

KAROLINA SIUCIŃSKA, BARBARA DYKI, ALEKSANDRA MURGRABIA,
PIOTR M. PIECZYWEK, DOROTA KONOPACKA

OCENA ZMIAN STRUKTURY SUSZONEJ TKANKI WIŚNI PODDANEJ WSTĘPNIE OBRÓBCE OSMOTYCZNEJ WSPOMAGANEJ ULTRADŹWIĘKAMI

Streszczenie

Celem pracy było określenie wpływu oddziaływania ultradźwięków na strukturę wewnętrzną owoców wiśni poddawanych obróbce osmotycznej i suszeniu. Owoce wiśni odmiany 'Nefris' odwadniano w 60-procentowym roztworze sacharozy przez 120 min (40 °C), w łaźni wodnej wyposażonej w przetwornik ultradźwiękowy (25 kHz, 0,4 W/cm²) i platformę wytrząsającą (30 rpm). Całkowity czas obróbki osmotycznej wynosił 120 min, w trakcie którego zastosowano różne warianty czasu traktowania ultradźwiękami (ang. *ultrasound* – US) i wytrząsania (ang. *shaking* – S). W pierwszej kolejności próbki traktowano US przez 0, 30, 60, 90 lub 120 min, po czym wytrząsano (S) przez odpowiednio: 120, 90, 60, 30 lub 0 min. Odwodnione owoce poddawano suszeniu konwekcyjnemu. Strukturę suszu osmo-konwekcyjnego owoców odwadnianych oraz surowca analizowano mikroskopowo. Potwierdzono, że zastosowanie ultradźwięków powoduje zmiany struktury tkanek. Dłuższy okres ekspozycji tkanki wiśni na działanie US sprzyjał zmniejszaniu się zwartości komórek bezpośrednio sąsiadujących z epidermą. Jednocześnie obserwowano zwiększanie deformacji komórek miąższu dośrodkowego i zanikanie przestrzeni międzykomórkowych. Najbardziej ujednoczoną strukturą (komórki najmniej wydłużone i komórki okrągłe) charakteryzowały się wysuszone owoce poddane obróbce osmotycznej i równocześnie poddane przez 60 min: oddziaływaniu US i wytrząsaniu (60US+60S), co wskazuje na istnienie optymalnego stanu sprzyjającego redukcji naprężenia wewnętrznego. Suszenie konwekcyjne powoduje znaczny skurcz tkanki. W owocach suszonych, które nie były poddane działaniu ultradźwięków, ale były wytrząsane przez 120 min (0US+120S), zaobserwowano występowanie wolnych przestrzeni międzykomórkowych na przemian z dużymi zagęszczeniami. Zastosowanie US do 60 min sprzyjało zwiększeniu jednorodności struktury suszonego materiału (wariant optymalny – 60US+60S). Oddziaływanie ultradźwięków powyżej 60 min wyraźnie potęgowało efekt zagęszczania struktury, w związku z czym próbki traktowane US przez 120 min (120US+0S) charakteryzowały się największym skurczem tkanki.

*Mgr inż. K. Siucińska, dr hab. D. Konopacka, Zakład Przechowalnictwa i Przetwórstwa Owoców i Warzyw, Instytut Ogrodnictwa, ul Pomologiczna 18, 96-100 Skierniewice, prof. dr hab. B. Dyki, mgr A. Murgrabia, Zakład Genetyki, Hodowli i Biotechnologii Roślin Warzywnych, Instytut Ogrodnictwa, ul. Konstytucji 3 Maja 1/3, 96-100 Skierniewice, dr inż. P. M. Pieczywek, Zakład Mikrostruktury i Mechaniki Biomateriałów, Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin.
Kontakt: karolina.siucinska@inhort.pl*

Słowa kluczowe: tkanka roślinna, obróbka wstępna, ultradźwięki, suszenie, mikrostruktura

Wprowadzenie

Odwadnianie osmotyczne tkanki roślinnej polega na usuwaniu wody z surowca poprzez umieszczenie go w stężonym roztworze substancji osmoaktywnej na określony czas. Dzięki półprzepuszczalności ścian komórkowych tkanki roślinnej możliwe jest wywołanie dwukierunkowego przepływu masy, to znaczy możliwość równoczesnego usuwania wody oraz wnikania w jej miejsce substancji osmoaktywnej zawartej w roztworze użytym do odwadniania [12]. Zjawisko to może być wykorzystywane w inżynierii żywności, gdyż pozwala kontrolować i modyfikować skład chemiczny, a także walory smakowe żywności [19].

Owoce odwodnione nie są produktem stabilnym. Jedną z metod ich dalszego utrwalania jest suszenie, które prowadzi do usunięcia z nich wody do poziomu zapewniającego trwałość mikrobiologiczną. Zmniejszenie zawartości wody w materiale obniża jej dostępność dla mikroorganizmów, dzięki czemu produkt może być przechowywany przez długi okres bez wyraźnych objawów zepsucia [14]. Coraz większe wymagania dotyczące jakości produktu, dbałości o środowisko, aspektów efektywności/wydajności oraz oszczędności energetycznych powodują, że tradycyjne techniki suszenia i odwadniania nie są już wystarczające i generują potrzebę tworzenia nowych metod [13, 15, 24]. Jedną z nich jest wykorzystanie ultradźwięków. Są to drgania mechaniczne cząstek ośrodka wokół położenia równowagi o częstotliwości powyżej 16 kHz, rozchodzące się w ośrodku w postaci fal sprężystych [1]. Ultradźwięki o wysokiej mocy przy niższej częstotliwości, tj. od 20 do 100 kHz mają zdolność kawitacji polegającej na tworzeniu się, powiększaniu i zanikaniu pęcherzyków zawierających parę danej cieczy, gaz lub mieszaninę parowo-gazową. Zjawisko to najsilniej występuje w warstwie brzegowej, co jest szczególnie ważne w suszarnictwie, gdyż warstwy brzegowe stawiają największy opór w wymianie ciepła i masy. Wykorzystanie energii drgań akustycznych pozwala na intensyfikację wielu procesów, szczególnie tych wymagających wysokich nakładów energetycznych, do których zalicza się suszenie bez znaczącego wzrostu temperatury.

Wspomaganie ultradźwiękowe operacji odwadniania owoców i warzyw jest postrzegane jako efektywny i perspektywiczny sposób intensyfikacji procesów wymiany masy, sprzyjający skróceniu czasu zarówno niezbędnej obróbki wstępnej, jak i etapu suszenia [3, 6, 7, 8, 11, 17, 23]. Oprócz możliwych korzyści energetycznych skrócenie czasu procesu sprzyja lepszemu zachowaniu składników bioaktywnych [22]. Jest to niezmiernie istotne w przypadku owoców i warzyw kolorowych, szczególnie korzystnych dla organizmu człowieka.

Modyfikacja struktury materiałów następuje na skutek mechanicznego oddziaływania ultradźwięków na tkankę poprzez generowanie przez falę akustyczną zagęszczeń i rozrzedzeń ośrodka [9, 18]. Wielu autorów dowiodło wpływu US na mikrostrukturę różnych owoców i warzyw [3, 4, 5, 6, 16], jednak wśród opracowań brak jest danych dotyczących możliwych skutków oddziaływania ultradźwięków na tkankę owoców pestkowych o kulistym kształcie i zróżnicowanej strukturze. W przypadku wiśni przewidywanie oddziaływań mechanicznych: ściana komórkowa – ultradźwięki, jest szczególnie trudne ze względu na zróżnicowanie zawartości i wytrzymałości tkanki w warstwach parenchymy i epidermy.

Celem pracy było określenie wpływu oddziaływania ultradźwięków na strukturę wewnętrzną owoców wiśni poddawanych obróbce osmotycznej i suszeniu.

Material i metody badań

Materiał doświadczalny stanowiły owoce wiśni odmiany 'Nefris' zebrane w optymalnym stadium dojrzałości w sadzie doświadczalnym Instytutu Ogrodnictwa w Dąbrowicach. Umyte i zamrożone owoce przechowywano w temp. $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do czasu przeprowadzenia badań. Z wiśni w stanie zamrożonym usuwano pestki (po uprzednim doprowadzeniu owoców do temp. $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) i poddawano je odwadnianiu osmotycznemu w 60-procentowym roztworze sacharozy, trwającemu w sumie 120 min (w temp. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) w łaźni wodnej (model IS – 50 S, producent Intersonic S.C., Olsztyn) wyposażonej w przetworniki ultradźwiękowe, zamontowane w dnie wanny (25 kHz , $0,4\text{ W/cm}^2$) i platformę wytrząsającą (30 rpm). Stosunek owoców do syropu wynosił 1 : 4. Podczas odwadniania osmotycznego zastosowano różny czas działania ultradźwięków i wytrząsania. Początkowo próbki poddawano sonikacji (US) przez 0, 30, 60, 90 i 120 min, po czym próbki wytrząsano (S) przez: 120, 90, 60, 30 i 0 min, czyli zabiegi następowały po sobie. Odwodnione owoce poddawano suszeniu konwekcyjnemu (temp. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2,5\text{ ms}^{-1}$, 8 h), co umożliwiło uzyskanie produktu o około 20-procentowej zawartości wody. Zawartość suchej masy w materiale po etapie odwadniania osmotycznego i suszenia konwekcyjnego oznaczano metodą wagową [21]. W celu porównania stanu owoców na wszystkich etapach wytwarzania suszu, tj. surowca, owoców odwadnianych oraz suszonych konwekcyjnie, strukturę wewnętrzną tkanek analizowano na przekrojach przygotowanych metodą parafinową. Owoce zatapiano w parafinie, krojono przy użyciu mikrotomu na skrawki o grubości $10\text{ }\mu\text{m}$, barwione następnie safraniną z zielenia jasną. Analizę oraz dokumentację fotograficzną wykonano przy użyciu mikroskopu świetlnego Nikon Eclipse 80i z programem NIS-elements Br do archiwizacji i pomiarów.

Ponadto surowiec i owoce odwadniane, wstępnie utrwalone przez liofilizację, zobrazowano przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego Jeol JSM-35 (anali-

zję wykonano w IMDiK im. Mossakowskiego PAN w Warszawie) [10]. Fragmenty owoców po utrwaleniu w utrwalaczu CrAF, odwadniano w alkoholu i mieszankach z acetonem. Następnie materiał suszono w punkcie krytycznym CO₂ i napyłano złotem. Analizy w SEM udokumentowano fotograficznie.

Analizę ilościową struktury tkanek wiśni z użyciem mikroskopu optycznego prowadzono na utrwalonych preparatach mikroskopowych. Z każdego typu próbki wykonywano w świetle przechodzącym, w jasnym polu widzenia 25 ÷ 45 fotografii. Z uwagi na różną liczbę obrazów uzyskiwanych z każdego wariantu doświadczalnego i sposobu obróbki materiału, do analiz statystycznych, w sposób losowy, wybrano reprezentatywną próbę 2000 obiektów geometrycznych. W wyniku znaczących zmian w strukturze tkanki wiśni oraz częściowego uszkodzenia ścian komórkowych obiekty geometryczne analizowano bez podziału na kategorie. Wszystkie wyselekcjonowane obiekty charakteryzowano za pomocą czterech parametrów geometrycznych: pola powierzchni przekroju, obwodu przekroju, wydłużenia oraz kłistości kształtu [20].

Obliczenia statystyczne wykonano z użyciem pakietu Statistica 10 (StatSoft, Inc., Tulsa, USA). Istotność różnic pomiędzy parametrami geometrycznymi poszczególnych typów próbek szacowano za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA), z testem post hoc Tukeya, na poziomie istotności $p \leq 0,05$.

Wyniki i dyskusja

Wpływ procesu odwadniania na strukturę tkanki wiśni

Odwadnianie osmotyczne prowadzone przez 120 min wpłynęło na zwiększenie zawartości suchej masy w tkance wiśni z 17 do 27 g/100 g śm. Zarówno na etapie obróbki wstępnej, jak i po suszeniu konwekcyjnym, stwierdzono wpływ zastosowanego rodzaju obróbki na strukturę tkanki wiśni (tab. 1).

Niezależnie od sposobu wspomagania procesu odwadniania osmotycznego wszystkie rodzaje obróbki wpłynęły na zmniejszenie pól powierzchni oraz obwodów przekrojów obserwowanych obiektów w stosunku do surowca (tab. 1), co świadczy o skurczu tkanki. W najmniejszym stopniu redukcji uległy pola powierzchni obiektów, gdy tkankę poddano wyłącznie działaniu ultradźwięków przez 120 min. Podobny zakres zmian zaobserwowano również w przypadku wytrząsania próbek przez 120 min, choć różnice nie były statystycznie istotne ($p \leq 0,05$). Zastosowanie mieszanych sposobów obróbki próbek ultradźwiękami (US) i wytrząsaniem (S) wywoływało zmniejszenie wartości parametrów opisujących rozmiary obiektów w badanej strukturze w większym stopniu, niż w przypadku każdego z tych procesów stosowanych osobno, jednak również nie były to różnice statystycznie istotne ($p \leq 0,05$).

Tabela 1. Wartości średnie parametrów geometrycznych wiśni, w zależności od wariantu doświadczenia i sposobu obróbki próbek

Table 1. Mean values of geometric parameters of sour cherry depending on experiment variant and treatment method of samples

Wariant doświadczenia Type of treatment	Rodzaj obróbki wiśni Treatment method of sour cherry	Pole powierzchni Surface area		Obwód Perimeter		Wydłużenie Elongation		Koliistość Circularity	
		\bar{x}	s / SD	\bar{x}	s / SD	\bar{x}	s / SD	\bar{x}	s / SD
		[μm^2]	[μm^2]	[μm]	[μm]	[j.w.]	[j.w.]	[j.w.]	[j.w.]
Obr. wst.	120US+0S	11,4·10 ⁴ a*	54,1·10 ⁴	1191 ^a	2572	0,82 ^b	0,84	0,67 ^a	0,21
Obr. wst.	90US+30S	10,7·10 ⁴ ^a	47,4·10 ⁴	1116 ^a	2221	0,70 ^a	0,66	0,69 ^a	0,20
Obr. wst.	60US+60S	9,3·10 ⁴ ^a	45,7·10 ⁴	1020 ^a	1457	0,72 ^a	0,74	0,69 ^a	0,19
Obr. wst.	30US+90S	8,8·10 ⁴ ^a	43,5·10 ⁴	1086 ^a	2229	0,75 ^a	0,72	0,68 ^a	0,21
Obr. wst.	0US+120S	10,5·10 ⁴ ^a	45,4·10 ⁴	1166 ^a	2413	0,73 ^a	0,74	0,68 ^a	0,21
Susz	120US+0S	3,6·10 ⁴ ^a	13,1·10 ⁴	729 ^{ab}	996	0,75 ^c	0,90	0,72 ^{ab}	0,19
Susz	90US+30S	3,8·10 ⁴ ^a	8,5·10 ⁴	813 ^a	1057	0,66 ^b	0,64	0,69 ^c	0,21
Susz	60US+60S	2,8·10 ⁴ ^a	6,5·10 ⁴	657 ^b	709	0,59 ^a	0,61	0,73 ^a	0,18
Susz	30US+90S	6,1·10 ⁴ ^b	39,2·10 ⁴	774 ^a	1366	0,63 ^{ab}	0,64	0,72 ^a	0,18
Susz	0US+120S	3,5·10 ⁴ ^a	9,9·10 ⁴	735 ^{ab}	827	0,65 ^{ab}	0,65	0,71 ^b	0,19
Surowiec	-	15,6·10 ⁴	66,5·10 ⁴	1311	2242	0,74	0,69	0,66	0,20

Objaśnienia: / Explanatory notes:

Obr. wst. – obróbka wstępna (odwadnianie osmotyczne) / pre-treatment (osmotic dehydration); Susz /Dried material; Surowiec / Raw material.

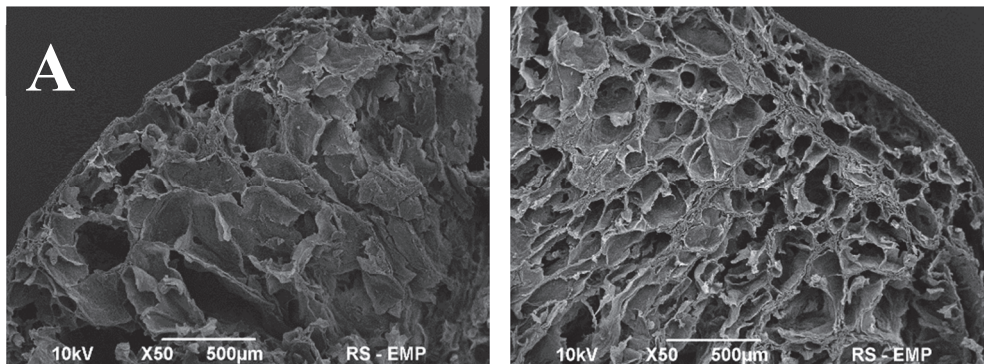
Oznaczenia próbek: / Sample code:

- 120US, 90US, 60US, 30US, 0US – oddziaływanie ultradźwiękami przez [min]: 120, 90, 60, 30, 0 / ultrasound treatment for [min]: 120, 90, 60, 30, 0;

- 0S, 30S, 60S, 90S, 120S – wytrząsanie [min]: / 0, 30, 60, 90, 120 / shaking [min]: 0, 30, 60, 90, 120

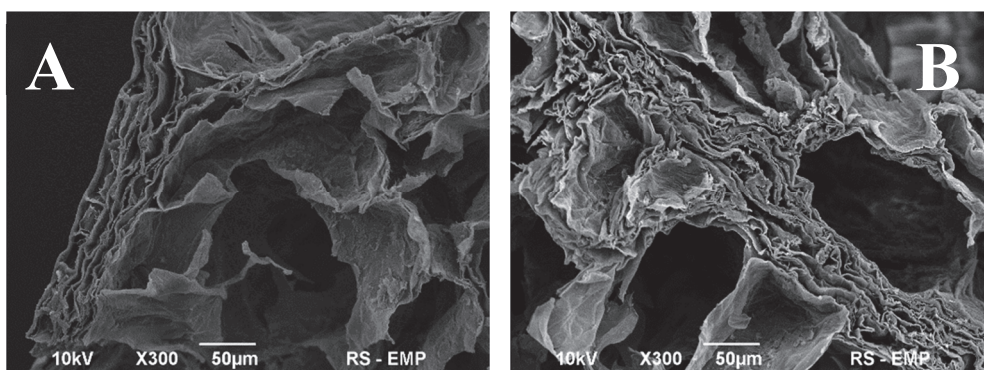
\bar{x} – wartość średnia / mean value; s – odchylenie standardowe / SD – standard deviation; n = 2000

*a, b, c – wartości średnie w kolumnach oznaczone tą samą literą (osobno w obrębie próbek odwadnianych i osobno w obrębie suszu) nie różnią się statystycznie istotnie ($p \leq 0,05$) / mean values in columns and denoted by the same letter (separately among samples being dehydrated and among dried fruits) do not differ statistically significantly ($p \leq 0,05$); Wartości parametrów geometrycznych surowca przedstawiono w tabeli w celu poglądowym / Table show values of geometric parameters of raw material for demonstration purpose.



Fot. 1. Fotografie SEM owoców wiśni, mikrostruktura owoców bez obróbki wstępnej (A) oraz po 120 min odwadniania osmotycznego (B)

Fig. 1. Electron scanning microscopy images of sour cherry, (A) microstructure of fruits without pre-treatment and (B) after 120 min. of osmotic dehydration

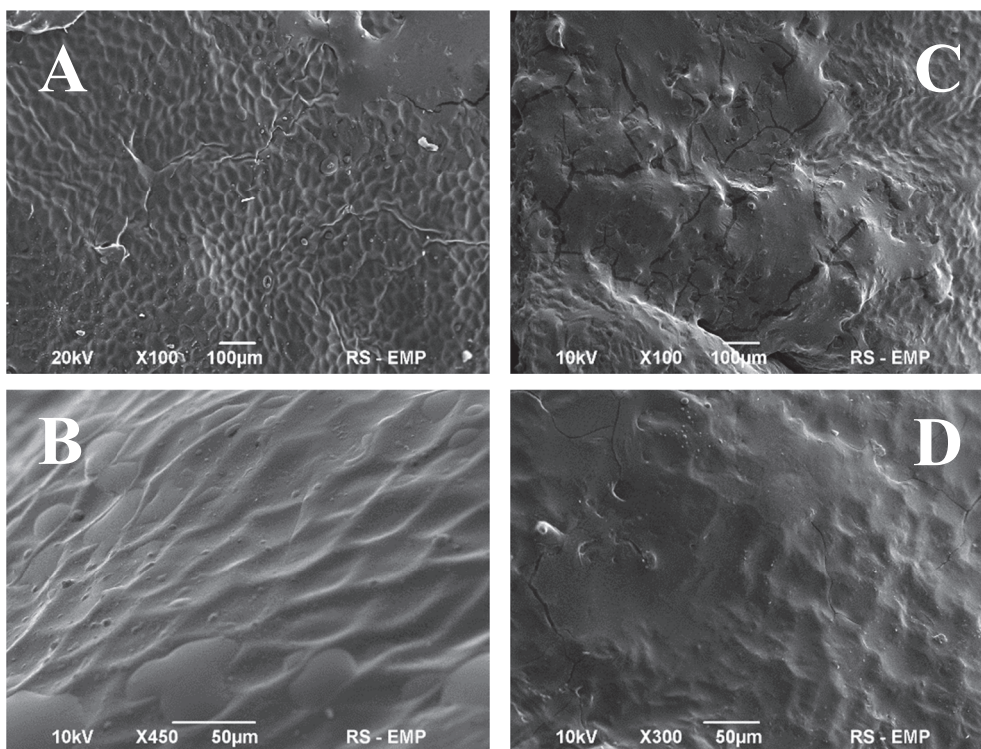


Fot. 2. Mikrostruktura owoców wiśni bez obróbki wstępnej z dobrze zachowaną epidermą i kilkoma warstwami subepidermalnych komórek mięksiszowych (A) i po odwadnianiu osmotycznym przez 120 min (B) (SEM)

Fig. 2. Microstructure of sour cherry fruits without pre-treatment with well-preserved epidermis and few layers of sub-epidermal flesh cells (A) and image (B) after osmotic dehydration for 120 min. (SEM)

Opisane wyżej zmiany struktury tkanki, wynikające z zastosowania obróbki osmotycznej tkanki, zobrazowano z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej (fot. 1 i 2). W porównaniu ze strukturą owocu wiśni bez obróbki wstępnej (fot. 1A), w owocach odwadnianych (fot. 1B) widoczne jest zagęszczenie komórek przy powierzchni skórki. Na fot. 1B i 2B zaobserwować też można zwiększenie grubości ścian komórkowych oraz zmniejszenie pola powierzchni przekroju pojedynczych komórek. Na powierzchni owoców bez obróbki wstępnej (fot. 3A) zauważalne są drobne popęknięcia z nielicznymi obszarami zasklepionymi sokiem komórkowym. Odwadnianie osmotyczne spowodowało, że spękania pogłębiły się, mocniej uwidoczniły i pojawiły się

również na pokrytych sokiem fragmentach epidermy owoców (fot. 3A i 3C). Uporządkowana struktura komórek surowca (fot. 3B) w wyniku odwadniania osmotycznego została zaburzona, a układ komórek widoczny przez skórę stał się mniej regularny (fot. 3D).

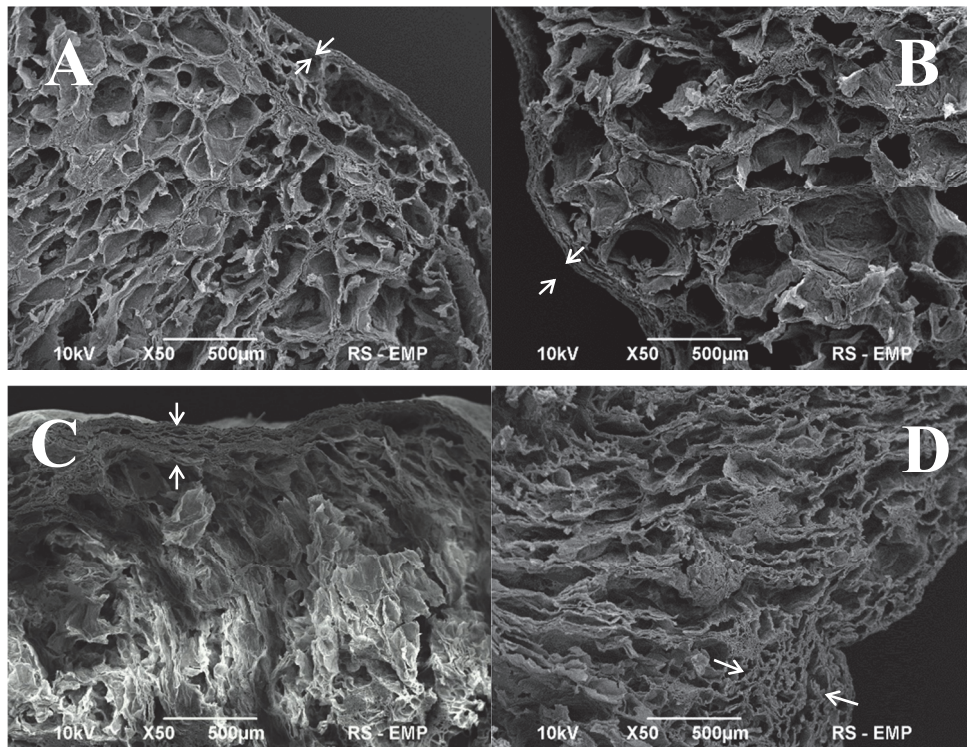


Fot. 3. Fotografie SEM powierzchni owoców wiśni (A, B) bez obróbki wstępnej oraz (C, D) owoców odwadnianych osmotycznie przez 120 min

Fig. 3. Electron scanning microscopy images of surfaces of sour cherry fruits (A, B) without pre-treatment and of fruits osmo-dehydrated for 120 min. (C, D)

Wpływ czasu oddziaływania ultradźwiękami na zmiany struktury owoców po odwadnianiu osmotycznym

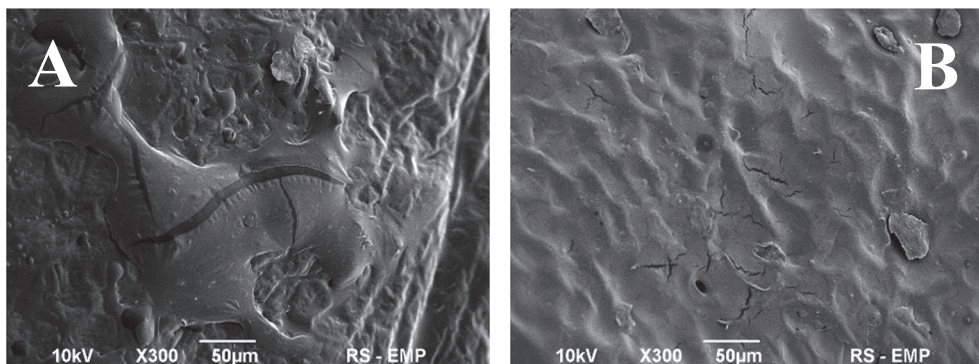
Zastosowanie ultradźwiękowego wspomaganie procesu odwadniania wiśni znacząco wpłynęło na mikrostrukturę owoców odwadnianych. Zastosowanie ultradźwięków przez 60 min ograniczyło zwartość komórek w warstwie przyściennej w porównaniu z owocami odwadnianymi bez tego wspomaganie (co zaznaczono strzałkami na fot. 4A i 4B), a kształt i wielkość komórek wskazują na mniejszą ich deformację w przypadku, gdy zjawisko dyfuzji wspomagano falami akustycznymi.



Fot. 4. Fotografie SEM miąższu wiśni odwodnionego osmotycznie. A – próbka odwadniana bez oddziaływania ultradźwiękami (US), B – odwadnianie wspomagane US przez 60 min, C – US 90 min, D – US 120 min. Strzałkami zaznaczono warstwę komórek epidermy

Fig. 4. Electron scanning microscopy images of sour cherry parenchyma after osmotic dehydration. A – sample being osmo-dehydrated without ultrasound treatment (US), B – osmotic dehydration supported by US for 60 min. C – US for 90 min., D – US for 120 min. Layers of epidermal cells were marked with arrows

O ile wraz z wydłużaniem czasu obróbki próbek ultradźwiękami w trakcie odwadniania osmotycznego zmniejszał się wyraźnie efekt zagęszczania zewnętrznych warstw komórek (co zostało zaznaczone strzałkami na fot. 4), o tyle dłuższa ekspozycja tkanki na ultradźwięki powodowała załamywanie się ścian komórkowych w strukturze miąższowej tkanki owoców. Na obrazach mikrostruktury (fot. 4C i 4D) widoczne są wyraźne pofałdowania będące wynikiem osłabienia i zapadania się ścian komórkowych. Spostrzeżenia te znalazły odzwierciedlenie w pracach innych autorów, w których materiałem doświadczalnym były owoce: kiwi [16], melona [5] i ananasa [4]. Prawdopodobne niewielkie zmiany wielkości i kształtu komórek epidermy i kilku warstw podepidermalnego miąższu ograniczały intensywność spękań na powierzchni owoców w porównaniu z owocami odwadnianymi bez wspomaganie ultradźwiękami (fot. 5A i 5B).



Fot. 5. Mikromorfologia powierzchni owoców wiśni odwodnionych osmotycznie (SEM). A – próbka odwadniająca bez oddziaływania ultradźwiękami (US); widoczne długie spękania wypukłych fragmentów pokrytych sokiem komórkowym. B – odwadnianie wspomaganie US przez 120 min.; widoczna lekko pofalowana epiderma i drobne mikrospeknięcia

Fig. 5. Micro-morphology of surfaces of sour cherry fruits after osmotic dehydration (SEM). A – sample being osmo-dehydrated without ultrasound treatment (US); visible long cracks of convex fragments covered with cell sap. B – osmotic dehydration supported by US for 120 min.; visible corrugation of epidermis and fine cracks

Wpływ stosowania ultradźwięków na strukturę tkanki utrwalonej w sposób konwekcyjny

Różnice w strukturze tkanki wywołane stosowaniem ultradźwięków, zaobserwowane bezpośrednio po obróbce osmotycznej, zostały utrwalone w strukturze suszu konwekcyjnego i uwidoczniły się bezpośrednio na obrazach mikroskopowych (fot. 6), jak i w wynikach parametrów opisujących rozmiary zobrazowanych struktur (tab. 1). Suszenie konwekcyjne wzmocniło efekt obróbki wstępnej obserwowanej w różnym czasie stosowania ultradźwięków, jednak dominujący był skurcz suszarniczy. W przypadku pola powierzchni zaobserwowano nawet kilkakrotne zmniejszenie wartości tego parametru w owocach suszonych w stosunku do surowca. O ile redukcja pola powierzchni przekroju po obróbce wstępnej była największa w wariacie 30US+90S, o tyle po suszeniu konwekcyjnym dalsze zmniejszanie pola powierzchni było najmniejsze spośród zastosowanych sposobów obróbki wstępnej. I pod względem tego parametru susz 30US+90S różnił się od pozostałych statystycznie istotnie ($p \leq 0,05$). Zmniejszanie średnich wartości parametrów opisujących rozmiary komórek oraz przestrzeni międzykomórkowych można tłumaczyć z jednej strony skurczem struktury (fot. 6 i 7), a z drugiej – rozluźnieniem struktury ścian komórkowych oraz pojawieniem się dużej liczby pęknięć i mikroporów. Jednocześnie zaobserwowano mniejsze wartości odchyłań standardowych w przypadku pól powierzchni, zarówno po obróbce wstępnej, jak i po suszeniu konwekcyjnym oraz obwodów obiektów po suszeniu konwekcyjnym próbek 60US po odwadnianiu, w stosunku do surowca (tab. 1). Świadczy to o mniej-

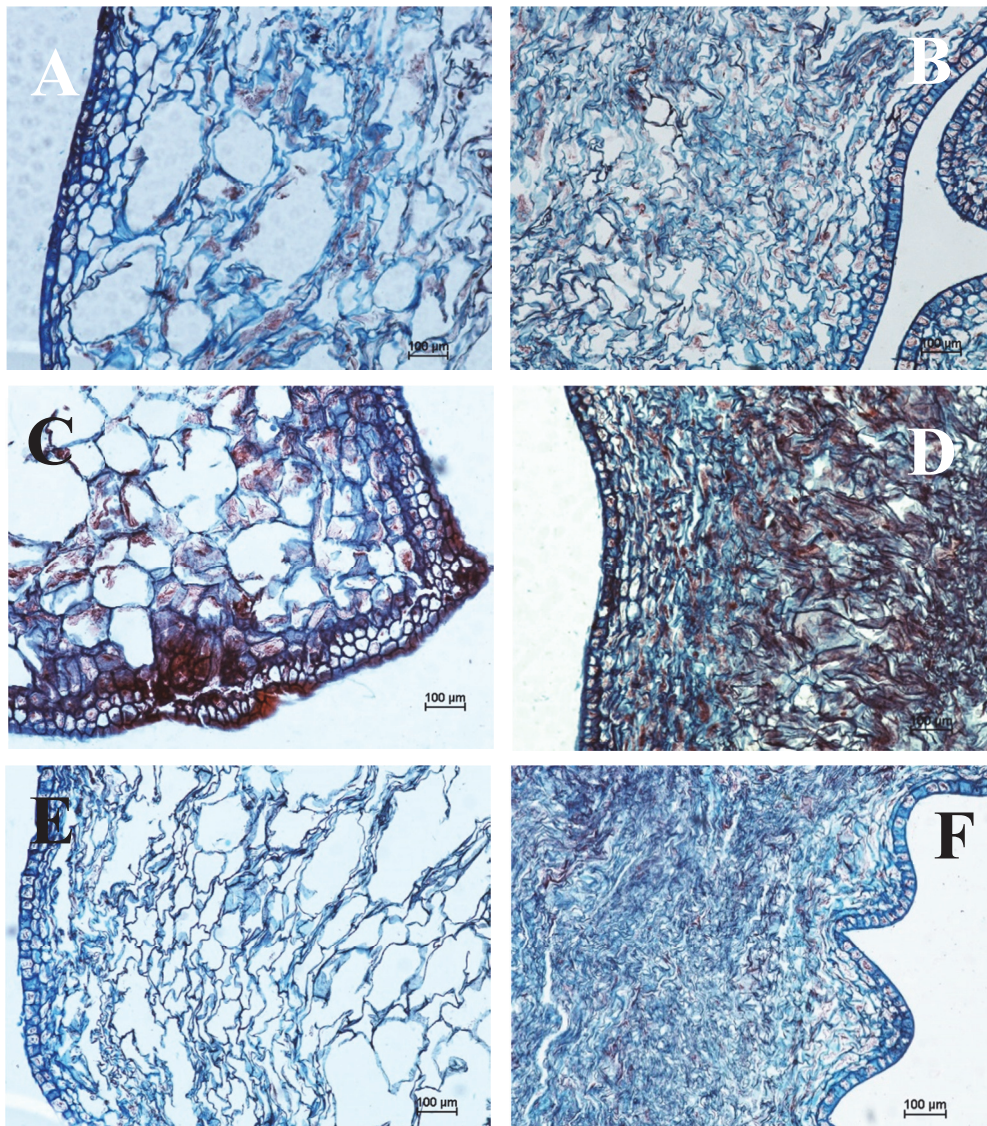
szym zróżnicowaniu struktury tkanki pod względem rozmiarów widocznych obiektów, a tym samym większym jej ujednorodnieniem po zastosowaniu suszenia.

Dane zamieszczone w tab. 1. pozostają w zgodzie z obserwacjami widocznymi bezpośrednio na obrazach z mikroskopu elektronowego SEM. Na fot. 4. najbardziej ujednoczoną strukturą pod względem pola powierzchni i obwodu, zarówno po odwadnianiu (fot. 4B), jak i po suszeniu (fot. 6D), charakteryzowały się owoce traktowane przez 60 min ultradźwiękami, co znajduje potwierdzenie w danych z tab. 1. i pozwala wnioskować o istnieniu optymalnego stanu sprzyjającego redukcji naprężenia wewnętrznego towarzyszącego procesom dyfuzyjnym.

W przypadku parametrów opisujących kształty obiektów na obrazach mikroskopowych wpływ oddziaływania ultradźwięków oraz wytrząsania mechanicznego na etapie obróbki wstępnej nie miały jednoznacznego charakteru. Generalną tendencją była redukcja wydłużenia obiektów oraz zaokrąglenie ich kształtów (wzrost wartości współczynnika kolistości), jednak na etapie obróbki wstępnej zmiany nie były statystycznie istotne ($p \leq 0,05$), z wyjątkiem wydłużenia próbek wariantu 120 US. Różnice pomiędzy zastosowanymi wariantami obróbki uwidoczniły się po suszeniu konwekcyjnym. Podobnie, jak w przypadku pól powierzchni oraz obwodów, największy, statystycznie istotny ($p \leq 0,05$), wzrost zaokrąglenia oraz redukcję wydłużenia kształtów obiektów zaobserwowano w próbce 60US+60S.

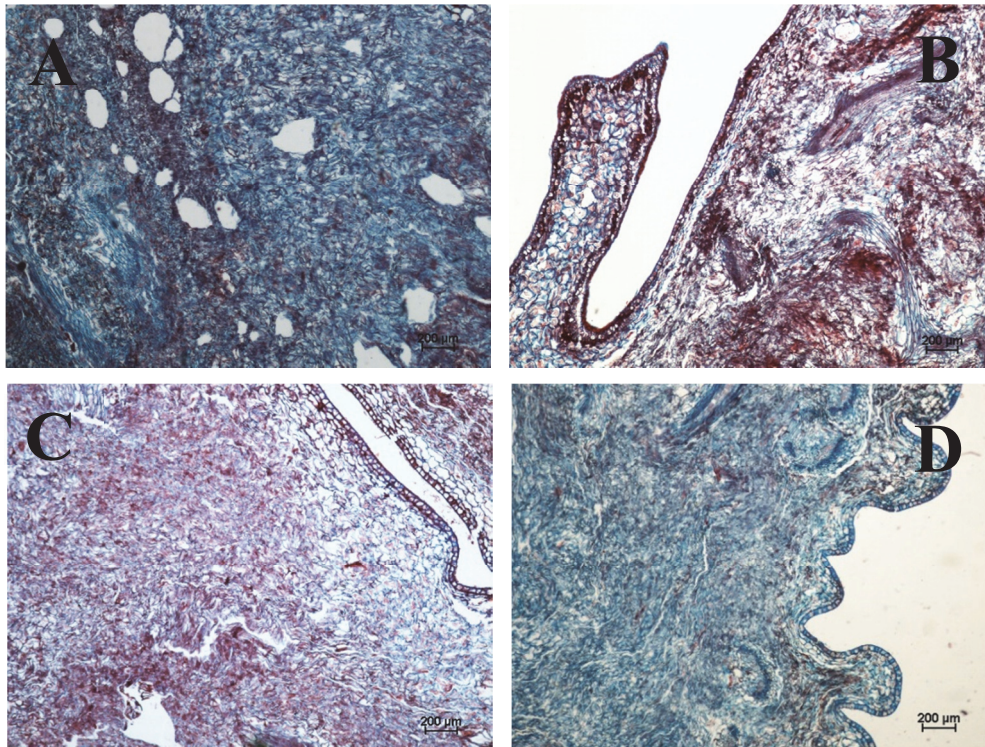
Niezależnie od czasu stosowania ultradźwięków w trakcie suszenia konwekcyjnego, kształt komórek w części miększowej owoców ulegał podobnym zmianom destrukcyjnym poprzez pofałdowanie ścian komórkowych. Zbliżone wyniki otrzymali Nowacka i wsp. [17] oraz Deng i Zhao [2] – dłuższe traktowanie próbek jabłka ultradźwiękami skutkowało większą destrukcją struktury suszu. Zastosowanie US w procesie suszenia skórki pomarańczowej również wywołało podobne rezultaty [9, 18]. Stopień deformacji komórek stanowił o ich zagęszczeniu, a tym samym o zwartości konsystencji miększu (fot. 6). W zależności od czasu traktowania odwadnianej tkanki ultradźwiękami zaobserwowano wyraźne różnice w homogenności struktury wysuszonych owoców (fot. 7). W obrazie mikroskopowym miąższu wiśni, które nie były poddane działaniu ultradźwięków, zaobserwowano występowanie wolnych przestrzeni międzykomórkowych na różnej głębokości tkanki, na przemian z zagęszczeniami (fot. 7A).

Zastosowanie wspomagania ultradźwiękowego sprzyjało zwiększeniu jednorodności struktury miąższu i przy obróbce przez 60 min obserwowane wyrównanie struktury, podobnie jak na etapie bezpośrednio po odwadnianiu (fot. 4B), było największe (fot. 7B). Komórki były najbardziej okrągłe i najmniej wydłużone spośród wszystkich suszy (tab. 1). Przedłużanie czasu działania US wyraźnie potęgowało efekt zagęszczania struktury, tak że susze z owoców traktowanych falami akustycznymi przez cały okres odwadniania charakteryzowały się największym skurczem tkanki (fot. 7D). W tej kombinacji komórki były najbardziej wydłużone (tab. 1).



Fot. 6. Przekroje owoców wiśni z warstwą komórek epidermy o dobrze zachowanym kształcie i miększu o zróżnicowanej strukturze. Obrazy z mikroskopu świetlnego tkanki odwodnionej osmotycznie (A, C, E) oraz tkanki poddanej po odwadnianiu suszeniu konwekcyjnemu (B, D, F). A i B – próbki bez traktowania ultradźwiękami (US), C, D – próbki traktowane US przez 60 min, E, F – próbki traktowane US przez 120 min

Fig. 6. Cross-sections of sour cherry fruits with layer of well-preserved shape of epidermal cells and diversified parenchyma. Light microscopy images of osmo-dehydrated tissue (A, C, E) and tissue subjected to convective drying (B, D, F) after dehydration. A, B – samples without ultrasound (US) treatment, C, D – samples treated with US for 60 min., E, F – samples treated with US for 120 min



Fot. 7. Przekroje owoców wiśni suszonych konwekcyjnie o nieregularnej, pofalowanej powierzchni komórek epidermy i o zwartej strukturze mięszku. Obrazy z mikroskopu świetlnego. A – próbka bez traktowania ultradźwiękami (US), B – próbka traktowana US przez 60 min, pojedyncze niewielkie perforacje, C – US przez 90 min, D – US przez 120 min. A – wyraźnie widoczne perforacje tkanki zanikające po stosowaniu wspomaganie US, B – sporadyczne, C, D – brak perforacji

Fig. 7. Cross-sections of convectively dried sour cherry fruits with irregular corrugated surface of epidermis cells and highly compacted parenchyma structure. Light microscopy images. A – sample without ultrasound (US) treatment, B – sample treated with US for 60 min., C – US for 90 min., D – US for 120 min. A – clearly visible perforations of tissue that disappeared after US-assisted treatment was applied, B – sporadic, C, D – no perforation

Dłuższy okres ekspozycji owoców wiśni na działanie US sprzyjał dezorganizacji struktur komórkowych w subepidermalnej strefie mięszku. Wiśnie zawierają niewiele pektyn, co może powodować skłonność do deformowania się tkanki mięszkowej, która ma duże przestrzenie międzykomórkowe. Skórka owocu, stanowiąca barierę ochronną ma zwartą strukturę komórkową i dlatego ma większą wytrzymałość niż tkanka mięszkowa. W związku z tym lepiej znosiła interakcje z falą akustyczną. Uzyskane wyniki wskazują, że tkanka wiśni absorbowała ultradźwięki i ich zastosowanie mogłoby ograniczać skurcz warstw powierzchniowych suszu, jednak operacja taka wymagałaby starannej optymalizacji.

Wnioski

1. Zastosowanie ultradźwięków jako czynnika modyfikującego proces odwadniania osmotycznego wiśni istotnie wpłynęło na strukturę tkanki, a obserwowany zakres zmian zależał od czasu ekspozycji tkanki na fale akustyczne.
2. W porównaniu z owocami odwadnianymi osmotycznie bez wspomaganie ultradźwiękowego, wraz z wydłużaniem czasu obróbki tkanki falami akustycznymi zmniejszała się zwartość komórek bezpośrednio sąsiadujących z epidermą. Jednocześnie obserwowano zwiększanie się deformacji komórek miękkiszu dośrodkowego i zanikanie przestrzeni międzykomórkowych.
3. Bezpośrednio po procesie odwadniania najbardziej ujednoczoną strukturą charakteryzowały się owoce poddawane działaniu ultradźwięków przez 60 min, co dowodzi istnienia optymalnego stanu sprzyjającego redukcji naprężenia wewnętrznego towarzyszącego procesom dyfuzyjnym.
4. We wszystkich analizowanych rodzajach próbek suszenie konwekcyjne spowodowało znaczny skurcz odwodnionej tkanki, jednak w zależności od czasu wcześniejszego traktowania ultradźwiękami zaobserwowano istotne różnice w homogenności struktury uzyskanego suszu.
5. Największą jednorodnością charakteryzował się susz uzyskany z tkanki traktowanej ultradźwiękami przez 60 min. W suszu otrzymanym z próbek odwadnianych bez wspomaganie ultradźwiękami stwierdzono występowanie wolnych przestrzeni na różnej głębokości tkanki na przemian z dużymi zagęszczeniami, zaś w próbkach poddawanych działaniu ultradźwięków przez 90 i 120 min, podobnie jak w próbkach bezpośrednio po odwadnianiu, obserwowano zwiększanie się skurczu tkanki i zanik przestrzeni międzykomórkowych.

Praca badawcza współfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pt. „Wykorzystanie ultradźwięków do wspomaganie procesów suszenia materiałów biologicznych szczególnie wrażliwych na termiczne warunki suszenia” (PBS1/A8/13/2012).

Literatura

- [1] Banaszak J., Kowalski S.J.: Metody akustyczne w badaniach inżynierskich. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.
- [2] Deng Y., Zhao Y.: Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). LWT – Food Sci. Technol., 2008, **41**, 1575-1585
- [3] Fernandes F.A.N., Rodrigues S.: Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. J. Food Eng., 2007, **82**, 261-267.
- [4] Fernandes F.A.N., Gallão M.I., Rodrigues S.: Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. J. Food Eng., 2009, **90**, 186-190.

- [5] Fernandes F.A.N., Gallão M.I., Rodrigues S.: Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT – Food Sci. Technol.*, 2008, **41**, 604-610.
- [6] Fernandes F.A.N., Linhares F.E. Jr., Rodrigues S.: Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2008, **15**, 1049-1054.
- [7] Fernandes F.A.N., Rodrigues S.: Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. *Drying Technology*, 2008, **26**, 1509-1516.
- [8] Garcia-Noguera J., Oliveira F.I.P., Gallão M.I., Weller C.L., Rodrigues S., Fernandes F.A.N.: Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 2010, **28**, 294-303.
- [9] Garcia-Perez J.V., Ortuño C., Puig A., Carcel J.A., Perez-Munuera I.: Enhancement of water transport and microstructural changes by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. *Food Bioprocess Technol.*, 2012, **5**, 2256-2265.
- [10] Hayat M.A.: Principles and techniques of scanning electron microscopy. Vol. 5. Van Nostrand Reinhold Co., New York 1976.
- [11] Jambak A.R., Mason T.J., Paniwnyk L., Lelas V.: Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *J. Food Eng.*, 2007, **81**, 88-97.
- [12] Janowicz M., Średzińska K.: Wybrane właściwości suszonych konwekcyjnie jabłek wstępnie odwadnianych osmotycznie w warunkach zmiennego ciśnienia. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2009, **1(62)**, 86-98.
- [13] Kudra T., Mujumdar A.S.: Advanced drying technologies, Taylor and Francis Group. Boca Raton, FL USA, 2009.
- [14] Lewicki P.P.: Design of hot air drying for better foods. *Trends Food Sci. & Technol.*, 2006, **17**, 153-163.
- [15] Marzec A., Kowalska H., Ołdak B.: Wpływ techniki suszenia wiśni na właściwości teksturalne suszu oceniane metodą akustyczną i mechaniczną. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2013, **4(89)**, 210-221.
- [16] Nowacka M., Tylewicz U., Laghi L., Dalla Rosa M., Witrowa-Rajchert D.: Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chem.*, 2014, **144**, 18-25.
- [17] Nowacka M., Wiktor A., Śledź M., Jurek N., Witrowa-Rajchert D.: Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *J. Food Eng.*, 2012, **3(113)**, 427-433.
- [18] Ortuño C., Pérez-Munuera I., Puig A., Riera E., Garcia-Perez J.V.: Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying. *Physics Procedia*, 2010, **3**, 153-159.
- [19] Piasecka E., Uczciwek M., Klewicki R.: Odwadnianie osmotyczne owoców w roztworach zawierających fruktoolisacharydy. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2009, **2(63)**, 138-153.
- [20] Pieczywek P.M., Zdunek A.: Automatic classification of cells and intercellular spaces of apple tissue. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, **81**, 2-78.
- [21] PN-90/A-75101/03. Przetwory owocowe i warzywne. Przygotowanie próbek i metody badań fizykochemicznych. Oznaczanie zawartości suchej masy metodą wagową.
- [22] Rawson A., Tiwari B.K., Tuohy M.G., O'Donnell C.P., Brunton N.: Effect of ultrasound and blanching pretreatments on polyacetylene and carotenoid content of hot air and freeze dried carrot discs. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2011, **18**, 1172-1179.
- [23] Rodrigues S., Fernandes F.A.N.: Use of ultrasound as pretreatment for dehydration of melons. *Drying Technology*, 2007, **10(25)**, 1791-1796.
- [24] Szparaga A., Kopeć A., Czerwińska E.: Wpływ odwadniania osmotycznego i zamrażalniczego przechowywania na stan mikrobiologiczny śliwek rozmrażanych w komorze próżniowo-parowej. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2014, **1(92)**, 137-147.

**ASSESSMENT OF CHANGES IN STRUCTURE OF DRIED TISSUE OF SOUR CHERRY
PRETREATED USING ULTRASOUND-ASSISTED OSMOTIC DEHYDRATION****S u m m a r y**

The objective of the research study was to determine the effect of ultrasounds on the microstructure of osmo-treated and dried sour cherry fruits. The 'Nefris' sour cherry fruit variety was osmotically dehydrated using a 60 % sucrose solution for 120 min. (40 °C) in an ultrasonic bath equipped with a transducer (25 kHz, 0.4 W/cm²) and a shaking platform (30 rpm). The total time of osmotic dehydration was 120 min; during that time period, diverse time variants of ultrasound (US) treatment and shaking (S) were applied. First, the samples were treated by ultrasounds (US) for 0, 30, 60, 90, and 120 min.; next, they were shaken for 120, 90, 60, 30, or 0 min., respectively. The dehydrated fruits were convectively dried. The structure of osmo-convectively dried samples of dehydrated fruits and raw material was microscopically analyzed. It was confirmed that the application of ultrasounds caused changes in the structure of tissues. A longer time of exposing sour cherry tissue to ultrasounds resulted in a decrease in the density of cells directly adjacent to the epidermis. Concurrently, it was found that the deformation of parenchyma cells increased and the intercellular spaces faded away. By the most homogenous structure (the most elongated and circular cells) were characterized the dried fruits that were osmo-treated and, simultaneously, ultrasound-treated and shaken for 60 min. (60US+60S); thus the presence of optimal state was proved that supported the reduction in internal tension. The convective drying causes the tissue to considerably contract. In the dried fruits, which were not treated by ultrasounds, but only shaken for 120 min. (0US+120S), alternating free intercellular and highly compact spaces were found. The application of ultrasounds for max 60 min. caused the homogeneity of structure of the material being dried to increase (optimal variant: 6US+60S).

Key words: plant tissue, pre-treatment, ultrasounds, drying, microstructure ☒