

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Zastosowanie mikrotomografii komputerowej w analizie żywności

MAGDALENA ZALEWSKA

KATEDRA TECHNIKI I PROJEKTOWANIA ŻYWNOCI,
WYDZIAŁ NAUK O ŻYWIENIU CZŁOWIEKA I KONSUMPCJI SGGW W WARSZAWIE

Słowa kluczowe: mikrotomografia komputerowa, struktura żywności, wizualizacja 3D, micro-CT

STRESZCZENIE:

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metody mikrotomografii komputerowej (micro-CT), jako przydatnego narzędzia do analizy żywności. Micro-CT to nieinwazyjna technika badawcza, która pozwala odwzorować strukturę wewnętrzną badanego obiektu na podstawie jego dwuwymiarowych projekcji zarejestrowanych pod różnymi kątami. Pozwala na odkrycie struktur wewnętrznych bez ingerencji w fizyczną strukturę badanego materiału. Metoda ta znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki. W przemyśle spożywczym może być wykorzystana do analizy produktów żywnościowych, do oszacowania zawartości poszczególnych składników żywności, a także uzyskania informacji na temat ich rozmieszczenia. Zastosowanie mikrotomografii komputerowej pozwala na zachowanie wysokiej jakości produktów podczas procesu produkcyjnego. Metoda ta przydatna jest także w celu optymalizacji procesów, czyli w uzyskaniu informacji na temat parametrów procesu technologicznego. W pracy przedstawiono zastosowanie metody mikrotomografii komputerowej w przemyśle mięsnym, cukierniczym oraz owocowo-warzywnym.

The use of micro computed tomography in food analysis

Keywords: microcomputed tomography, food structure, 3D visualization, micro-CT

ABSTRACT:

The aim of this study is to present the method of computer microtomography (micro-CT) as a useful tool for the analysis of food. Micro-CT is a nondestructive research technique for studying the internal structure of the sample based on its two-dimensional projection recorded at different angles. Allows for the discovery of internal structures without interfering with the physical structure of the material being tested. This method has been used in many fields of science and technology. Estimated content of each food ingredients as well as provide information about their location. The use of computer microtomography allows to maintain the high quality of the products during the manufacturing process. This method is also useful for process optimization, which is obtained information about the parameters of technology microtomography use in the meat, confectionery and fruit-vegetables industry is presented.

1. WSTĘP

Analizując współczesne metody badania struktury żywności, można zauważyć, że oprócz tradycyjnych sposobów polegających na „prześwietlaniu” materiału biologicznego, bardzo dynamicznie rozwijają się nowoczesne techniki umożliwiające poznanie jego struktury wewnętrznej. Wynika to z potrzeby ciągłego doskonalenia jakości surowców, półproduktów, jak i gotowych wyrobów oraz stosowania jak najmniej inwazyjnych metod badania żywności, tak aby minimalnie lub w ogóle nie wpływać na jej skład i strukturę. Nieinwazyjne badania można zrealizować poprzez przystosowanie wcześniej znanych technologii. Jedną z nich jest zastosowanie promieniowania rentgenowskiego w prześwietlaniu żywności. Badania nad promieniowaniem X prowadzono już pod koniec XIX wieku i do dziś technika ta jest wykorzystywana i doskonalona do badania coraz to szerszej gamy surowców i produktów. Pierwotnie promieniowanie X stosowano w medycynie do uzyskiwania zdjęć rentgenowskich. W dzisiejszych czasach połączono skaner z komputerem, przez co ta metoda określana jest mianem mikrotomografii komputerowej (z ang. *Micro Computed Tomography – MicroCT*). Mikrotomograf komputerowy to zaawansowane urządzenie, dzięki któremu można uzyskać dokładny, trójwymiarowy obraz mikrostruktury badanego materiału dzięki różnicom we właściwościach absorpcyjnych materiałów, które w zależności od składu pochłaniają w różnym stopniu promieniowanie elektromagnetyczne. Dane pomiarowe gromadzone są

w pamięci komputera, a następnie przetwarzane w obrazy. Możliwe jest także stworzenie badanego obiektu poprzez wydruk fizycznego modelu z zastosowaniem tzw. drukarki do druku trójwymiarowego. W ten sposób można „drukować” przestrzenne modele mikroskopijnych obiektów w skali pozwalającej oglądać je nieuzbrojonym okiem.

Metoda mikrotomografii komputerowej żywności obecnie znajduje zastosowanie przede wszystkim w krajach zachodnich. Badania nad praktycznym zastosowaniem tej technologii są prowadzone przez wiele ośrodków naukowych w kraju. Jednakże w Polsce ta technika nie jest w pełni wykorzystywana ze względu na wysoką cenę urządzenia.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie mikrotomografii komputerowej jako nowoczesnego, użytecznego i zaawansowanego narzędzia do analizy ilościowej oraz strukturalnej żywności przy zachowaniu bezpieczeństwa oraz jakości produktów żywnościowych.

2. TECHNIKA MIKROTOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ W BADANIU ŻYWNOCI

Ze względu na ogromny postęp w rentgenowskiej mikrotomografii w medycynie, inżynierii chemicznej, materiałoznawstwie, geologii i biologii, nie jest zaskoczeniem, że w ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęca się rozwojowi tej techniki w dziedzinie nauk o żywności. Okazuje się, że mikrotomografia może być bardzo przydatna w badaniu mikrostruktury żywności [1].

Dzięki systemowi tomografii komputerowej można zwizualizować i zmierzyć wielkości kompletnych, trójwymiarowych struktur obiektu bez przygotowywania chemicznego próbki. Analiza ta jest przeprowadzana bez ingerencji w morfologiczną strukturę badanego materiału [2]. Mikrotomografia komputerowa jest również bardzo przydatną techniką do nieinwazyjnej wizualizacji i pomiaru wewnętrznych mikrostruktur komórkowych produktów spożywczych np. podczas napowietrzania czekolady czy muffinów [3], procesu suszenia plastrów banana – w celu ustalenia optymalnych warunków temperatury i ciśnienia dla procesu powstawania porowatości w suszonym owocu [4], rozkładu wielkości pęcherzyków w cieście z mąki pszennej [5], zawartości tłuszczu w ciastkach [6], przy ocenie zawartości chudego mięsa w tuszach wieprzowych czy do określenia wydajności mięsa wołowego [7, 8].

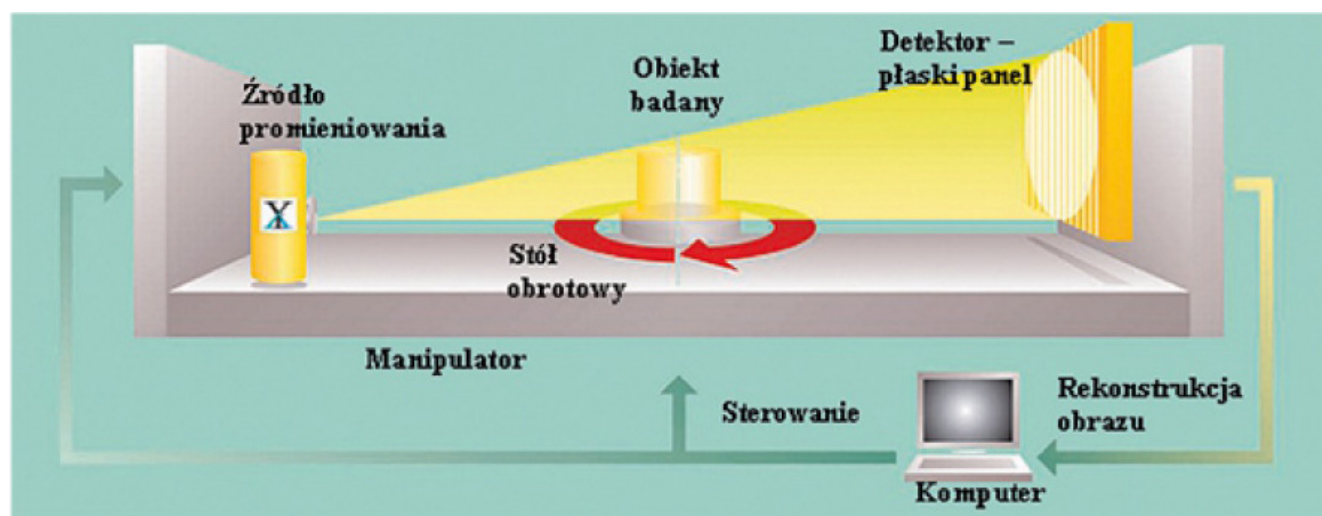
Mikrotomografia komputerowa bardzo szybko staje się użytecznym narzędziem pomocnym w badaniach mikrostruktury żywności i jest ważnym elementem w dziedzinie technologii przetwarzania obrazu, dzięki wyeliminowaniu niektórych z wad tradycyjnego obrazowania i udoskonaleniu charakterystyki mikrostruktury żywności w trzech wymiarach [9].

3. BUDOWA MIKROTOMOGRAFU KOMPUTEROWEGO

Najważniejszymi elementami budowy mikrotomografu komputerowego są: lampa rentgenowska stanowiąca źródło promieniowania, układ detektorów, stół obrotowy oraz manipulator. Źródłem promieniowania rentgenowskiego jest

lampa o napięciu przyspieszającym z zakresu 20-450 kV w zależności od wielkości samego urządzenia. Napięcie jak i natężenie prądu są płynnie regulowane. Detektor służy do przetwarzania promieniowania rentgenowskiego na sygnał elektryczny, najczęściej jest to scyntylator połączony włóknem optycznym z kamerą. Manipulator, który znajduje się pomiędzy lampą rentgenowską a detektorem, umożliwia przesuw skanowanego obiektu w trzech prostopadłych osiach X, Y i Z. Przesuw próbki na linii źródło – detektor pozwala na osiągnięcie odpowiedniego powiększenia. Skanowany obiekt znajduje się na stole obrotowym, poruszającym się względem nieruchomych: lampy i detektorów. Podczas skanowania badany materiał obraca się z założonym krokiem kątowym. Po osiągnięciu danej pozycji kątowej wykonywana jest projekcja obiektu. Następnie na podstawie serii obrazów transmisyjnych dokonywana jest komputerowa rekonstrukcja wewnętrznej struktury badanego obiektu. Im więcej pozyskanych zostanie obrazów transmisyjnych (mniejszy kątowy krok obrotu próbki), tym dokładniejsze jest odwzorowanie wewnętrznej struktury badanego obiektu. Całkowity kąt obrotu próbki podczas skanowania nie może być mniejszy od 180°. Schemat budowy mikrotomografu przedstawiono na Rysunku 1.

Na rynku dostępnych jest wiele konstrukcji mikrotomografów komputerowych w znaczny sposób różniących się pomiędzy sobą przeznaczeniem, uzyskiwaną rozdzielczością obrazu oraz rodzajem źródła promieniowania rentgenowskiego. Do grupy wiodących producentów tego rodzaju urządzeń należą takie firmy jak: SkyScan (Belgia), SCANCO (Szwajcaria) oraz Xradia (USA).

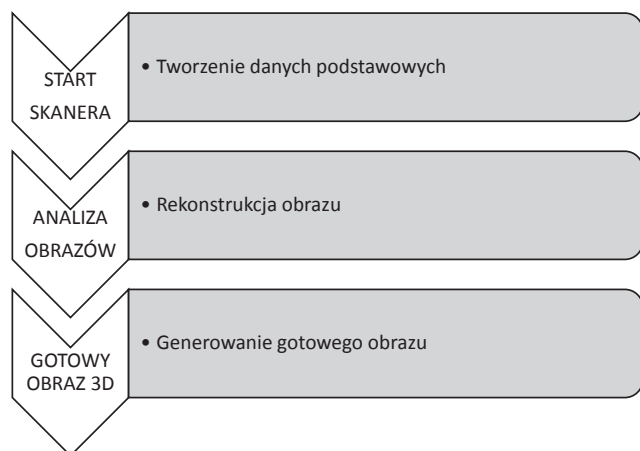


Rysunek 1 Schemat budowy tomografu z wiązką stożkową [10]

Figure 1 Scheme diagram of the CT with a cone beam [10]

4. ETAPY TWORZENIA OBRAZU W MIKROTOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ

Tworzenie obrazów trójwymiarowych w mikrotomografii komputerowej można podzielić na 3 główne etapy, które przedstawiono na Rysunku 2.



Rysunek 2 Schemat blokowy tworzenia obrazu 3D w mikrotomografii komputerowej

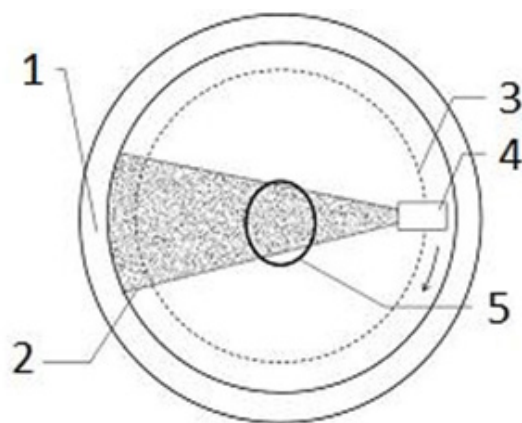
Figure 2 The block diagram of creating a 3D image in a microcomputed tomography

4.1 Tworzenie danych podstawowych

Na Rysunku 3 przedstawiono schemat działania tomografu komputerowego. Podczas skanowania badanego materiału skaner obraca się wokół niego o 180° lub 360°. Na każdym położeniu kątowym zostaje zapisany obraz w odpowiednim formacie. Zespół detektorów rejestruje komplet standardowych transmisji obrazów rentgenowskich, które tworzą zestaw danych po skanowaniu. Podczas każdorazowej emisji promieniowania przez lampę detektory przesyłają do komputera informację o pochłoniętym przez tkanki promieniowaniu. Liczba obrazów otrzymanych po prześwietleniu obiektu zależy od wybranego punktu obrotu oraz zadanego obrotu maksymalnego.

4.2 Rekonstrukcja i generowanie gotowego obrazu

Pozyskane wcześniej obrazy trójwymiarowe wykorzystane zostają do odbudowy wirtualnych plasterów budujących badany obiekt. Rekonstrukcja całego obrazu powstaje na drodze obliczeń matematycznych. Na tym etapie uzyskane surowe dane nie przedstawiają jeszcze obrazu i są to punkty oznaczające wartości absorpcyjne promieniowania dla rekonstruowanego przekroju. Obszar, na którym jest budowany obraz, nazywamy matrycą,



1. Zespół detektorów
2. Wiązka promieniowania
3. Tor ruchu skanera
4. Skaner
5. Skanowany obiekt

Rysunek 3 Schemat działania tomografu komputerowego (<http://www.inzynieria-biomedyczna.com.pl>)

Figure 3 Diagram of a CT scanner (<http://www.inzynieria-biomedyczna.com.pl>)

a jej wielkość jest zależna od liczby pikseli. Punkty na matrycy mają przypisaną konkretną wartość związaną z wielkością tłumienia promieniowania rentgenowskiego, która ze względu na zróżnicowaną strukturę wewnętrzną badanego materiału jest różna w poszczególnych regionach obiektu. Poprzez różny poziom pochłaniania promieniowania punktom są przypisywane odcienie szarości w skali 256-stopniowej [11]. Po rekonstrukcji następuje generowanie wyglądu obiektu. Zaznaczone zostają minimalne i maksymalne wartości, a wszystkie wartości pomiędzy wartościami brzegowymi będą wyświetlane jako pół tonu. W gotowym obrazie wartości tłumienia poniżej minimum będą białe, a powyżej maksimum wyświetlane zostaną jako czarne. Zrekonstruowana tablica pojawi się jako obraz przekroju z liniowej konwersji w 256-stopniach szarości [11].

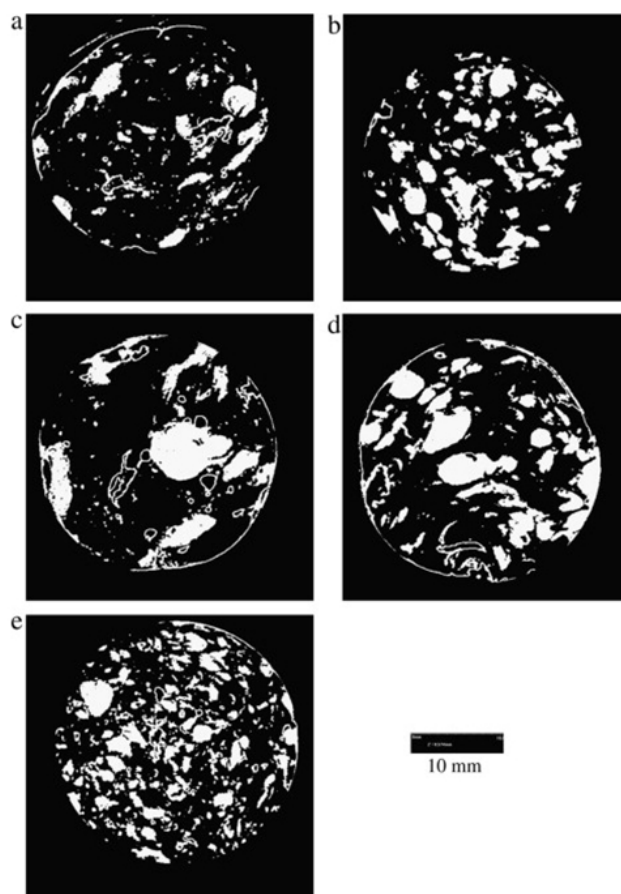
5. ZASTOSOWANIE MIKROTOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ W PRZEMYSŁE MIĘSNYM

Technika mikrotomografii komputerowej została zastosowana w pracy [12], aby w szybki i nieinwazyjny sposób oszacować śródmięśniową ilość tłuszczu i zapewnić dokładny opis mikrostruktury oraz wynikającej z niej jakości mięsa. Śródmięśniowa zawartość tłuszczu w mięsie jest bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na właściwości takie jak smak, soczystość i konsystencja gotowe-

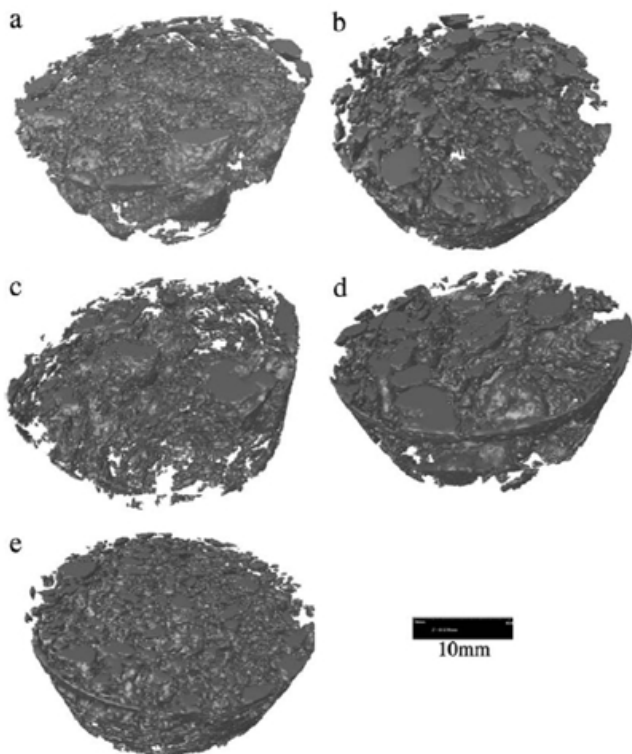
go wyrobu. Ponadto, wygląd tłuszczu może mieć wpływ na ogólną akceptację produktu przez konsumenta i wybór danej porcji mięsa podczas zakupów. Tłuszcz śródmięśniowy charakteryzowany również jako składnik, który w większych ilościach jest widoczny jako tzw. marmurkowatość i składa się ze skupisk komórek tłuszczowych [13]. Dzisiejszych konsumentów interesuje przede wszystkim skład produktu żywnościowego, zatem wiarygodne metody analizy ilościowej tłuszczu w produktach mięsnych mają istotne znaczenie. Powszechnie stosowane metody nie udzielają wyczerpujących informacji na temat przestrzennego rozkładu tkanki tłuszczowej, mówią tylko o zawartości procentowej tłuszczu w mięsie. Zastosowanie techniki mikrotomografii komputerowej pozwala uzyskać obie te informacje podczas pojedynczego badania – jeden skan, dwie informacje na temat ilości procentowej i struktury tłuszczu [12]. Przy użyciu oprogramowania komputerowego można zmierzyć następujące parametry geometryczne skanowanego materiału: procentową wielkość obiektu, która jest stosunkiem objętości konkretnego składnika w stosunku do objętości całkowitej, powierzchnię obiektu/objętość, która jest parametrem podawanym w celu scharakteryzowania złożoności konstrukcji i oszacowania grubości (np. wielkość i rozmieszczenie tłuszczu w każdej próbce) oraz indeks fragmentacji, opracowany i zdefiniowany w pracy [14] jako wskaźnik strukturalny łączności – dzięki niemu można obliczyć wypukłość lub wklęsłość próbki. Można także obliczyć główną strukturę separacji, która jest grubością przestrzeni określonej przez binaryzację w ilości procentowej (tj. zawartości tłuszczu) i może być obliczana z obrazów 2D i 3D.

Metoda mikrotomografii komputerowej okazała się odpowiednia dla oceny śródmięśniowej ilości zawartości tłuszczu w mięsie. Porównanie tej metody z klasyczną metodą ekstrakcji Soxhleta wykazuje dużą zależność pomiędzy zawartością tłuszczu uzyskaną we wszystkich próbkach. Mikrotomografia komputerowa umożliwia dokładniejsze badanie zawartości tłuszczu w mięsie niż tylko ocena optyczna. Pokazuje mikrostrukturę oraz ilość i kształt tłuszczu, a także połączenia/związłości próby. Badania z użyciem mikrotomografii mogą wydawać się dość drogie, to jednak pozwalają uzyskać więcej informacji na temat ilości tłuszczu w mięsie i jego rozkładu przestrzennego wewnątrz próbki w celu uzyskania bardziej szczegółowych informacji o jakości mięsa jak i jego smaku.

Mikrotomografię komputerową można również wykorzystać do analizy mikrostruktury tłuszczu w gotowym wyrobie mięsnym, jakim jest np. salami. Zawartość tłuszczu w produkcie jest bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na smak, soczystość oraz teksturę. Ponadto wygląd tłuszczu i jego rozmieszczenie ma wpływ na ogólną akceptację produktu oraz na decyzję konsumentów dotyczącą wyboru danego produktu mięsnego [15]. Do eksperymentu przedstawionego w pracy [12] użyto pięć różnych rodzajów włoskiego salami: Milano, Modena, Ungherese, Norcinetto i Napoli, które wykazywały zmienność w zakresie widzialnym w strukturze tłuszczu. Odpowiednie ilościowe, trójwymiarowe parametry opisujące strukturę tłuszczu pozwalają na obliczenie zawartości tłuszczu w próbce. Badania potwierdziły, że technika micro-CT może służyć jako zaawansowane narzędzie do analizy ilościowej tłuszczu oraz pozwala rozróżnić i rozdzielić różne rodzaje występujących w produkcie mikrostruktur.



Rysunek 4 Obrazy binarne przedstawiające rozdzielenie faz: tłuszczowej i beztłuszczowej w salami: a) Milano, b) Modena, c) Napoli, d) Norcinetto, e) Ungherese [12]
Figure 4 Examples of binary tomograph illustrating the separation of the fat and non-fat phases: a) Milano, b) Modena, c) Napoli, d) Norcinetto, e) Ungherese [12]



Rysunek 5 Struktura tłuszczu 3D w salami: a) Milano, b) Modena, c) Napoli, d) Norcinetto, e) Ungherese [12]

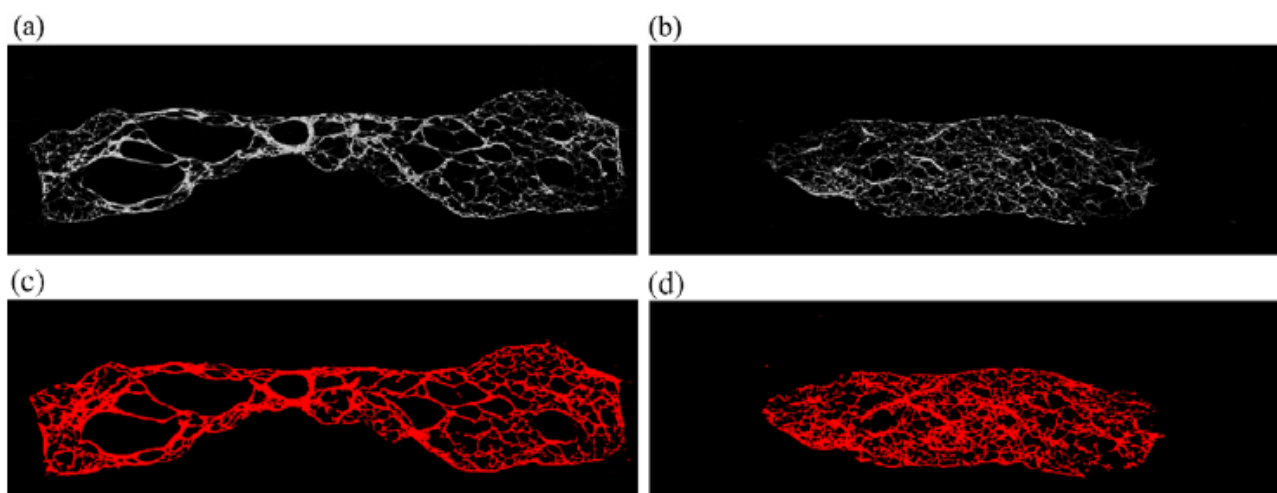
Figure 5 Three-dimensional reconstruction of salami using μ CT: a) Milano, b) Modena, c) Napoli, d) Norcinetto, e) Ungherese [12]

Przemysł żywnościowy jest bardzo zainteresowany wdrażaniem nowych technologii, które pomagają kontrolować proces produkcji w celu otrzymania produktu bezpiecznego, o wysokiej jakości. Technika mikrotomografii komputerowej może zostać wykorzystana podczas obserwacji np. procesu peklowania na sucho. Metoda

ta może być pomocna podczas monitorowania rozkładu mieszanki peklującej w tkance mięsnej, a za jej pomocą można wyznaczyć też minimalny próg tego parametru (ilość mieszanki peklującej i jej stężenie) [16, 17]. Wyniki badań naukowców pokazują, że można wpłynąć na proces produkcji poprzez nieinwazyjne badanie podczas gdy surowce nadal są na etapie przygotowywania i w trakcie trwania etapu czynności wstępnych wprowadzić ewentualne poprawki (np. zmniejszyć lub zwiększyć dawkę soli). Wreszcie informacje dotyczące fizycznych cech mięsa, w zależności od przestrzennego rozkładu soli podczas procesu produkcji, mogą ułatwić w przyszłości przewidywanie czasu penetracji soli w mięsie.

6. ZASTOSOWANIE MIKROTOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ W PRZEMYŚLE OWOCOWO-WARZYWNYM

Mikrotomografię komputerową można wykorzystać w przemyśle owocowo-warzywnym np. w celu oceny mikrostruktury suszonych owoców. W pracy [4] przedstawiono ocenę mikrostruktury suszonych plasterków banana, badano całkowitą objętość porów oraz rozkład ich wielkości. Mikrotomografii komputerowej użyto w celu zbadania gotowego produktu, aby określić wpływ łączenia promieniowania dalekiej podczerwieni ze standardowymi technikami suszenia na porowatość próbki. Znajomość struktury porów jest niezbędna w celu powiązania jakości produktów z parametrami suszenia, czyli optymalizacji procesu przetwórczego. Warto zauważyć, że technika



Rysunek 6 Obrazy w skali szarości (a–b) i obrazy binarne po progowaniu (c–d) uzyskane dla dwóch pionowych pozycji próbki banana [4]

Figure 6 Grey level cross-sections (a–b) and the corresponding binary images after thresholding (c–d) obtained for two vertical positions in the banana sample [4]

micro-CT umożliwia zbadanie porów rzędu wielkości mikrona, co pozwala na ustalenie odpowiednich parametrów procesu suszenia, które są ważnym czynnikiem wpływającym na jakość końcową produktu [4].

7. ZASTOSOWANIE MIKROTOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ W PRZEMYSŁE CUKIERNICZYM

W pracy [3] przedstawiono badanie wewnętrznej struktury komórkowej muffinów. Naukowcy wykonali zdjęcia przy użyciu mikroskopu elektronowego (SEM), co niestety wiązało się z koniecznością inwazji w fizyczną strukturę materiału, ale nie uzyskali w ten sposób informacji o jego wewnętrznej strukturze. Dopiero dzięki technice mikrotomografii komputerowej 3D można wirtualnie tworzyć przekroje w każdym poziomie i w dowolnym kierunku, aby uwidocznić wewnętrzne struktury materiału. Ta właśnie cecha czyni technikę CT bezinwazyjną.

8. PODSUMOWANIE

Przytoczone w artykule badania naukowe pokazują, że technika mikrotomografii komputerowej (micro-CT) jest użytecznym narzędziem do badania żywności w wielu gałęziach przemysłu spożywczego. Technika ta jest wykorzystywana w przemyśle mięsny, mleczarski, owocowo-warzywny, a także w piekarnictwie. Dzięki niej uzyskać można informacje o mikrostrukturze



Rysunek 7 Model 3D, wewnętrzna struktura piany w muffinie czekoladowym [3]

Figure 7 3D model of foam structure in chocolate muffin [3]

żywności i jej składnikach w obrazie 3D. Pozwala ona ocenić przestrzenne rozmieszczenie wody, tłuszczu i soli w produktach. Posiada zdolność do tworzenia obrazów produktów o niskiej wilgotności. Jest metodą, która nie ingeruje w strukturę badanego materiału, przez co badana próbka może być dalej przetwarzana, a nawet zbadana ponownie.

LITERATURA

- [1] van Dalen G., Blonk H., van Aalst H., Hendrics C. L., 3-D Imaging of Foods Using X-Ray Microtomography. *GIT Imaging & Microscopy*, 3, (2003), 18-21.
- [2] Frisullo P., Laverse J., Marino R., Del Nobile M. A., X-ray computed tomography to study processed meat microstructure. *Journal of Food Engineering*, 94, (2009), 283-289.
- [3] Lim K. S., Barigou M., X-ray micro-computed tomography of cellular food products. *Food Research International*, 37, (2004), 1001-1012.
- [4] Léonard A., Blacher S., Nimmol C., Devahastin S., Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure of banana slices: An illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product. *Journal of Food Engineering*, 85, (2008), 154-162.
- [5] Bellido G., Scanlon M. G., Page J. H., Hallgrimsson B., The bubble size distribution in wheat flour. *Food Research International*, 39, (2006), 1058-1066.

- [6] Paryet B., Talhaoui F., Kerckhofs G., Brijs K., Goesaert H., Wevers M., Delcour J. A., The role of sugar and fat in sugar-snap cookies: Structural and textural properties. *Journal of Food Engineering*, 90, (2009), 400-408.
- [7] Hollo G., Szucs E., Tozser J., Hollo I., Repa I., Application of X-ray computer tomography in cattle production. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 20, (2007), 12, 1901-1908.
- [8] Furnols M. F., Teran M. F., Gispert, M., Estimation of lean meat content in pig carcasses using X-ray computed tomography and PLS regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 98, (2009), 31-37.
- [9] Sasov A., van Dyck D., Desktop X-ray microscopy and microtomography. *Journal of Microscopy*, 191, (1998), 2, 151-158.
- [10] Ratajczyk E., Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) do zadań przemysłowych. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 5, (2012), 104-113.
- [11] Guilherme A., Buzanich G., Carvalho M. L., Focusing systems for the generation of X-ray micro beam: An overview. *Spectrochimica Acta Part B*, 77, (2012), 1-8.
- [12] Frisullo P., Marino R., Laverse J., Albenizo M., Del Nobile M. A., Assessment of intramuscular fat level and distribution in beef muscles using X-ray microcomputed tomography. *Meat Science*, 85, (2010), 250-255.
- [13] Helgesen H., Solheim R., Næs T., Consumer purchase probability of dry fermented lamb sausages. *Food Quality and Preference*, 9, (1998), 5, 295-301.
- [14] Hahn M., Voge M., Pompesius-Kempa M., Delling G., Trabecular bone pattern factor – A new parameter for simple quantification of bone microarchitecture. *Bone*, 13, (1992), 397.
- [15] Torrente Y., Gavina M., Belicchi M., Fiori F., Komlev V., Bresolin N., Rustichelli F., High-resolution X-ray microtomography for three-dimensional visualization of human stem cell muscle homing. *FEBS Letters*, 580, 2006, 24, 5759-5764.
- [16] Vestergaard C., Risum J., Adler-Nissen J., Quantification of salt concentrations in cured pork by computed tomography. *Meat Science*, 68, (2004), 107-113.
- [17] Vestergaard C., Erbo S. G., Thauland T., Adler-Nissen J., Berg P., Salt distribution in dry-cured ham measured by computed tomography and image analysis. *Meat Science*, 69, (2005), 9-15.