

Streszczenie rozprawy doktorskiej mgr Aleksandry Celejewskiej **pt. „Innowacyjne narzędzie oceny jakości produktów serowarskich”**

Rozprawa doktorska dotyczy opracowania innowacyjnego narzędzia oceny jakości produktów serowarskich – serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych, w którym wykorzystano pomiary wybranych parametrów elektrycznych jako źródła informacji o jakości i stopniu dojrzałości badanych produktów. Praca wpisuje się w nurt nauk o zarządzaniu i jakości, w którym zarządzanie jakością rozumiane jest jako projektowanie i kontrolowanie procesów produkcyjnych oraz dobór narzędzi diagnostycznych i podejmowanie decyzji technologicznych na podstawie danych pomiarowych. Ujęcie to obejmuje również uwzględnienie wymagań systemów zapewnienia jakości i bezpieczeństwa żywności oraz ryzyka zafałszowań wynikających z substytucji tłuszczu mlecznego tłuszczami roślinnymi.

Celem głównym badań było określenie możliwości zastosowania innowacyjnego narzędzia oceny jakości produktów serowarskich do monitorowania procesu dojrzewania oraz diagnozowania zmian jakościowych badanych produktów. Dodatkowo celem było określenie przydatności i ograniczeń analizowanego narzędzia z uwzględnieniem problematyki autentyczności produktów dojrziałych. Realizacja celu głównego obejmowała dwa etapy badawcze (pilotażowy – Etap I oraz zasadniczy – Etap II), w ramach których zdefiniowano łącznie siedem celów szczegółowych, ukierunkowanych na: (1) charakterystykę właściwości elektrycznych mleka i produktów serowarskich, (2) opis zmian jakościowych w czasie dojrzewania, (3) porównanie wyników uzyskanych z wykorzystaniem innowacyjnego narzędzia elektrycznego z wynikami metod referencyjnych oraz (4) ocenę potencjału jego zastosowania w zarządzaniu jakością i ocenie autentyczności wyrobów. Weryfikację stopnia realizacji tych celów wsparto sformułowaniem czterech hipotez badawczych (H1–H4), odzwierciedlających prognozowane zależności między parametrami elektrycznymi a wyróżnikami jakościowymi serów dojrzewających oraz wyrobów seropodobnych.

W Etapie I określono charakterystykę elektryczną mleka surowego, pasteryzowanego oraz pasteryzowanego z dodatkiem oleju palmowego na podstawie pomiarów wybranych parametrów elektrycznych, a następnie zbadano wpływ substytucji tłuszczu mlecznego olejem palmowym oraz 28-dniowego dojrzewania na teksturę i właściwości elektryczne badanych produktów serowarskich. Umożliwiło to ocenę przydatności układu pomiarowego z czujnikiem CPD do szybkiej, nieniszczącej oceny zmian strukturalnych. W Etapie II scharakteryzowano przebieg zmian jakościowych w czasie dojrzewania (przez 28 dni), uwzględniając skład chemiczny, dynamikę proteolizy, barwę i teksturę, a także zmierzono parametry przewodnościowe (Z , G) i pojemnościowe (C_p , C_s) z wykorzystaniem czujnika CPM i modelu zastępczego RCC produktów żywnościowych. Dane poddano analizie

statystycznej (analiza głównych składowych, korelacje) oraz modelowaniu regresyjnemu w celu prognozowania jakości technologicznej produktów dojrzałych na podstawie parametrów elektrycznych.

W badaniach zasadniczych (Etap II) wyroby z tłuszczem roślinnym charakteryzowały się większą twardością, stabilniejszą strukturą, mniejszą dynamiką zmian tekstury i barwy oraz wyższymi wartościami przewodnictwa i pojemności elektrycznej, co wskazuje na odmienny charakter oddziaływania pola elektrycznego z produktem i mniej intensywny przebieg dojrzewania. Porównanie czujników własnej konstrukcji potwierdziło przewagę czujnika CPM nad prototypowym CPD, wynikającą z mniejszej wymaganej objętości próbki i stabilniejszego kontaktu z badanym materiałem. W efekcie czujnik CPM zapewniał bardziej powtarzalne, mniej podatne na zakłócenia wyniki oraz wiarygodną rejestrację zmian elektrycznych w szerokim zakresie częstotliwości, co umożliwiło opracowanie użytecznych modeli regresyjnych.

Analiza korelacji i PCA wskazała, że w serach dojrzewających parametry elektryczne były najsilniej korelowały ze wskaźnikami proteolizy i aktywnością wody, natomiast w wyrobach seropodobnych – z cechami tekstury (szczególnie elastycznością) i barwy. Opracowane modele regresyjne dla produktów serowarskich dojrzałych (po 28 dniach) wykazały istotny potencjał prognostyczny parametrów elektrycznych w ocenie jakości technologicznej, przy czym większą przydatność stwierdzono dla serów dojrzewających niż dla wyrobów seropodobnych. W znacznej mierze potwierdzono hipotezy H1–H3, obejmujące wpływ substytucji tłuszczu mlekowego tłuszczem roślinnym, większą przydatność czujnika CPM względem CPD oraz istnienie istotnych statystycznie zależności między parametrami elektrycznymi i technologicznymi. Hipoteza H4, dotycząca prognozowania jakości produktów dojrzałych na podstawie parametrów elektrycznych, została potwierdzona częściowo, co wskazuje na konieczność dalszej weryfikacji opracowanych modeli.

Z punktu widzenia nauk o zarządzaniu i jakości uzyskane wyniki potwierdzają, że metody elektryczne, wykorzystujące parametry Z , G , C_p i C_s , mogą stanowić przydatne uzupełnienie klasycznych metod referencyjnych w systemach nadzoru jakości. Zapewniają one szybki, nieniszczący dostęp do informacji o zmianach strukturalnych podczas dojrzewania, sprzyjając ograniczaniu ryzyka zafałszowań oraz efektywnemu monitorowaniu procesów technologicznych i kosztów analiz laboratoryjnych. Należy jednak podkreślić, że badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, a proponowane narzędzie pozostaje koncepcją wymagającą dalszego dopracowania i weryfikacji w skali przemysłowej jako potencjalne wsparcie procesów decyzyjnych w zarządzaniu jakością.

Abstract of the doctoral dissertation of M.Sc. Aleksandra Celejewska
entitled “An Innovative Tool for Assessing the Quality of Cheesemaking Products”

The doctoral dissertation concerns the development of an innovative tool for assessing the quality of dairy products – ripened cheeses and cheese-like products utilizing measurements of selected electrical parameters as a source of information on the quality and degree of maturity of the examined products. The work is situated within the discipline of management and quality sciences, in which quality management is understood as the design and supervision of production processes, the selection of diagnostic tools, and the making of technological decisions based on measurement data. This approach also includes taking into account the requirements of food quality and safety assurance systems as well as the risk of adulteration resulting from the substitution of milk fat with vegetable fats.

The principal objective of the research was to determine the applicability of the innovative quality assessment tool for monitoring the ripening process and diagnosing qualitative changes in the studied products. An additional aim was to identify the usefulness and limitations of the analyzed tool with respect to the authenticity of matured products. The implementation of the main objective encompassed two research stages (pilot – Stage I and principal – Stage II), within which seven specific objectives were defined, focusing on: (1) the characterization of electrical properties of milk and dairy products, (2) the description of qualitative changes during ripening, (3) the comparison of results obtained using the innovative electrical tool with those of reference methods, and (4) the evaluation of its potential application in quality management and authenticity assessment. Verification of the degree of achievement of these objectives was supported by the formulation of four research hypotheses (H1–H4), reflecting the anticipated relationships between electrical parameters and technological and qualitative indicators of ripened cheeses and cheese-like products.

In Stage I, the electrical characteristics of raw milk, pasteurized milk, and pasteurized milk with palm oil addition were determined based on measurements of selected electrical parameters. Subsequently, the influence of milk fat substitution with palm oil and 28-day ripening on the texture and electrical properties of the studied dairy products was examined. This enabled the evaluation of the suitability of the CPD sensor-based measurement system for rapid, non-destructive assessment of structural changes. In Stage II, the course of qualitative changes during ripening (over 28 days) was characterized, taking into account chemical composition, proteolysis dynamics, color, and texture. Conductivity parameters (Z , G) and capacitance parameters (C_p , C_s) were measured using the CPM sensor and the RCC equivalent model of food products. The data were subjected to statistical analysis (principal component analysis, correlations) and regression modeling to forecast the technological quality of matured products based on electrical parameters.

In the principal research (Stage II), products containing vegetable fat exhibited greater hardness, a more stable structure, reduced dynamics of texture and color changes, and higher values of electrical conductivity and capacitance, which indicates a different character of the interaction between the electric field and the product and a less intensive ripening process. Comparison of the custom-designed sensors confirmed the superiority of the CPM sensor over the prototype CPD sensor, resulting from the smaller required sample volume and more stable contact with the tested material. Consequently, the CPM sensor provided more reproducible, less interference-prone results and reliable recording of electrical changes across a wide frequency range, enabling the development of useful regression models.

Correlation and PCA analyses indicated that in ripened cheeses, electrical parameters were most strongly correlated with proteolysis indicators and water activity, whereas in cheese-like products they were associated with texture features (particularly elasticity) and color. The regression models developed for matured dairy products (after 28 days) demonstrated significant predictive potential of electrical parameters in assessing technological quality, with greater usefulness observed for ripened cheeses than for cheese-like products. Hypotheses H1–H3, concerning the impact of milk fat substitution with vegetable fat, the greater usefulness of the CPM sensor compared to the CPD sensor, and the existence of statistically significant relationships between electrical and technological parameters, were largely confirmed. Hypothesis H4, concerning the prediction of the quality of matured products based on electrical parameters, was partially confirmed, indicating the need for further verification of the developed models.

From the perspective of management and quality sciences, the obtained results confirm that electrical methods employing the parameters Z , G , C_p and C_s may serve as a valuable complement to classical reference methods in quality control systems. They provide rapid, non-destructive access to information on structural changes during ripening, contributing to the reduction of adulteration risk and the effective monitoring of technological processes and laboratory analysis costs. It should be emphasized, however, that the research was conducted under laboratory conditions, and the proposed tool remains a concept requiring further refinement and validation on an industrial scale, as a potential support for decision-making processes in quality management.