

Dr hab. inż. Monika JANOWICZ<sup>1</sup>

Dr inż. Lesław JANOWICZ<sup>2</sup>

Mgr inż. Michał JANKOWSKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydział Nauk o Żywności,  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

<sup>2</sup>Wydział Inżynierii Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

## WYKORZYSTANIE MIKROSKOPII ELEKTRONOWEJ I ANALIZY KOMPUTEROWEJ OBRAZU W BADANIACH MIKROSTRUKTURY ŻYWNOCI®

The use of electron microscopy and computer image analysis  
in the study of food microstructure®

**Słowa kluczowe:** mikroskopia, analiza obrazu, żywność.

*Struktura jest bardzo ważną cechą charakterystyczną dla różnych rodzajów żywności, dlatego też zachowanie jej odpowiedniej formy, bądź możliwość jej modyfikowania są głównym celem wszystkich stosowanych metod przetwarzania. Jest również podstawowym czynnikiem wpływającym na ocenę jakości owoców i warzyw. Do badań nad właściwościami fizycznymi żywności coraz częściej wykorzystywana jest mikroskopia oraz komputerowa analiza obrazu jako nieinwazyjne metody obrazowania cech struktury żywności.*

**Key words:** microscopy, image analysis, food.

*The structure is a very important characteristic characteristic for various types of food, and therefore the preservation of its appropriate form or the possibility of modifying it is the main goal of all the processing methods used. It is also a basic factor affecting the assessment of fruit and vegetable quality. Research into physical properties of food increasingly uses microscopy and computer image analysis as non-invasive methods of imaging food structure characteristics.*

### WPROWADZENIE

Do badań nad właściwościami fizycznymi żywności coraz częściej wykorzystywana jest mikroskopia oraz komputerowa analiza obrazu. Dzięki tym narzędziom możliwy jest wgląd do wnętrza struktury surowca, w celu lepszego zobrazowania i zrozumienia przemian zachodzących podczas procesów przetwórczych.

Analiza mikroskopowa wymaga wcześniejszego preparowania surowca i poddania go często całemu szeregowi czynności przygotowawczych, zgodnie z procedurami i metodyką poszczególnych technik mikroskopowych. Szczególnie jest to istotne w przypadku zaawansowanych metod analitycznych z użyciem mikroskopii elektronowej. W zależności od stosowanego typu mikroskopu, należy różnie postępować z próbką materiału badawczego i sporządzać z niej preparaty ściśle według opracowanych zasad.

W wypadku produktów żywnościowych pochodzenia roślinnego ma się do czynienia z materią biologiczną, która ze względu na wysoką zawartość wody, wymaga uprzedniego utrwalenia. Najczęściej w tym celu tkankę roślinną poddaje się odwadnianiu poprzez suszenie.

Najdoskonalszą metodą wykorzystywaną do preparowania materiału biologicznego w badaniach mikrostruktury jest suszenie w punkcie krytycznym, umożliwiające odparowanie

wody z tkanki i zachowanie jej struktury komórkowej w stanie nienaruszonym. Niestety ze względu na wysokie koszty prowadzenia tego procesu oraz koszty aparatury, technika ta jest rzadko wykorzystywana, przez co obecnie ustępuje ona miejsca konwencjonalnym metodom suszenia. Wiadomo jednak, że procesy te uszkadzają tkankę, powodując deformacje jej struktury i zmieniając geometrię komórek. Skutkuje to przemianami pierwotnych właściwości fizycznych surowca. Dlatego tradycyjnie stosowane techniki suszenia (na przykład konwekcyjnego), nie są dobrą metodą utrwalania struktur tkankowych surowców pochodzenia roślinnego w celu wykorzystania ich później do badań z użyciem mikroskopów elektronowych. Nowoczesna i zachowawcza w stosunku do cech suszonego materiału jest natomiast metoda liofilizacji. Technika ta pozwala uzyskać susz znacznie lepiej odwodniony w porównaniu do materiału suszonego konwekcyjnie, z lepiej zachowaną barwą, objętością i innymi właściwościami cechującymi świeżą tkankę. Odpowiednio prowadzona pozwala na uzyskanie materiału, w którym stopień zachowania struktury komórkowej jest porównywalny z materiałem suszonym w punkcie krytycznym.

Z tych względów liofilizacja lub inaczej suszenie sublimacyjne, wydaje się być obiecującym sposobem utrwalania tkanki roślinnej do celów analitycznych z użyciem mikroskopów elektronowych.

**Celem artykułu jest prezentacja możliwości wykorzystania mikroskopii elektronowej oraz komputerowej analizy obrazu w badaniach mikrostruktury żywności.**

## WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE TKANKI I OPISUJĄCE JE PARAMETRY

Jedną z podstawowych cech charakterystycznych surowców i produktów pochodzenia roślinnego jest struktura tkankowa. Jej parametry w sposób istotny wpływają na mechaniczne właściwości materiału. Czynnikiem tworzącym strukturę tkanki roślinnej są właściwości ściany komórkowej i turgor lameli, tworzących warstwy komórek składających się na strukturę tkankową. Turgor jest to ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez ciecz wewnątrzkomórkową na błonę komórkową. Efektem jest jędrność struktury i zachowanie kształtu. Cecha ta wpływa bezpośrednio na rozmiar i kształt komórek, objętość jaką zajmują wodniczki w cytoplazmie komórkowej czy też objętość przestrzeni międzykomórkowych [29, 38, 46].

W tkankach roślin występują odkształcenia zaliczane zarówno do plastycznych i sprężystych, ale również lepkich co jest zależne od cech odmianowych, rodzaju danej tkanki oraz stopnia jej dojrzałości [26]. Cechy fizyczne surowców pochodzenia roślinnego są kształtowane przez warunki środowiskowe (wzrostu owoców i warzyw), a także zabiegi związane ze zbiorem a następnie przechowywaniem [10]. Do fizycznych cech omawianego materiału należy zaliczyć teksturę. Pod względem sensorycznego odczuwania w procesie jedzenia owoców i warzyw, jest to kluczowa cecha tkanki roślinnej [15]. Teksturę definiuje się jako sensorycznie odbierane przez człowieka bodźce, związane z przeżuwaniem żywności i opisywane np.: jako jej „chrupkość” lub „kruchosc”. W większości przypadków stanowi kluczowy wyróżnik jakości, a przede wszystkim świeżości produktów spożywczych. Przykładami takich produktów mogą być chipsy ziemniaczane, śniadaniowe płatki kukurydziane i wielozbożowe, ale również mięso czy wreszcie owoce i warzywa [17, 55]. Biegańska-Marecik i Czapski [6] w badaniach, których celem było porównanie odmian jabłek i ich przydatności w produkcji owoców nisko przetworzonych, wykonali test ściskania sporządzonych próbek jabłek. Parametrem, określającym teksturę była maksymalna siła ściskająca. Owoce, dla których ten parametr miał najwyższą wartość, charakteryzowały się teksturą, co potwierdzały również badania sensoryczne.

Istotnym czynnikiem odpowiedzialnym za kształtowanie właściwości fizycznych tkanek roślinnych jest woda. Jej zawartość w komórkach owoców i warzyw a także stopień dojrzałości fizjologicznej surowca, bezpośrednio odpowiadają za sprężystość jego struktury [47]. W wyniku wysokiej zawartości oraz aktywności wody w świeżym surowcu, postępują w nim procesy fizyko-chemiczne oraz biologiczne, takie jak oddychanie, transpiracja, dojrzewanie lub starzenie, powodujące zmianę składu chemicznego i struktury [34, 35]. Szczególnie w wyniku transpiracyjnego ubytku wody w materiale, tworzą się optymalne warunki dla rozwoju drobnoustrojów. I tak przy aktywności wody nie mniejszej niż 0,91 swoje optimum rozwoju mają bakterie a już przy wartości 0,88-0,80 – drożdże i grzyby strzępkowe [30]. W efekcie postępuje obniżanie się jakości surowca i uszkodzanie tkanki.

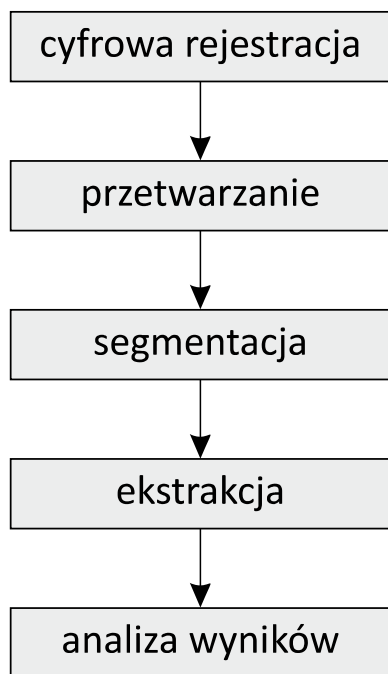
Woda stanowi środowisko sprzyjające zachodzeniu reakcji biochemicznych. W przypadku jabłek reakcją biochemiczną wpływającą na jakość surowca jest proces brązowienia enzymatycznego mięszu, zmianom podlegają głównie polifenole. Brązowienie enzymatyczne jest wynikiem reakcji utleniania polifenoli [45]. Są to związki zaliczane do grupy żywnościowych przeciwutleniaczy, jednak ich wysoka łatwość utleniania do chinonów oraz tworzenia wielkocząsteczkowych barwnych polimerów sprawiła, że przypisywano im właściwości antyżywnościowe, pogarszające jakość produktów [22]. Enzymem katalizującym brązowienie tkanki jest oksydaza polifenolowa, która z udziałem tlenu z otoczenia utlenia związki polifenolowe, w rezultacie czego powstają melaniny powodujące brunatnienie barwy mięszu. W związku z powyższym kolejną cechą mierzalną materiału jest jego barwa [32].

Dla konsumenta wygląd nabywanego produktu jest najważniejszym kryterium jego wyboru, ponieważ w pierwszej kolejności, towar oceniany jest wzrokowo [36]. Konsumentom poszukującym produktów żywnościowych o intensywnej barwie, typowej dla danego środka żywnościowego w stanie najwyższej świeżości. Jakość barwy produktów związana jest bezpośrednio ze stanem wody w surowcu. Związki barwne zawarte w niektórych owocach, takie jak antocyjany lub karotenoidy, charakteryzują się wysoką niestabilnością i ulegają degradacji już przy niewielkich wahaniach wilgotności materiału [42]. Czernyszewicz [16] w badaniach nad preferencjami konsumentów dotyczącymi jabłek wykazała, że wymagania odnośnie tych owoców są podyktowane przez uwarunkowania ekonomiczne oraz demograficzno-społeczne a istotną cechą decydującą o wyborze jest świeży wygląd produktu. Brązowienie mięszu jabłek minimalnie przetwarzanych jest zatem zjawiskiem niekorzystnym, stanowiącym wyzwanie dla producentów i wymagającym stosowania wstępnej obróbki surowca, jak na przykład: blanszowanie lub wysycanie tkanki cukrem czy związkami wapnia [6].

## MIKROSKOPIA ELEKTRONOWA I KOMPUTEROWA ANALIZA OBRAZU

Postęp technologiczny na przestrzeni lat doprowadził do rozwoju nowoczesnych technik prowadzenia obserwacji i badań z użyciem mikroskopu. Współczesne mikroskopy elektronowe pozwalają dostrzec struktury o rozmiarach na poziomie molekularnym, a technologia cyfrowa umożliwiła uzyskiwanie obrazów bardzo wysokiej jakości [52]. Pierwotnym zastosowaniem mikroskopii było badanie organizmów żywych, przy zapewnieniu dobrej kondycji zdrowotnej tych organizmów oraz braku ingerencji obserwatora w zachodzące w nich zmiany [28]. W przypadku obrazowania struktur biologicznych np. tkanek roślinnych pojawiają się trudności związane z brakiem dostępności do nich, a także degradacją będącą skutkiem naturalnych procesów życiowych [20]. Tworząc preparaty do mikroskopii elektronowej, poddaje się je szeregowi operacji, mających na celu utrwalenie badanej struktury - próbki są odwadniane lub zamrażane i napyłane [26, 43, 53]. Wykonanie zdjęć cyfrowych pozwala na dokładną analizę badanej powierzchni pod względem takich cech jak: kształt, wielkość obiektu, stopień uszkodzeń, co pomaga dostrzec zmiany zachodzące w materiale podczas jego suszenia, przede wszystkim objętości i parametrów z nią związanych [44, 50].

Komputerowa analiza obrazu jest metodą nie mającą niszczącego wpływu na badany obiekt, co czyni ją bezpiecznym i obiektywnym narzędziem oceny jakości płodów rolnych oraz artykułów spożywczych [24]. Prowadzenie obserwacji przy pomocy mikroskopów elektronowych, przypomina klasyczne badania z użyciem mikroskopów optycznych, jednak zamiast skupiać światło widzialne, mikroskop elektronowy tworzy obraz bombardując preparat wiązką elektronów o bardzo dużej prędkości. Elektrony wprawiane są w ruch przy pomocy tzw. działa elektronowego. Chmura elektronów, wydzielana na drodze termoemisji, zostaje przyspieszona w wyniku różnicy potencjałów o zakresie kilkuset kilowoltów pomiędzy anodą i katodą. Przyspieszona chmura skupiana jest następnie przy pomocy soczewek elektromagnetycznych. Zadaniem wiązki elektronów jest stworzenie topograficznego obrazu powierzchni próbki. Wyróżnia się 2 typy mikroskopów: SEM – Elektronowy Mikroskop Skaningowy oraz TEM – Elektronowy Mikroskop Transmisyjny, a także ich warianty. W SEM obraz tworzy się dzięki detekcji sygnałów powstałych na skutek odbicia wiązki elektronów od powierzchni oglądanej próbki. W celu wyeliminowania negatywnego wpływu wiązki elektronów na obraz, a tym samym poprawy jego jakości, próbkę napyla się złotem lub kolejno węglem i złotem, przy użyciu napyłarki próżniowej. W mikroskopach TEM, strumień elektronów przechodzi przez przygotowany preparat (próbkę) o cienkim profilu. Część elektronów zostaje zaabsorbowana lub odbita, a druga część przechodzi przez próbkę i zostaje zarejestrowana, co pozwala na tworzenie dwuwymiarowego obrazu [8, 20, 28, 48].



Rys. 1. Kolejność operacji w analizie obrazu [1, 39, 51].  
Fig. 1. The order of operations in the image analysis [1, 39, 51].

Analiza obrazu jest procesem wyodrębniania istotnej dla obserwatora informacji wizualnej z całości widzianego pola, co oznacza zwykle redukcję danych do wyodrębnionych z analizowanej próbki [14, 33]. Ogólną ideę tego procesu ukazano na schemacie (Rys. 1).

Pierwszym etapem analizy jest cyfrowa rejestracja (akwizycja obrazu), tzn. sporządzenie zdjęć badanego obiektu, na przykład, z użyciem mikroskopu. Na tym etapie istotną rolę odgrywa odpowiednie przygotowanie próbki (suszenie, napylenie itp.). Kolejną operacją jest przetwarzanie obrazu, które z definicji oznacza przemianę obrazu rejestrowanego w wynikowy.

Wyróżnia się przekształcenia: punktowe, lokalne i globalne. Przykładem punktowego przekształcenia może być zmiana jasności lub przejście obrazu w negatyw. Przy tego typu przetwarzaniu zamieniane są poszczególne punkty tworzące obraz. Przekształceniem lokalnym nazywa się operacje związane z ustawianiem ostrości obrazu czy z przeciwdziałaniem zakłóceniom. Ten rodzaj przekształcenia definiuje lokalne otoczenie określonego punktu obrazu. Najważniejszą rolę w ramach komputerowej analizy odgrywa jednak grupa przekształceń morfologicznych. Do najbardziej typowych zalicza się [51]:

- Erozja – inaczej filtr minimalny, czyli operator przypisujący danemu punktowi wartość minimalną punktów z nim sąsiadujących,
- Dylatacja – filtr maksymalny, wykonujący operację odwrotną do erozji – określana również jako negatyw erozji,
- Otwarcie i zamknięcie – erozja i dylatacja powodują zmiany pól powierzchni przetwarzanych obszarów. Przekształcenia jakimi są otwarcie i zamknięcie, mają na celu wyeliminować tę wadę. Otwarcie służy eliminacji pomniejszych obiektów i szczegółów, zaś zamknięcie ma za zadanie wypełnianie wąskich wcięć oraz zatok obecnych we wnętrzu obiektu, dzięki zastosowaniu obydwu typów przekształceń, uzyskuje się obraz wolny od zakłóceń.

Do bardziej zaawansowanych przekształceń morfologicznych zalicza się również:

- Automedia – porównywanie przekształceń otwarcia i zamknięcia, celem lepszego wyodrębnienia konturów obiektów,
- Detekcja ekstremów – wyszukiwanie minimów i maksimów lokalnych,
- Ścienianie – zespół operacji, takich jak szkieletyzacja czy „obcinanie gałęzi”, których efektem jest uzyskanie obrazu binarnego mieszczącego się w obrębie konturów krawędzi obiektu przed ścienianiem. Celem szkieletyzacji jest wyznaczenie osiowych punktów kształtów z danego obszaru, zaś „obcinanie gałęzi”, w uproszczeniu usuwa niepożądane odcinki powstałe w wyniku szkieletyzacji.

Jednym z kluczowych procesów przeprowadzanych w ramach analizy obrazu jest segmentacja, czyli podział obrazu na fragmenty odpowiadające elementom wyszczególnionym. Wyróżnia się różne rodzaje segmentacji: **częściową** – podział obrazu na pewne obszary, oraz **kompletną**, poprzez podział na obszary przypisane konkretnym obiektom rzeczywistym. Techniki segmentacji obrazu znane współcześnie, to obróbka obrazu przez podział oraz rozrost obszaru, a także przez wykrywanie krawędzi. Wyróżnić należy również metodę **progowania** przy użyciu histogramu, **grupo-**

wania pikseli oraz **analizę entropii**. W sytuacji, gdy piksele tworzące obraz w danym obszarze istotnie różnią się pod względem określonych wyróżników (np. jasności lub barwy) od występujących w innym obszarze, wówczas mówi się o segmentacji przez podział. W przypadku drugiej techniki segmentacji (przez rozrost), proces segmentacji dokonywany jest poprzez testowanie podobieństwa pikseli. Jeśli nie różnią się one wyraźnie, dołączone zostają do obszaru. Natomiast technika segmentacji przez wykrywanie krawędzi, jest oparta na wyszukiwaniu krawędzi między obszarami [7, 37, 39, 40, 49, 51].

Na etapie ekstrakcji cech następuje wyodrębnienie charakterystycznych cech i właściwości z obrazu pozbawionego zakłóceń [9]. W ramach analizy obrazu, proces ten polega na określeniu poszczególnych parametrów związanych z badanym obrazem (rozmiary, kształt, położenie itp.), a następnie wyznaczeniu wektora cech w postaci numerycznej [31]. Do stosowanych obecnie metod ekstrakcji zalicza się: techniki statystyczne – oparte na analizie histogramów, techniki przekształceń obrazu (np. transformacji Fouriera), metody z zastosowaniem modeli i operacji matematycznych [18].

Ostatni etap komputerowej analizy obrazu polega na obróbce numerycznej danych i zestawieniu parametrów mierzalnych uzyskanych w wyniku pomiarów [1]. W zbieraniu wyników z obrazu wykorzystuje się oprogramowanie komputerowe, umożliwiające wstępną filtrację obrazu, usuwanie zakłóceń i szumów, a przede wszystkim pomiar parametrów geometrycznych [20]. Aby parametry te opisywały badany obiekt w metrycznych jednostkach miary, niezbędne jest skalibrowanie analizowanego obrazu, poprzez zastosowanie wzorca, którego długość wyrażana ilością pikseli na obrazie, jest zamieniana na odpowiadającą jej długość wyrażającą rzeczywisty wymiar obiektu [39]. Pomimo różnorodności metod analitycznych, wymiary obiektów na obrazie standaryzowane są do wzorca jakim jest kula [5].

Parametrami morfologicznymi, którymi opisywany jest obiekt są: długość, szerokość, średnice Fereta, obwód, powierzchnia, a także szereg współczynników, takich jak: kolistość, wydłużenie, wypukłość oraz zwartość, obliczane na podstawie wyżej wymienionych parametrów morfologicznych [1, 23]. Wykorzystanie mikroskopii elektronowej oraz komputerowej analizy obrazu znajdują obecnie zastosowanie w większości dziedzin [37]. Techniki te są obecnie powszechnie wykorzystywane w ramach badań nad żywnością.

## WYKORZYSTANIE MIKROSKOPII I ANALIZY OBRAZU

Obecnie badania mikrostruktury żywności przy użyciu nowoczesnych mikroskopów elektronowych są powszechne, w szczególności w dużych przedsiębiorstwach przemysłu spożywczego. Wykorzystanie mikroskopii i analizy obrazu daje możliwość porównywania wpływu różnych metod obróbki żywności na produkty i wybór najkorzystniejszej [3, 21]. Powszechne wykorzystanie komputerów i elektronicznych urządzeń pomiarowych w ocenie artykułów rolno-spożywczych podyktowane jest przede wszystkim, wysoką dokładnością i jednoznacznością decyzji, co w przypadku analizy sensorycznej wykonywanej przez zespół specjalistów (osób fizycznych) nie jest takie pewne [50].

Cieśla i wsp. [14] w badaniach nad strukturą żeli ze skrobi ziemniaczanej, w oparciu o analizę zdjęć mikroskopowych, wykazali wpływ obróbki, jaką było promieniowanie radiacyjne o ściśle określonej dawce, na tę strukturę próbki. Gałkowska i Fortuna [19] porównując żele o zróżnicowanym składzie, na podstawie zdjęć mikrostruktury były w stanie stwierdzić zróżnicowanie porowatości i konsystencji żeli suszonych sublimacyjnie. Obserwacje prowadzone przy użyciu SEM oraz pochodnych, pozwalają dostrzec specyficzne zachowania substancji, jak na przykład tworzenia kompleksów makrocząstek polisacharydów [12].

Komputerowa analiza obrazu znajduje szerokie zastosowanie w branży mięsnej, głównie do oceny jakości mięsa, np. pod względem zawartości tłuszczu śródmięśniowego [13]. W odniesieniu do towarów jakimi są owoce i warzywa, komputerowa analiza obrazu cieszy się rosnącym zainteresowaniem wśród badaczy. Ze względu na bardzo niewielkie rozmiary komórek tkanki roślinnej (poniżej 500 nm), analiza obrazu zdjęć mikroskopowych tego materiału jest coraz częściej wykorzystywana do badań struktur tkankowych tych surowców. Poza danymi w postaci zdjęć, pozwala na dostarczenie parametrów liczbowych i wykresów opisujących przebieg procesów i związanych z nimi zmian w tkankach roślinnych [3, 44]. Uzyskane w wyniku analizy obrazu parametry morfologiczne i współczynniki kształtu komórek, pozwalają na uzyskanie istotnych informacji na temat wpływu obróbki surowca na strukturę wewnętrzną i jakość produktu [27]. Przykładem mogą tu być różnice sztywności i kształtu błon komórkowych, a także powstawania uszkodzeń struktury i zwartych obszarów na powierzchni przekrojów poprzecznych próbek jabłek, suszonych różnymi metodami [4, 25]. Analiza zdjęć mikroskopowych pozwoliła stwierdzić wpływ roztworu soli wapnia na usztywnienie struktury tkankowej suszonej konwekcyjnie papryki, co przekładało się również na mniejszy ubytek barwników oraz wpływ temperatury prowadzenia procesu na stan struktury tkankowej suszu [54]. Umożliwiła także wyciągnięcie tezy, mówiącej o zależności właściwości reologicznych odwadnianych osmotycznie jabłek z ich strukturą wewnętrzną [41].

Nowoczesne systemy wizyjne umożliwiają analizę obrazów barwnych. Jedną z funkcji oprogramowania do komputerowej analizy obrazu jest tworzenie histogramów, pozwalających na prowadzenie obserwacji w paletcie barw podstawowych RGB, co z kolei pozwala na uzyskanie pełnej informacji na temat ekstremów lokalnych, wartości średnich i odchyłeń standardowych oraz mediany poszczególnych barw, a także ilości pikseli dla wartości kolorów. Na podstawie tych danych określić można, jasność obrazu, tzn. przewagę wystąpienia obiektów jaśniejszych lub ciemniejszych. Posiadając tę wiedzę wyznacza się modę obrazu, czyli przeważające parametry jasności [2, 11, 39]. Na kształtowanie pożądaných cech sensorycznych żywności największy wpływ ma jednak jej tekstura, którą kształtuje struktura wewnętrzna. Zastosowanie mikroskopii elektronowej i analizy obrazu istotnie poszerza możliwości poznawcze surowca, co przekłada się potem na jakość produktu [3].

## PODSUMOWANIE

Systemy wizyjne oparte na komputerowej analizie obrazu dysponują szeroką gamą możliwości, które przekraczają

zdolności człowieka. Przede wszystkim, mają o wiele szybszy czas reakcji, co w dobie wysokonakładowej produkcji taśmowej jest bezcenne, zaś otrzymane wyniki są obiektywne i powtarzalne. Techniki te pozbawione są wielu cech ludzkich, takich jak: zmęczenie, znużenie, stres, podatność na przekupstwo itp. Maszyna nie posiada instynktu samozachowawczego oraz oporów moralnych przed zniszczeniem. Te cechy sprawiają, że systemy wizyjne mogą z powodzeniem zastępować człowieka w ocenie jakości żywności, co jest ekonomiczne oraz redukuje czas i koszty.

Systemy komputerowej analizy obrazu pracują w dowolnym zakresie światła widzialnego, podczerwieni a nawet nadfioletu i mogą być montowane w miejscach gdzie wykonanie pomiarów przez człowieka byłoby niemożliwe. Podczas stosowania systemów wizyjnych wyniki są automatycznie rejestrowane, dzięki czemu można w każdej chwili do nich powracać. Istnieje również możliwość dowolnego programowania procesu przetwarzania obrazu, a szeroka paleta narzędzi i technik do obróbki obrazu umożliwia dostrzeżenie pewnych cech analizowanego obiektu, których ludzki zmysł wzroku nie zawsze jest w stanie wychwycić.

Szereg przeprowadzonych doświadczeń z zastosowaniem komputerowej analizy obrazu potwierdził, że otrzymane wyniki są wysoko skorelowane z wynikami otrzymanymi innego rodzaju metodami pozwalającymi analizować strukturę na podstawie dokumentacji zdjęciowej wykonanej za pomocą technik mikroskopowych. Do wad systemów wizyjnych należy m.in. stosunkowo wysoka cena urządzeń wchodzących w ich skład. Ceny te są bardzo zróżnicowane i zależne od jakości i rozdzielczości dostępnego sprzętu. Czasem wzrost kosztów spowodowany jest koniecznością montażu dodatkowego oświetlenia (szczególnie do badań wykonywanych w ciemnych warunkach). Wadą jest również to, że jakość uzyskanych zdjęć – obrazów bezpośrednio wpływa na otrzymane wyniki i badanie tego samego obiektu na sprzęcie różnej klasy może przynieść różne efekty. Pewną niedogodnością systemów wizyjnych jest to, że w niektórych przypadkach przed ich zastosowaniem należy przeprowadzić doświadczenia w celu doboru najlepszego oświetlenia i tła dla badanego materiału, ponieważ te elementy mogą wpływać na ostateczny wynik. Jest również konieczne tworzenie baz danych w systemie uczącym się oraz ciągła jego weryfikacja, gdyż dla prawidłowego zaklasyfikowania obiektu niezbędny jest punkt odniesienia.

## LITERATURA

- [1] **ARCICHOWSKI P. 2006.** „Automatyczna analiza obrazu. Pomiar kształtu i wielkości cząstek„. *Laboratorium* 11 (4): 12-16.
- [2] **ACEVEDO N.C., V.P. BRIONES BUERA, J.M. AUGILERA. 2008.** „Microstructure Affects The Rate Of Chemical, Physical And Color Changes During Storage Of Dried Apple Discs„. *Journal Food Engineering* 85: 222 – 231.
- [3] **AGUILERA J.M. 2005.** „Why food microstructure?„. *Journal Food Engineering* 67: 3 – 11.
- [4] **ANDRÉS A.C., BILBAO P. FITO. 2004.** „Drying Kinetics Of Apple Cylinders Under Combined Hot Air–Microwave Dehydration„. *Journal Food Engineering* 63: 71 – 78.
- [5] **BALIŃSKI A. 2013.** „Podstawowe zagadnienia związane z pomiarem wielkości i rozkładu wielkości cząstek„. *Prace Instytutu Odlewnictwa* 1 (53): 3 – 12.
- [6] **BIEGAŃSKA-MARECIK R., J. CZAPSKI. 2003.** „Porównanie przydatności odmian jabłek do produkcji plastrów o małym stopniu przetworzenia„. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria* 2 (2): 115 – 127.
- [7] **BIENIECKI W., J. SEKULSKA. 2003.** „Segmentacja i analiza obrazów mikroskopowych i barwionych immunohistochemicznie„. *Automatyka* 7 (3): 283 – 293.
- [8] **BŁAŻ L. 2006.** „Analityczna mikroskopia elektroniczna w badaniach struktury materiałów metalicznych„. *Fizyka w szkole* 6: 4 – 26.
- [9] **BOBULSKI J. 2003.** „Ekstrakcja cech twarzy za pomocą transformaty falkowej„. *Informatyka Teoretyczna i Stosowana* 3 (4): 127 – 134.
- [10] **BOHDZIEWICZ J., G. CZACHOR, P. GRZEMSKI. 2013.** „Wyznaczenie cech reologicznych warzyw i owoców na podstawie nakładów pracy odształcenia„. *Inżynieria Rolnicza* 4 (147): 1, 35 – 42.
- [11] **BONIECKI P., M. ZABOROWICZ, K. PRZYBYŁ, K. PILARSKI. 2012.** „System informatyczny PiAO2 jako narzędzie wspomagające bezwzorcową neuronową klasyfikację pomidorów„. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 57 (1): 26 – 28.
- [12] **CHEN L. F. REN, X. YU, Z. ZHANG, D. XU, Q. TONG. 2015.** „Pasting investigation, SEM observation and the possible interaction study on rice starch-pullulan combination„. *International Journal of Biological Macromolecules* 73: 45 – 48.
- [13] **CHMIEL M., K. DASIEWICZ, M. SŁOWIŃSKI. 2010.** „Ocena jakości drobnego mięsa wołowego metodą komputerowej analizy obrazu„. *Żywność Nauka Technologia Jakość* 6 (73): 219 – 227.
- [14] **CIEŚLA K., B. SARTOWSKA, E. KRÓLAK. 2015.** „SEM studies of the structure of the gels prepared from untreated and radiation modified potato starch„. *Radiation Physics and Chemistry* 106: 289 – 302.
- [15] **CYBULSKA J., A. ZDUNEK, K. KONSTANKIEWICZ. 2011.** „Calcium effect on mechanical properties of model cell walls and apple tissue„. *Journal Food Engineering* 102: 217 – 223.
- [16] **CZERNYSZEWICZ E. 2007.** „Konsumenckie spożyczenie na jakość jabłek„. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin-Polonia* 17 (2): 70 – 82.
- [17] **DOLIK K., M. KUBIAK. 2013.** „Instrumentalny test analizy profilu tekstury w badaniu jakości wybranych produktów spożywczych„. *Nauki Inżynierskie i Technologiczne*, 3 (10): 35 – 44.

- [18] **DUDA D., M. KRĘTOWSKI, J. BĘZY-WENDLING. 2007.** „Ekstrakcja cech teksturalnych w klasyfikacji obrazów tomograficznych wątroby„, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej* 2: 51 – 66.
- [19] **GALKOWSKA D., T. FORTUNA. 2008.** „Charakterystyka żeli sporządzonych ze skrobi ziemniaczanej z udziałem wybranych sacharydów„, *Żywność Nauka Technologia Jakość* 1 (56): 41 – 51.
- [20] **GILEWSKA G. 2010.** „Przydatność różnych technik obrazowania struktur biologicznych wykorzystujących elektronowy mikroskop skaningowy„, *Politechnika Białostocka, Prace Instytutu Elektrotechniki* 244: 161 – 169.
- [21] **GRZEGORY P., T. PIETRZAK, D. PIOTROWSKI. 2014.** „Wykorzystanie mikroskopii w analizie struktury suszonej żywności„, *Przemysł Spożywczy* 68 (2): 12 – 15.
- [22] **GUMUL D., J. KORUS, B. ACHREMOWICZ. 2005.** „Wpływ procesów przetwórczych na aktywność przeciwutleniającą surowców pochodzenia roślinnego„, *Żywność Nauka Technologia Jakość* 4 (45): 41 – 48.
- [23] **GUTKOWSKA E.A. 2014.** „Analiza fraktalna i morfologiczna aglomeratów komórek glonów„, *Łódź: Politechnika JODŁOWSKI Łódzka*: 289 – 299.
- [24] **GUZEK D., A. WIERZBICKA, D. GŁĄBSKA. 2011.** „Potencjał i zastosowanie komputerowej analizy i przetwarzania obrazu w przemyśle rolno-spożywczym„, *Inżynieria Rolnicza* 4 (129): 67 – 72.
- [25] **HUANG L., M. ZHANG, L. WANG, A.S. MUJUMBAR, D. SUN. 2012.** „Influence of combination drying methods on composition, texture, aroma and microstructure of apple slices„, *LWT-Food Science and Technology* 47: 183 – 188.
- [26] **JAKUBCZYK E., P. P. LEWICKI. 2003.** „Właściwości mechaniczne tkanki jabłka w odniesieniu do jej struktury„, *Acta Agrophysica* 2 (3): 549 – 557.
- [27] **JANOWICZ M., E. DOMIAN, A. LENART. 2009.** „Zmiany struktury wewnętrznej suszonej konwekcyjnie tkanki jabłek wywołane odwadnianiem osmotycznym„, *Inżynieria Rolnicza* 2 (111): 67 – 73.
- [28] **JÓŹWIAK M. A., M. JÓŹWIAK. 2009.** „Zastosowanie mikroskopii elektronowej w bioindykacji środowiska„, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 40: 419 – 430.
- [29] **KONSTANKIEWICZ K., M. GANCARZ, A. KRÓL, K. PAWLAK. 2002.** „Wyznaczanie parametrów struktury tkanki miękkisowej bulwy ziemniaka odmian Danusia i Kuba„, *Technica Agraria – Acta Scientiarum Polonorum* 1 (2): 23 – 32.
- [30] **KOWAL K. 2012.** „Wpływ aktywności wody na wzrost drobnoustrojów„, *Przemysł Spożywczy* 66 (8/9): 50 – 52.
- [31] **KOWALSKI P. A. 2012.** „Procedura ekstrakcji cech z obrazu twarzy dla potrzeb systemu biometrycznego„, *Czasopismo Techniczne Automatyka* 25: 55 – 79.
- [32] **KUCZYŃSKI A. P. 2006.** „Studia nad dynamiką brązowania i jej wykorzystaniem w ocenie świeżości mięszu jabłek„, *Acta Agrophysica* 138 (5): 6 – 21.
- [33] **ŁAPCZYŃSKA-KORDON B., S. FRANCİK, J. FRĄCZEK, Z. ŚLIPEK. 2006.** „Modelowanie skurczu suszarniczego wybranych warzyw korzeniowych za pomocą sieci neuronowych„, *Inżynieria Rolnicza* 13: 303 – 310.
- [34] **ŁAPCZYŃSKA-KORDON B., B. KRZYSZTOFIK. 2008.** „Wpływ metod i parametrów suszenia na zmiany barwy suszów owocowo-warzywnych„, *Inżynieria Rolnicza*, 1 (99): 251 – 257.
- [35] **ŁAPCZYŃSKA-KORDON B., B. KRZYSZTOFIK. 2008.** „Wpływ sposobów i czasu przechowywania na właściwości fizyczne jabłek„, *Inżynieria Rolnicza* 2 (100): 179 – 185.
- [36] **LENTAS K., D. WITROWA-RAJCHERT. 2009.** „Wpływ parametrów blanszowania na właściwości mechaniczne i barwę suszu korzeni selera„, *Acta Agrophysica* 13 (1): 165 – 174.
- [37] **LEŚNIAK G. 1999.** „Zastosowanie komputerowej analizy obrazu w badaniach petrofizycznych„, *Przeгляд Geologiczny* 47(7): 644 – 651.
- [38] **LEWICKI P.P., R. PORZECKA-PAWLAK. 2005.** „Effect of osmotic dewatering on apple tissue structure„, *Journal Food Engineering* 66: 43 – 50.
- [39] **MATERKA A., P. STRUMIŁO. 2009.** „Wstęp do komputerowej analizy obrazu„, *Łódź: Politechnika Łódzka*: 101 – 131.
- [40] **MURAT O., G. MURAT. 2014.** „Assessment of optimum threshold and particle shape parameter for the image analysis of aggregate size distribution of concrete sections„, *Optics and Lasers in Engineering* 53: 122 – 132.
- [41] **NIETO A. B., S. VICENTE, K. HODARA, M. A. CASTRO, S. M. ALZAMORA. 2013.** „Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility„, *Journal Food Engineering* 119: 104 – 114.
- [42] **PASŁAWSKA M., B. STĘPIEŃ, K. JAŁOSZYŃSKI. 2010.** „Zmiany parametrów barwy owoców jagodowych wywołane suszeniem, przechowywaniem i rehydracją„, *Inżynieria Rolnicza* 2 (120): 95 – 102.
- [43] **RAMIREZ C., E. TRONCOSO, J. MUÑOZ, J.M. AGUILERA. 2011.** „Microstructure analysis on pre-treated apple slices and its effect on water release during air drying„, *Journal Food Engineering* 106: 253 – 261.

- [44] RIVA M., S. CAMPOLONGO, A. A. LEVA, A. MAESTRELLI, D. TORREGGIANI. 2005. „Structure–property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes,,. *Food Research International* 38: 533 – 54.2
- [45] RZĄCA M., D. WITROWA-RAJCHERT. 2007. „Wpływ techniki suszenia na właściwości optyczne suszu jabłkowego,,. *Acta Agrophysica* 10 (2): 445 – 453.
- [46] SAJNIN C., L. N. GERSCHENSON, A. M. ROJAS. 1999. „Turgor pressure in vegetable tissues: comparison of the performance of incipient plasmolysis technique using mannitol and polyethylenglycol,,. *Food Research International* 32: 531 – 537.
- [47] STĘPIEŃ B. 2009. „Modyfikacja cech mechanicznych i reologicznych wybranych warzyw pod wpływem różnych metod suszenia,,. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego: 9 – 26.
- [48] ŚWIECH K. 2012. „Ultrastrukturalne badanie włosów metodą SEM,,. *Prokuratura i Prawo* 10: 133 – 150.
- [49] SZCZUREK 2003. „Zastosowanie metod morfologii matematycznej do detekcji i dekompozycji obrazów,,. *Telekomunikacja i Techniki Informacyjne* 1 i 2: 67 – 90.
- [50] SZWEDZIAK K. 2008. „Aplikacje komputerowe do oceny wybranych parametrów sensorycznych produktów rolno-spożywczych,,. *Inżynieria Rolnicza* 2 (100): 293 – 298.
- [51] TADEUSIEWICZ R., P. KOROHODA. 1997. *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Kraków: Wydawnictwo Postępu Telekomunikacji.
- [52] TRYKOWSKI G., S. BINIAK. 2008. „Obrazowanie mikroskopowe (SEM, AFM) efektów nanoszenia metali na powierzchnię węgla aktywnego,,. *Węgiel aktywny w ochronie środowiska i w przemyśle* 104 – 111.
- [53] VARELA E., A. SALVADOR, S. FISZMAN. 2007. „Changes in apple tissue with storage time: Rheological, textural and microstructural analyse,,. *Journal Food Engineering* 78: 622 – 629.
- [54] VEGA-GÁLVEZ A., R. LEMUS-MONDACA, C. BILBAO-SÀINZ, P. FITO, A. ANDRÈS. 2008. „Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo),,. *Journal Food Engineering* 85: 42 – 50.
- [55] ZDUNEK A. 2008. „Instrumentalna metoda oceny wybranych cech tekstury jabłek na podstawie emisji akustycznej,,. *Acta Agrophysica* 155 (1): 7 – 96.