkształcaniu. Wartość maksymalnego napężenia przy odkształceniu rzeczywistym równym 0,5 i aktywności wody 0,183 wynosiła 492,97 kPa, przy $a_w = 0,315$ $\delta = 94,26$ kPa, a przy aktywności wody $a_w = 0,632$ napężenie rzeczywiste wy-

nosiło jedynie 5,14 kPa. Zaobserwowano również, że ze wzrostem aktywności wody zmiany naprężeń w kostkach były coraz mniejsze.

Wpływ aktywności wody na pracę odkształcania

Wpływ aktywności wody na pracę ściskania ($W_{\text{śc}}$) wyrażoną w mJ/cm^3 przedstawiono na rys. 4. Praca ściskania badanych kostek jabłka zawierała się w zakresie od $1,29 \pm 0,58$ do $37,41 \pm 9,35 \text{ mJ}/\text{cm}^3$ przy aktywnościach wody odpowiednio 0,682 i 0,327. Przebieg krzywej ściskania w układzie $a_w - W_{\text{śc}}$ miał charakter malejąco-wklęsły. Uzyskane wyniki wykazały, że im wyższa była aktywność wody, tym mniejsza była praca odkształcania badanych próbek.

Linie trendu na rys. 4. wyznaczono na podstawie 12 punktów pomiarowych. Ponieważ każdy punkt reprezentuje średnią z 10 powtórzeń wraz z odchyleniem standardowym, przeprowadzono analizę wariancji przy 118 stopniach swobody. Potwierdziła ona silną korelację pomiędzy pracą odkształcenia próby o 50% i aktywnością wody.

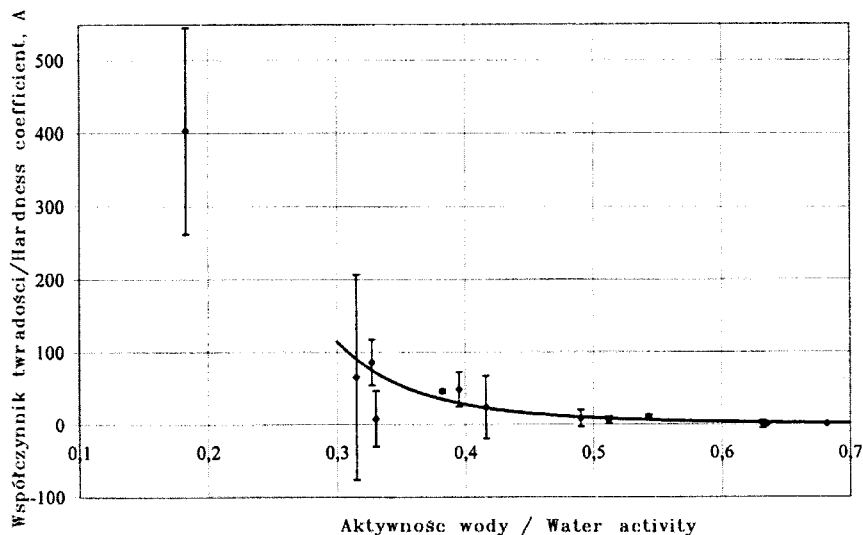


Rys. 4. Wpływ aktywności wody na pracę ściskania.

Fig. 4. Influence of water activity on work of compression.

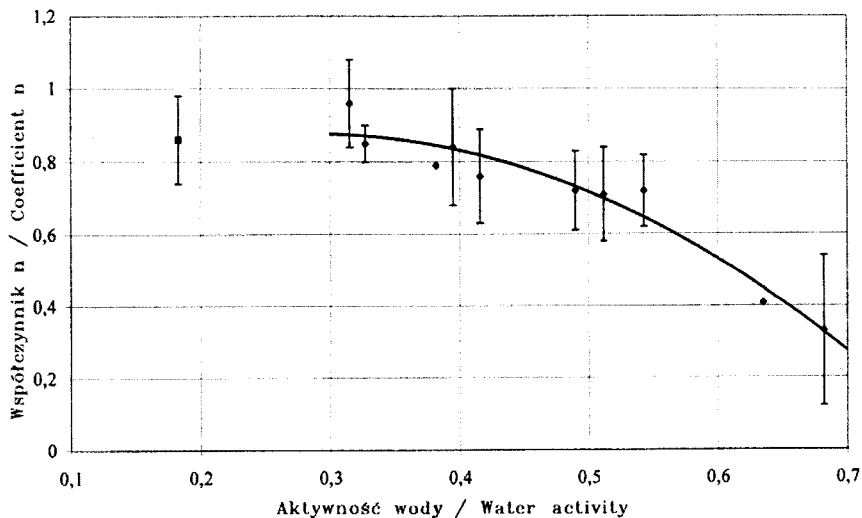
Współczynniki A i n krzywej pełzania

Wpływ aktywności wody na przebieg ściskania analizowano na podstawie wartości współczynników A i n , gdzie A jest miarą twardości badanych próbek, a n wskazuje na udział cech sprężystych we właściwościach mechanicznych materiału. Wartości współczynników A i n wyznaczono w zakresie odkształcenia rzeczywistego równego 0–0,1, czyli tylko w pierwszym etapie ściskania, w którym następuje niszczenie struktury kostek jabłka liofilizowanego.



Rys. 5. Zmiany współczynnika A przy odkształceniu kostek równym 0,1 w zależności od aktywności wody.

Fig. 5. Effect of water activity on coefficient A at strains lower than 0.1.



Rys. 6. Zmiany współczynnika n przy odkształceniu kostek równym 0,1 w zależności od aktywności wody.

Fig. 6. Effect of water activity on coefficient n at strains lower than 0.1.

Wzrost aktywności wody powoduje zmniejszenie wartości współczynnika twardości. Krzywa obrazująca zależność $A = f(a_w)$ miała charakter malejąco - wklęsły (rys. 5). Maksymalna twardość jabłka wynosiła $86,07 \pm 38,34$ N, przy aktywności wody równej 0,327, przy czym twardość jabłka bezpośrednio po suszeniu była równa $403,39 \pm 141,46$ N.

Przy 50% odkształcaniu wysokości wartość współczynnika n kształtowała się w przedziale od $0,33 \pm 0,06$ do $0,96 \pm 0,05$ (rys. 6). Zależność $n = f(a_w)$ kostek jabłka miała charakter malejąco-wypukły. Oznacza to, że ze wzrostem aktywności wody następowało zmniejszanie udziału elementu sprężystego we właściwościach mechanicznych kostek jabłka. Tym samym w jabłku zaczęły przeważać właściwości plastyczno-lepkie.

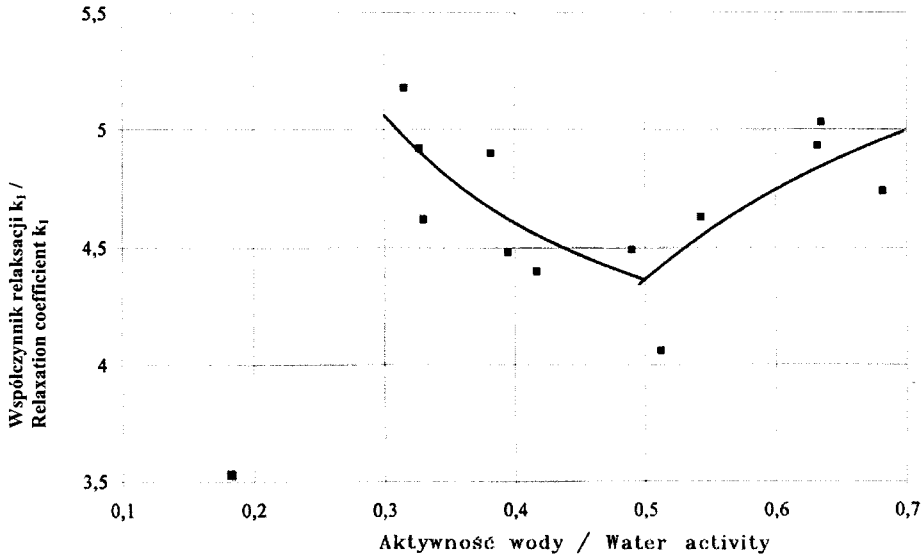
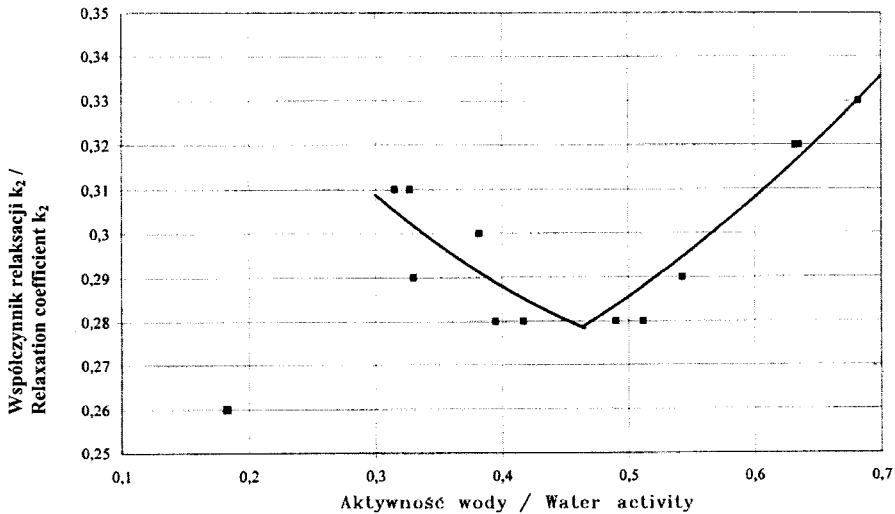
Charakterystyka wpływu aktywności wody na przebieg relaksacji

Jak wynika z przeprowadzonych badań kostki jabłka suszonego sublimacyjnie wykazały zupełnie inny charakter w czasie kompresji, niż w czasie relaksacji. Krzywe ściskania przedstawiają materiał heterogeniczny, podczas gdy z przebiegu krzywych relaksacji wynika, że heterogeniczność materiału była znacznie mniejsza. Ujednocianie się materiału następowało pod wpływem jego odkształcania, które powodowało niszczenie wewnętrznej struktury materiału. W rezultacie testowi relaksacji poddawana była kostka o zupełnie innych właściwościach niż ta poddawana testowi kompresji. Odzwierciedliło się to w podobnym przebiegu krzywych relaksacji próbek jabłka przy poszczególnych aktywnościach wody (rys. 1).

Wpływ aktywności wody na przebieg relaksacji analizowano na podstawie współczynnika k_1 charakteryzującego początkową szybkość relaksacji oraz współczynnika k_2 określającego część naprężenia, która uległa relaksacji. Relaksację prowadzono w czasie równym 60 sekund. Im niższa wartość współczynników k_1 i k_2 , tym odpowiednio szybkość relaksacji siły była większa i tym większą część odkształcenia materiał relaksował.

Współczynnik k_1 jabłka osiągnął minimum przy aktywności wody około 0,5 (rys. 7). Oznacza to, że przy tej aktywności wody szybkość relaksacji była największa. Zarówno poniżej, jak i powyżej tej wartości a_w szybkość relaksacji maleje.

Wielkość współczynnika k_2 kształtowała się w zakresie 0,28–0,33. Współczynnik k_2 osiągnął minimum ponownie w pobliżu aktywności wody 0,5 (rys. 8). Oznacza to, że przy tej aktywności wody w dużym stopniu zachodziła relaksacja materiału.

Rys. 7. Zależność współczynnika relaksacji k_1 od aktywności wody.Fig. 7. Dependence of relaxation coefficient k_1 on water activity.Rys. 8. Zależność współczynnika relaksacji k_2 od aktywności wody.Fig. 8. Dependence of relaxation coefficient k_2 on water activity.

Proces liofilizacji doprowadził do wytworzenia w jabłku nowej struktury. Występują tu stykające się ze sobą ściany komórkowe, przy których gromadzą się pozostałe elementy komórek. Nowo powstałą strukturę cechuje porowatość i obecność dużej ilości powietrza w komórkach i w przestrzeniach między nimi. Na skutek przejścia fazowego ciec – ciało stałe (zamrażanie) powstały produkt zawiera składniki znajdujące się w stanie amorficznym. Jest to stan, w którym produkt jest silnie wrażliwy na obecność wody. Adsorpcja wody przez jabłko prowadzi do załamania jego struktury na skutek upłynniania związków niskocząsteczkowych, głównie cukrów. Znajduje to wyraz we właściwościach mechanicznych jabłka.

Sucha, bardzo porowata matryca charakteryzuje się licznymi pęknięciami ścian komórkowych. Poddanie jej działaniu siły powoduje propagację tych pęknięć i powstawanie nowych. Na krzywej kompresji występuje pierwszy etap odkształcania. Im wyższa zawartość wody w danym materiale tym posiada on mniejszą wytrzymałość i z ciała kruchego staje się stopniowo ciałem lepko-sprężystym. Woda, której zawartość w układzie zwiększa się, może spełniać rolę plastyfikatora. Pod wpływem działającej siły zmniejsza się wówczas podatność ścian komórkowych na pękanie, a jednocześnie coraz łatwiej je odkształcać. Według Lewickiego [5] duża ilość wody działa niczym smar na układ poddawany kompresji. Poszczególne struktury zaczynają się przemieszczać względem siebie. Badania wielu autorów potwierdziły, że dodatek wody może działać uplastyczniająco i ułatwiać deformację produktów. Obniżenie wartości naprężenia, przez wzrastającą aktywność wody Bhandari i wsp. [1] tłumaczą uplastyczniającym działaniem wody oraz obecnością cukrów niskocząsteczkowych. Produkty liofilizowane są szczególnie wrażliwe na działanie wody, ze względu na możliwość szybkiej adsorpcji za sprawą porowatej struktury, a także ze względu na stan amorficzny cukrów, w którym wykazują one silne właściwości higroskopijne. Bonelli i wsp. [2], badając stan amorficzny cukrów uzyskany w wyniku liofilizacji stwierdzili, że obecność niewielkiej ilości wody działa uplastyczniająco na produkt i powoduje załamanie jego struktury. Dalsze odkształcanie materiału wymaga minimalnego nakładu pracy. Układ zaczyna płynąć, co przejawia się w płaskim przebiegu krzywych kompresji. W obecności dużej ilości wody w materiale, struktura układu zostaje zagęszczona niewielkim nakładem pracy. Wraz ze wzrostem aktywności wody maleje twardość badanego produktu.

Pod wpływem wzrostu zawartości wody, w jabłku suszonym sublimacyjnie wzrasta sprężystość poszczególnych ścian komórkowych. Celuloza, będąca ich składnikiem, wykazuje ograniczoną zdolność chłonięcia wody, w przeciwieństwie do pektyn i blaszki środkowej, które intensywnie chłoną wodę i silnie pęcznieją. Odkształcanie kostek jabłka przy niskiej aktywności wody powoduje ograniczone pękanie na skutek deformacji ścian komórkowych. Praca jaką należy wykonać, aby odkształcić kostki o niskiej aktywności wody jest stosunkowo duża. Kształt, jaki posiada materiał po

pierwszym etapie ściskania, utrzymywany jest przez znajdujące się w przestrzennej strukturze nieliczne połączenia ścian komórkowych. Dalsze odkształcanie kostek o zniszczonej strukturze wewnętrznej zachodzi przy niewielkim nakładzie pracy. Następuje zagęszczanie odkształcanej struktury poprzez kompresję i usuwanie z niej powietrza. Jest to drugi etap odkształcania, który można traktować jako upakowywanie materiału pod wpływem przyłożonej siły. W kolejnym etapie zachodzi kompresja zagęszczonej struktury. Ponieważ układ jest już wstępnie zagęszczony, stawia opór, co powoduje, że należy użyć większej siły, aby go odkształcić.

Przemiany stanu amorficznego wpływają również na przebieg relaksacji. Obniżanie tempa relaksacji kostek jabłka przy aktywności wody powyżej 0,5 może wynikać bezpośrednio z upłynniania cukru i innych składników będących w stanie amorficznym.

Podsumowanie

Aktywność wody istotnie wpływa na parametry reologiczne kostek jabłka suszonego sublimacyjnie. Wpływ ten wynika ze zmian struktury i stanu amorficznego, jaki w procesie liofilizacji powstaje w produkcie. Na badany materiał woda działa uplastyczniająco i powoduje załamanie jego struktury wewnętrznej. Zależność naprężenia i pracy ściskania od aktywności wody jest malejąca. Wraz ze wzrostem aktywności wody maleje odporność mechaniczna produktu i zmienia on swój charakter z ciała kruchego w sprężysto-lepkie z dużym udziałem odkształceń plastycznych. W przedziale aktywności wody 0,45 – 0,55 relaksacja materiału zachodzi najszybciej i w największym stopniu.

Literatura

- [1] Bhandari B., Howes T.: Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *J. Food Eng.*, **40**, 1999, 71.
- [2] Bonelli P., Schebor C., Cukierman A., Buera M., Chirife J.: Residual moisture content as related to collapse of freeze-dried sugar matrices. *J. Food Sci.*, **64** (4), 1997, 693.
- [3] Jakubczyk E., Sitkiewicz I., Lewicki P.P.: Mechanical properties of dried apples. *Proceedings of the International Conference of PhD Students. University of Miskolc Press, Miskolc, Hungary, 1997*, 25.
- [4] Lewicki P.P., Lukaszuk A.: Changes of rheological properties of apple tissue undergoing convective drying. *Drying Techn.*, **18** (3), 2000, 707.
- [5] Lewicki P.P.: Właściwości wody w produktach spożywczych. *Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, **24**, 1999, 29.
- [6] Mattea M., Urbicain M., Rotstein E.: Prediction of thermal conductivity of vegetables food by effective medium theory. *J. Food Sci.*, **51** (8), 1986, 113.
- [7] Peleg M.: Characterization of the stress relaxation curves of solid food. *J. Food Sci.*, **44**, 1979, 277.
- [8] Lorentzen J.: Nowe kierunki rozwoju liofilizacji. Nowe metody zagęszczania i suszenia żywności (red. A. Spicer), WNT, Warszawa 1980, 408.

EFFECT OF WATER ACTIVITY ON MECHANICAL PROPERTIES OF FREEZE-DRIED APPLE CUBES

S u m m a r y

The aim of this study was to determine the effect of water activity on rheological properties of freeze-dried apple cubes. Dried product was stored in desiccators with water activity of 0.328; 0.432; 0.648 and 0.810. Following prescribed storage time the cubes were subjected to a compression-relaxation test. It was noted that the water activity significantly affected mechanical properties of lyophilized apples. An increase in water activity caused the increase of plasticity of the analyzed material, which resulted in a compaction of structure. Along with an increase in water activity there was a decrease in the work required for deformation of the apple cubes by 50% of their height, a decrease in the force necessary for the deformation of the material, as well as a decrease in the elasticity factor and a decrease in the hardness of the material. In the water activity range from 0.45 to 0.55 the relaxation of the material was the fastest and at the highest degree. ❖