



Rozprawa doktorska

Mgr Aleksandra Celejewska

**INNOWACYJNE NARZĘDZIE OCENY JAKOŚCI PRODUKTÓW
SEROWARSKICH**

Dziedzina: Nauki społeczne

Dyscyplina: Nauki o zarządzaniu i jakości

Praca wykonana

w Instytucie Nauk o Zarządzaniu i Jakości

Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

Promotor:

Dr hab. inż. Joanna Katarzyna Banach, prof. UWM

Promotor pomocniczy

Dr inż. Marika Bielecka

Gdynia, 2025

Spis skrótów

ARiMR	Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa
ChNP	Chroniona Nazwa Pochodzenia
ChOG	Chronione Oznaczenie Geograficzne
CLA	Sprzężony kwas linolowy (ang. Conjugated Linoleic Acid)
CPE	Elementy Fazy Stałej (ang. Constant Phase Elements)
Dz. U.	Dziennik Ustaw
EFSA	Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (ang. European Food Safety Authority)
EIS	Spektroskopia Impedancji Elektrochemicznej (ang. Electrochemical Impedance Spectroscopy)
EWG	Europejska Wspólnota Gospodarcza
FAO	Organizacja Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (ang. Food and Agriculture Organization)
FDA	Agencja Żywności i Leków (ang. Food and Drug Administration)
FSSAI	Indyjski Urząd ds. Bezpieczeństwa i Standardów Żywności (ang. Food Safety and Standards Authority of India)
GTS	Gwarantowana Tradycyjna Specjalność
GUS	Główny Urząd Statystyczny
HACCAP	Analiza Zagrożeń i Krytyczne Punkty Kontroli (ang. Hazard Analysis and Critical Control Points)
IERiGŻ	Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej
IFS Food	Międzynarodowy Standard Bezpieczeństwa Żywności (ang. International Food Standard)
IJHARS	Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych
ISO	Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ang. International Organization for Standardization)
KOWR	Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa
NIK	Najwyższa Izba Kontroli
NSLAB	Niesetowe Bakterie Kwasu Mlekowego (ang. Non-Starter Lactic Acid Bacteria)
PIE	Polski Instytut Ekonomiczny
SLAB	Rozpoczęte Bakterie Kwasu Mlekowego (ang. Starter Lactic Acid Bacteria)
UHT	Sterylizacja produktów żywnościowych (ang. Ultra-High Temperature processing)
UOKiK	Urząd Ochrony Konkurencji i Konsumentów (UOKiK)
WHO	Światowa Organizacja Zdrowia (ang. World Health Organization)
WPR	Wspólna Polityka Rolna (Program Unii Europejskiej)
ZKP	Zakładowa Kontrola Produkcji

Streszczenie

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, Cp i Cs, 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

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.

Spis treści

	str.
Spis skrótów	2
Streszczenie	3
Abstract	5
Wstęp	9
1. Trendy na rynku serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych	12
1.1. Produkcja i spożycie serów dojrzewających w Polsce - uwarunkowania i wyzwania jakościowe	12
1.2. Jakość serów dojrzewających – klasyfikacja, proces produkcji oraz uwarunkowania technologiczne i konsumenckie.....	16
1.3. Fałszowanie serów – skala nadużyć, konsekwencje dla konsumentów i przedsiębiorstw.....	25
1.4. Trendy w produkcji wyrobów seropodobnych – substytucja składników mleka	30
2. Zarządzanie procesem kontroli i metodami oceny jakości wyrobów mleczarskich w przedsiębiorstwach	34
2.1. Kontrola jakości w przemyśle mleczarskim – cele, wymagania i etapy postępowania	34
2.2. Korzyści i bariery zarządzania jakością produktów mleczarskich oraz funkcjonowania systemów jakości	37
2.3. Metody i narzędzia oceny jakości wyrobów mleczarskich wspomagające proces zarządzania jakością w produkcji	41
2.3.1. Metody referencyjne – instrumentalne i sensoryczne	42
2.3.2. Innowacyjne metody elektryczne oceny jakości wyrobów mleczarskich.....	44
3. Cele i hipotezy badawcze	54
4. Metodyka badań	57
4.1. Materiał badawczy i zakres badań	57
4.1.1. Metody referencyjne – analizy fizykochemiczne	59
4.1.2. Metody instrumentalne	61
4.2. Analiza statystyczna	66
5. Wyniki badań i ich dyskusja	68
5.1. Badania pilotażowe – etap I	68
5.1.1. Charakterystyka elektryczna mleka wykorzystanego w produkcji	68
5.1.2. Charakterystyka tekstury i właściwości elektrycznych wyrobów serowarskich przed soleniem	72
5.1.3. Zmiany tekstury i właściwości elektrycznych serów oraz wyrobów seropodobnych w czasie dojrzewania	77
5.2. Badania zasadnicze – etap II	80
5.2.1. Zmiany parametrów jakościowych serów i wyrobów seropodobnych w czasie dojrzewania	80
5.2.2. Zmiany parametrów elektrycznych serów i wyrobów seropodobnych w czasie dojrzewania	91
5.2.3. Korelacje między parametrami jakościowymi i elektrycznymi w czasie dojrzewania	95

5.2.4. Zależności regresyjne między parametrami elektrycznymi a wskaźnikami jakości produktów serowarskich dojrzałych	110
5.2.5. Interpretacja wyników w perspektywie zastosowań w nadzorze jakości produktów serowarskich	116
6. Znaczenie teoretyczne i praktyczne badań dla Nauk o Zarządzaniu i Jakości	119
7. Podsumowanie i wnioski	122
Bibliografia	125
Zestawienie tabel	137
Zestawienie rysunków	138

Wstęp

Współczesne zarządzanie jakością w sektorze żywnościowym, a zwłaszcza w przemyśle mleczarskim, wymaga zintegrowanego i innowacyjnego podejścia do oceny jakości produktów. Globalne trendy rynkowe w segmencie serów dojrzewających wskazują na istotny wzrost produkcji oraz nieustannie rosnące oczekiwania konsumentów względem jakości, bezpieczeństwa i walorów sensorycznych (Dabbou i Castagna, 2019; Fox, 2017). Wzrost konkurencyjności i presja kosztowa sprawiają, że przedsiębiorstwa poszukują narzędzi umożliwiających skuteczne monitorowanie parametrów jakościowych na wszystkich etapach procesu – od surowca po wyrób gotowy (Giannakourou i Taoukis, 2020).

W przypadku serów dojrzewających, kluczową rolę odgrywa ich złożony profil sensoryczny, bogaty w niuanse smakowo-zapachowe, w dużym stopniu uzależniony od warunków przechowywania i reżimu technologicznego (Fox, 2017). Ze względu na wysoką wartość dodaną i wydłużony cykl produkcji, zarządzanie ryzykiem zmienności jakości staje się szczególnie istotne. Polska, należąc do największych światowych producentów serów, odnotowała szczególnie dynamiczny wzrost produkcji w ostatnich dekadach, co dodatkowo podkreśla znaczenie nowoczesnych systemów zarządzania jakością w branży mleczarskiej (KOWR, 2021).

W ostatnich latach sektor spożywczy mierzy się z rosnącym problemem fałszowania żywności, będącym konsekwencją intensyfikacji konkurencji rynkowej oraz dążenia niektórych producentów do obniżenia kosztów wytwarzania (Schieber, 2018). Zjawisko to szczególnie dotyczy branży mleczarskiej, w której stosowane są m.in. rozcieńczanie surowca, substytucja tłuszczu mlecznego tłuszczami roślinnymi czy manipulacje składem surowcowym (Bach, 2020; Giha, 2021). Sery dojrzewające, jako produkty wysokomarżowe, są w tej sytuacji wyjątkowo narażone na nieuczciwe praktyki, co w dłuższej perspektywie prowadzi do utraty zaufania konsumentów i naruszenia reputacji przedsiębiorstw. Wobec tych wyzwań kluczowe staje się opracowanie metod pozwalających na skuteczne monitorowanie autentyczności i jakości produktów.

Tradycyjne metody analityczne, choć wysoce wiarygodne, charakteryzują się wysokimi kosztami, czasochłonnością oraz ograniczoną przydatnością do zastosowań in-line (Pagkaliwangan, 2019). Sytuacja ta prowadzi do rosnącego zainteresowania metodami szybkimi, nieniszczącymi i możliwymi do integracji z systemami monitoringu procesowego.

W literaturze z obszaru nauk o zarządzaniu i jakości podkreśla się, że sprawny system kontroli stanowi kluczowy element zdolności dynamicznych przedsiębiorstwa (Teece, 2018). Metody wykorzystujące parametry elektryczne t.j. przewodność, impedancję i pojemność

elektryczną, oferując potencjalnie szybkie, obiektywne i opłacalne narzędzie oceny zmian jakościowych, co sprzyja ich rosnącemu znaczeniu w praktyce przemysłowej (Wu, 2019). W połączeniu z metodami analizy statystycznej i systemami wspomagania decyzji mogą stanowić ważne uzupełnienie klasycznych procedur kontroli jakości (Shojaeinasab, 2022).

Niniejsza rozprawa doktorska, pt. „Innowacyjne narzędzie oceny jakości produktów serowarskich”, koncentrowała się na opracowaniu koncepcji metody identyfikacji zmian jakościowych w czasie dojrzewania serów i wyrobów seropodobnych, ze szczególnym uwzględnieniem pomiaru parametrów elektrycznych, mechanicznych i fizykochemicznych. W pracy przyjęto, że „narzędzie oceny jakości” obejmuje zintegrowany układ pomiarowy, metodykę akwizycji danych, modelowanie zależności między parametrami elektrycznymi a wyróżnikami technologicznymi oraz koncepcję jego zastosowania w procesach zarządzania jakością. Przyjęte cele dotyczyły w szczególności:

- ✓ wielowymiarowej analizy jakości produktów serowarskich, obejmującej właściwości fizykochemiczne, mechaniczne i elektryczne, co umożliwiło pełniejszą charakterystykę zmian zachodzących w czasie ich dojrzewania,
- ✓ określenie możliwości wykorzystania metod elektrycznych opracowanych na podstawie modelu RCC jako narzędzia wcześniejszej identyfikacji zmian jakościowych w porównaniu z metodami klasycznymi (referencyjnymi),
- ✓ identyfikację i ocenę istotności parametrów technologicznych wpływających na jakość, z zastosowaniem metod statystycznych, w tym wielowymiarowych i prognostycznych,
- ✓ ocenę potencjału zastosowania innowacyjnej metody elektrycznej jako narzędzia diagnostycznego wspierającego proces zarządzania jakością produktów serowarskich, w tym wstępną ocenę autentyczności serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych z odniesieniem do wymagań systemów zapewnienia jakości i bezpieczeństwa żywności stosowanych w przedsiębiorstwach mleczarskich.

W ujęciu nauk o zarządzaniu i jakości niniejsza praca stanowi przykład integracji zaawansowanych metod pomiarowych z praktycznymi potrzebami zarządzania systemem jakości. Jednym z głównych wyzwań było opracowanie i wstępna weryfikacja narzędzia, które nie tylko okazało się efektywne w warunkach laboratoryjnych, ale w przyszłości może zostać dostosowane do warunków przemysłowych, wspierając menedżerów w monitorowaniu procesu dojrzewania, diagnozowaniu niezgodności oraz ograniczaniu strat. Zaznacza się przy tym, że ewentualne wdrożenie takich rozwiązań wymaga czasu i dalszych badań, a niniejsza rozprawa koncentruje się na etapie laboratoryjnym.

Struktura rozprawy obejmuje siedem rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono kontekst rynkowy oraz zagadnienia dotyczące jakości serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych. Rozdział drugi obejmuje problematykę zarządzania jakością w przedsiębiorstwach mleczarskich, rolę systemów nadzoru oraz przegląd metod oceny jakości – zarówno klasycznych, jak i innowacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem metod wykorzystujących właściwości elektryczne. W rozdziale trzecim sformułowano cel główny, cele szczegółowe oraz hipotezy badawcze, natomiast rozdział czwarty prezentuje materiał i metodykę badań. Rozdział piąty zawiera wyniki badań oraz ich dyskusję, z podziałem na etapy dotyczące mleka, serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych. W rozdziale szóstym omówiono znaczenie teoretyczne i praktyczne uzyskanych wyników dla nauk o zarządzaniu i jakości oraz dla praktyki zarządzania jakością w przedsiębiorstwach mleczarskich. Rozdział siódmy przedstawia podsumowanie i wnioski oraz wskazuje kierunki dalszych badań.

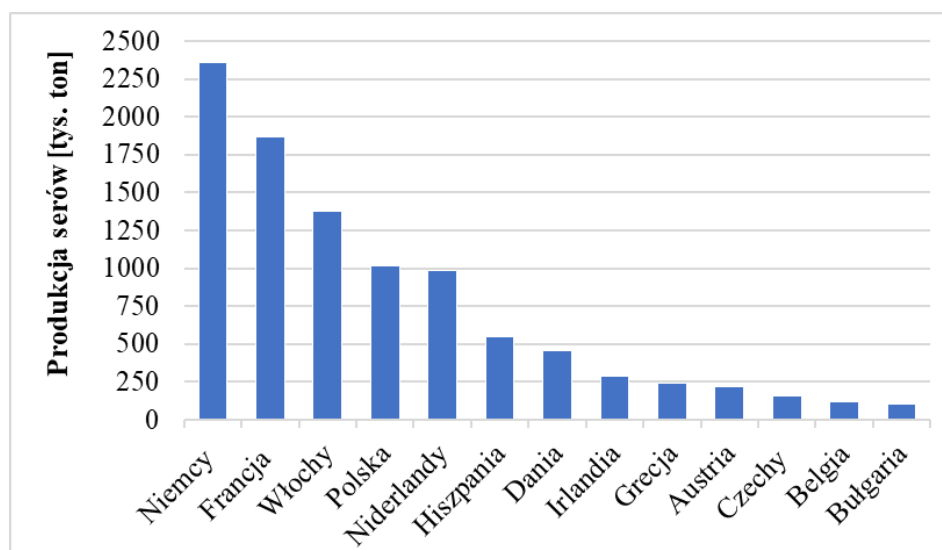
Podsumowując, niniejsza praca ma na celu dostarczenie nowych rozwiązań w obszarze zarządzania jakością, wspierając rozwój szybkich, nieniszczących metod oceny parametrów jakościowych produktów serowarskich - serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych. Wykorzystanie właściwości elektrycznych produktów pozwoli na wcześniejsze wykrywanie odchyleń w ich charakterystyce jakościowej i bardziej efektywne monitorowanie procesu dojrzewania, co może w przyszłości wspierać przedsiębiorstwa mleczarskie w doskonaleniu procesów oraz budowaniu przewagi konkurencyjnej na rynku produktów premium.

1. Trendy na rynku serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych

1.1. Produkcja i spożycie serów dojrzewających w Polsce - uwarunkowania i wyzwania jakościowe

Produkcja serów dojrzewających w Polsce stanowi jeden z najbardziej rozwijających się segmentów przemysłu mleczarskiego, co wynika z rosnącego popytu krajowego i sprzyjających warunków na rynkach eksportowych. Zgodnie z danymi Agencji Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa (ARiMR) oraz Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) w 2004 roku krajowa produkcja serów dojrzewających wynosiła 219 tysięcy ton, w 2014 roku - 301 tysięcy ton, a w 2022 roku wzrosła do 384 tysięcy ton. Tak znaczący przyrost odzwierciedla zmieniające się preferencje konsumentów, poszukujących wyrobów o wyrazistym profilu smakowym i wysokiej jakości (KOWR, 2024).

Polska jest jednym z kluczowych producentów serów w Unii Europejskiej, zajmując wysoką lokatę na tym rynku (Rysunek 1). Według danych z 2023 roku, Polska plasuje się w czołówce wytwórców, co świadczy o dużym znaczeniu krajowego sektora mleczarskiego na arenie międzynarodowej. W tym samym okresie, uwzględniając również sery świeże i twarogowe, łączna produkcja serów wzrosła z 219 tys. ton (2004 r.) do ponad 1000 tys. ton (2023 r.).



Rysunek 1. Najwięksi producenci serów w UE – dane 2023 r.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych Biura Analiz i Strategii KOWR

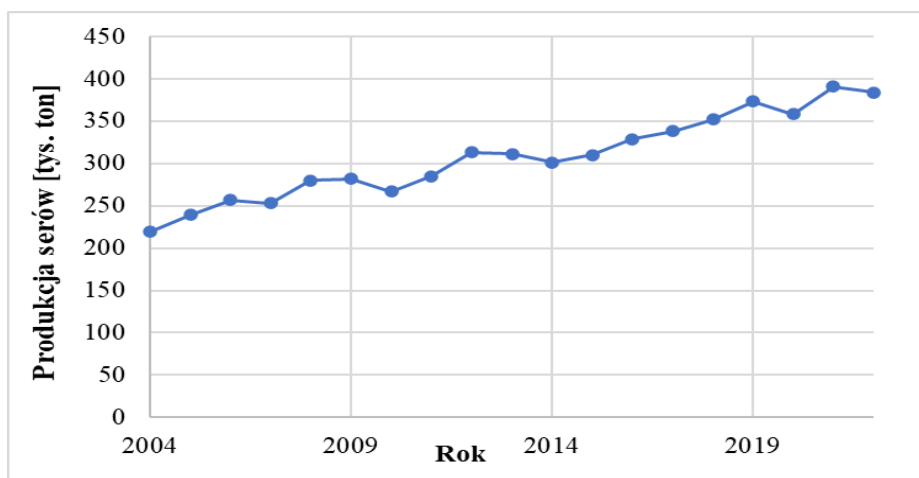
W strukturze produkcji dominują sery twarogowe (51% udziału) oraz sery podpuszczkowe dojrzewające (39%), podczas gdy sery topione stanowią 8%, a pozostałe rodzaje – 2%. Z kolei w ujęciu wartościowym sery podpuszczkowe dojrzewające stanowią 51% sprzedaży serów (ok. 6,3 mld zł w 2021 r.). W kontekście krajowej produkcji, sery

dojrzewające charakteryzują się wysokim potencjałem eksportowym – Polska eksportuje je głównie na rynki Unii Europejskiej oraz do krajów Bliskiego Wschodu. Rosnące zainteresowanie tymi produktami na świecie sprawia, że stanowią one strategiczny segment dla rozwoju polskiego mleczarstwa (KOWR, 2021).

Wzrost produkcji i konsumpcji serów dojrzewających w Polsce to efekt synergii kilku kluczowych czynników: zmieniających się preferencji konsumenckich, dynamicznego rozwoju technologii mleczarskich oraz intensyfikacji działań eksportowych (Wiza, 2022; Świąder, 2022). W obliczu dalszego rozwoju branży, istotne stają się działania promujące polskie marki oraz wspierające ich jakość i rozpoznawalność, co wzmacnia pozycję krajowego mleczarstwa zarówno na rynku wewnętrznym, jak i zagranicznym (Baran, 2024).

Kluczową rolę odgrywa rosnący popyt zagraniczny, który sprzyja inwestycjom w nowoczesne zakłady przetwórcze i zwiększeniu skali produkcji. W 2021 roku z Polski wyeksportowano 153 tys. ton serów dojrzewających, podczas gdy import wynosił jedynie 67 tys. ton, wykazując dodatnie saldo handlu zagranicznego (KOWR, 2021). Dane Głównego Urzędu Statystycznego (GUS, 2023) oraz Instytutu Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej (IERiGŻ, 2022) potwierdzają kontynuację tego trendu - w 2023 roku produkcja przekroczyła 300 tys. ton, tj. o 15% więcej niż w 2018 roku. Szczególne tempo wzrostu odnotowano w województwach podlaskim, wielkopolskim oraz mazowieckim – regionach o silnym zapleczu technologicznym i infrastrukturze przetwórstwa mleka.

Obraz długoterminowego wzrostu produkcji serów podpuszczkowych dojrzewających w latach 2004–2021 przedstawia (Rysunek 2). Dane potwierdzają, że na przestrzeni ostatnich lat ta kategoria odnotowuje istotny wzrost – z 219 tys. ton w 2004 r. do 391 tys. ton w 2021 r. (+79% względem 2004 roku), co wyraźnie koreluje z rozwojem technologii w sektorze mleczarskim i umiędzynarodowieniem branży.



Rysunek 2. Produkcja serów podpuszczkowych dojrzewających w Polsce

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Biura Analiz i Strategii KOWR

Wzrostowi produkcji towarzyszy również systematyczny wzrost cen serów dojrzewających. Na początku stycznia 2024 roku przeciętna cena Edamskiego wynosiła 20,96 zł/kg, natomiast Gouda kosztowała 21,80 zł/kg, podczas gdy w sierpniu 2020 roku obie odmiany kształtowały się na poziomie około 13,14 zł/kg (Biura Analiz i Strategii KOWR na podstawie danych GUS). Wzrost cen o kilkadziesiąt procent w ciągu zaledwie trzech lat wynika z szeregu czynników: drożejącego surowca (mleka), wzrostu kosztów energii, transportu i pracy, a także z utrzymującego się wysokiego popytu krajowego i zagranicznego.

Wzrost produkcji serów i cen towarzyszy rosnącemu zainteresowaniu konsumentów. Dane IERiGŻ wskazują, że w 2006 roku przeciętne roczne spożycie serów w Polsce wynosiło 9,5 kg na osobę, w 2016 roku – 11,2 kg, a w 2022 roku osiągnęło poziom 12,4 kg. Mimo że, sytuacja nadal plasuje Polskę w średniej grupie krajów UE pod względem spożycia serów, to dynamika jest wysoka. Dodatkowo, z badań budżetów gospodarstw domowych prowadzonych przez GUS (2016) wynika, iż:

- ✓ spożycie serów podpuszczkowych dojrzewających jest wyższe w dużych aglomeracjach (0,50 kg/osobę miesięcznie) niż na terenach wiejskich (0,39 kg/osobę),
- ✓ osoby w wieku 50–60 lat częściej wybierają sery dojrzewające niż młodsze grupy wiekowe,
- ✓ konsumpcja istotnie rośnie wraz z wykształceniem głowy gospodarstwa domowego (0,36 kg/osobę wśród osób z wykształceniem gimnazjalnym lub niższym vs 0,53 kg/osobę przy wykształceniu wyższym),
- ✓ w gospodarstwach osób rozwiedzionych (0,52 kg/osobę) oraz panien i kawalerów (0,48 kg/osobę) spożywano więcej serów dojrzewających niż w innych typach gospodarstw (0,43–0,46 kg/osobę).

Zainteresowanie serami dojrzewającymi obserwuje się także w kontekście modyfikacji nawyków żywieniowych społeczeństwa. Wzrost liczby osób stosujących dietę wegetariańską oraz ograniczających spożycie mięsa (tzw. fleksitarianizm) sprawia, że produkty mleczarskie, w tym sery dojrzewające, są postrzegane jako wartościowe źródło białka i składników mineralnych (PIE, 2021). W efekcie wzrasta zainteresowanie wyrobami o zróżnicowanym profilu smakowym, co przekłada się na poszerzanie asortymentu i ulepszanie technologii produkcji.

Na obserwowaną tendencję wpływają zarówno czynniki makroekonomiczne, jak i technologiczne. Stabilny wzrost dochodów gospodarstw domowych skutkuje zwiększonym wydatkowaniem na żywność wysokiej jakości. Z kolei programy Unii Europejskiej, takie jak Wspólna Polityka Rolna (WPR), sprzyjają modernizacji zakładów mleczarskich i wdrażaniu

nowoczesnych rozwiązań produkcyjnych, w tym automatyzacji procesów i systemów inteligentnego monitorowania dojrzewania (European Commission, 2021).

Wdrażanie nowoczesnych technologii w produkcji i kontroli jakości przyczynia się do lepszego sterowania procesami technologicznymi, zwiększenia ich powtarzalności oraz ograniczenia strat produkcyjnych (Gaworski, 2021). Postępująca integracja systemów zarządzania jakością z technologiami prognostycznymi – opartymi m.in. na modelowaniu parametrów biochemicznych i reologicznych – sprzyja optymalizacji łańcucha dostaw i stabilizacji cech sensorycznych produktów (Fernandes, 2017; Malik, 2022).

Ważnym aspektem pozostaje również kontrola bezpieczeństwa i jakości, którą ułatwia rozwój metod laboratoryjnych i pomiarowych (Munir, 2015). Lepsze monitorowanie warunków dojrzewania czy kontroli mikrobiologicznej przekłada się na wyższą powtarzalność cech produktu, a to z kolei zyskuje uznanie konsumentów i zwiększa konkurencyjność rodzimego sektora mleczarskiego (Adetunji, 2022, Hickey et al. 2015).

Reasumując, produkcja i spożycie serów dojrzewających w Polsce odnotowują stały wzrost, na który składa się szereg czynników:

- ✓ wzmożony popyt krajowy i zagraniczny na wyroby o wyraźnym smaku i wysokiej wartości odżywczej,
- ✓ rozwój technologiczny i modernizacja zakładów mleczarskich wspierane funduszami unijnymi,
- ✓ zmiany w preferencjach konsumentów, w tym rosnąca grupa osób stosujących diety ograniczające mięso,
- ✓ wzrost poziomu wykształcenia i dochodów w społeczeństwie, co sprzyja wyborowi produktów o wyższej jakości.

Trwałe zmiany w strukturze podaży i popytu stawiają przed sektorem mleczarskim poważne wyzwania w zakresie utrzymania wysokiej, powtarzalnej jakości produktów. Wymaga to nie tylko doskonalenia procedur kontrolnych, lecz także wdrażania nowoczesnych narzędzi wspomagania decyzji, służących optymalizacji procesów produkcyjnych. Dalszy rozwój sektora zależy również od skutecznego transferu wiedzy między ośrodkami badawczymi a przemysłem, co umożliwia szybkie wdrażanie wyników badań i utrzymywanie wysokiego poziomu innowacyjności. Pomimo wzrostu cen, popyt na sery dojrzewające pozostaje wysoki, a Polska, jako jeden z czołowych producentów w Unii Europejskiej, ma realną szansę na dalsze wzmacnianie swojej pozycji rynkowej. Przedsiębiorstwa mleczarskie, dostosowując się do nowych trendów i wdrażając innowacyjne techniki produkcji, mogą skutecznie wykorzystać ten potencjał rozwojowy, umacniając konkurencyjność krajowej branży zarówno na rynku wewnętrznym, jak i międzynarodowym. W perspektywie

zarządzania jakością oznacza to konieczność rozwijania metod oceny, które pozwolą na szybkie, wiarygodne i powtarzalne monitorowanie cech serów dojrzewających w całym łańcuchu wartości.

1.2. Jakość serów dojrzewających – klasyfikacja, proces produkcji oraz uwarunkowania technologiczne i konsumenckie

Sery dojrzewające należą do jednej z najbardziej rozwiniętych i istotnych kategorii produktów mleczarskich, wykazując istotne znaczenie zarówno w kontekście rynkowym, jak i technologicznym ze względu na swoje unikalne właściwości sensoryczne oraz złożony proces wytwarzania (Fox, 2017).

Zgodnie z definicją, ser jest wyrobem otrzymywanym w wyniku koagulacji białek mleka pod wpływem podpuszczki lub innych czynników koagulujących oraz częściowego oddzielenia serwatki (Guinee, 2016). Dokumenty Kodeksu Żywnościowego FAO/WHO wskazują, że ser może być dojrzały lub niedojrzały, miękki, półtwardy, twardy bądź bardzo twardy, o proporcji białek serwatkowych do kazeiny nieprzekraczającej poziomu charakterystycznego dla mleka (Codex Alimentarius, 2018).

W literaturze wyróżnia się kilka tysięcy gatunków serów, różniących się m.in. rodzajem mleka (krowie, owcze, kozie), sposobem koagulacji (podpuszczkowe, kwasowe, kwasowo-podpuszczkowe), zawartością tłuszczu, konsystencją czy obecnością pleśni (O’Callaghan i O’Sullivan, 2023). Różnorodność ta wynika z odmiennych uwarunkowań geograficznych, historycznych i technologicznych oraz stanowi ważny kontekst dla kształtowania strategii jakości i oferty produktowej w przedsiębiorstwach mleczarskich (Luning et al., 2005). Tabela 1 przedstawia wybrane kryteria klasyfikacji serów dojrzewających.

Tabela 1. Przykładowe klasyfikacje serów

Kryterium podziału	Wyszczególniane grupy
Rodzaj użytego mleka	krowie, owcze, kozie oraz mieszane
Sposób uzyskiwania skrzepu	podpuszczkowe, kwasowe i kwasowo-podpuszczkowe
Sposób dojrzewania	twarogowe dojrzewające, twarogowe niedojrzewające, dojrzewające podpuszczkowe (żółte i pleśniowe)
Oczkowanie	sery z oczkami, bez oczek, z oczkami międzyziarnowymi
Obecność pleśni	mieszane, z porostem bądź przerostem pleśni
Zawartości tłuszczu	twarogowe (chude, półtłuste, pełnotłuste, śmietankowe), podpuszczkowe (pełnotłuste, tłuste, półtłuste)
Zawartość wody	miękkie, twarde i półtwarde
Typ sera	twarogowe, topione, żółte-podpuszczkowe, pleśniowe

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Przybyłowski (2008), FOX, (2017).

Sery dojrzewające to szczególna kategoria w przemyśle mleczarskim, ceniona z uwagi na:

- ✓ walory sensoryczne – bogactwo smaków i aromatów kształtowanych w długotrwałych procesach proteolizy, lipolizy i fermentacji (Johnson, 2019),
- ✓ wysoką wartość odżywczą – obecność pełnowartościowego białka, mikroelementów (m.in. wapnia, fosforu), witamin, a także bioaktywnych peptydów oraz kwasów tłuszczowych nienasyconych (Fox, 2017, Ranadheera, Naumovski i Ajlouni, 2018),
- ✓ trwałość i różnorodność – możliwość długoterminowego przechowywania oraz szeroka gama tekstur, konsystencji i smaków (Niro, 2022).

Zawarty w mleku tłuszcz mlekowy – będący nośnikiem aromatu i kluczowym składnikiem strukturalnym – zawiera setki kwasów tłuszczowych, w tym wielonienasycone kwasy linolowy i linolenowy (Cichosz i Czeczot, 2010). Jego odpowiedni poziom wpływa na cechy reologiczne sera, sprężystość i akceptowalność sensoryczną (Guinee, 2016).

Tabela 2. Charakterystyka produkcji i cech głównych typów serów dojrzewających

Typ sera	Przykład	Technologia	Cechy produktu
Angielski	Cheddar	Czedaryzacja – wstępne dojrzewanie, rozdrabnianie, solenie, prasowanie, dojrzewanie 2–3 mies.	Twardy, gładki, ostry, lekko kwaśny.
Holenderski	Edamski, Gouda	Łagodne prasowanie, dojrzewanie z udziałem bakterii.	Twardy, delikatny, lekko orzechowy.
Maziowy	Limbski, Munster, Livarot	Rozwój bakterii i drożdży tworzących maź na powierzchni.	Wyrzisty aromat, miękka mazista konsystencja.
Pomazankowy	Bryndza	Dojrzewanie z udziałem pleśni i bakterii; mielony i solony skrzep owczy.	Miękki, pastowaty, ostry, lekko jełki.
Solankowy	Feta, Telega	Dojrzewanie w solance.	Półmiękki, biały/ kremowy, słony, delikatny.
Szwajcarski	Ementaler, Gruyère	Mleko podgórskie, bakterie termofilne; trzystopniowe dojrzewanie.	Twardy, aromatyczny, orzechowy, elastyczny, z oczkami.
Szwajcarsko-holenderski	Salami, Tylżycki	Dojrzewanie na maź z udziałem <i>Brevibacterium</i> ; masowanie i obracanie.	Półtwardy, elastyczny, lekko pikantny, nieregularne oczka.
Wędzony	Gryficki, Rolada ustrzycka	Niższa tłustość mleka; wędzenie pod koniec dojrzewania.	Półmiękki/półtwardy, łagodny, lekko kwaśny.
Włoski	Parmezan, Romano	Prasowane duże cylindry, dojrzewanie 1–3 lata.	Bardzo twardy, słony, pikantny, mało wody.
Z masy parzonej	Mozzarella, Oscypek	Parzenie masy serowej; czasem wędzenie.	Pikantny, lekko słony, zwarty, elastyczny.
Z porostem pleśni	Brie, Camembert	Powierzchniowa pleśń <i>Penicillium</i> ; dojrzewanie od zewnątrz.	Miękki, łagodny, lekko pieczarkowy.
Z przerostem pleśni	Roquefort, Gorgonzola, Lazur	Nakłuwanie, rozwój <i>P. roqueforti</i> , intensywna proteoliza.	Niebieskie żyłki, ostry smak, aromat pleśni.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Przybyłowski, (2008); Śmietana, (2006).

W obrębie serów dojrzewających występuje znaczna różnorodność w zakresie składu i procesu produkcji – od serów o krótkim okresie dojrzewania po sery dojrzewające nawet

kilka lat (np. Parmigiano-Reggiano). Podczas dojrzewania zachodzą intensywne przemiany mikrobiologiczne i biochemiczne, w tym proteoliza kazeiny, lipoliza tłuszczów oraz metabolizm laktozy i kwasu mlekowego, co przekłada się na zróżnicowane walory smakowo-zapachowe oraz teksturę (Martínez-Ruiz i in., 2021). Tabela 2 syntetycznie prezentuje charakterystykę wybranych typów serów dojrzewających.

Jakość serów dojrzewających ma charakter wielowymiarowy i wynika zarówno z precyzyjnie prowadzonych procesów technologicznych, jak i z oczekiwań konsumentów. W ujęciu Feigenbauma (1999) obejmuje ona jakość projektową, wykonania oraz postrzeganą – a każdy z tych wymiarów znajduje zastosowanie w odniesieniu do serów dojrzewających. Oznacza to konieczność zintegrowanego podejścia do kontroli i doskonalenia procesów, aby zapewnić zgodność z wymaganiami prawnymi oraz satysfakcję konsumentów.

➤ **Jakość technologiczna serów dojrzewających**

Jakość technologiczna serów dojrzewających wynika z realizacji spójnie zaplanowanych, kontrolowanych i powtarzalnych procesów produkcyjnych. Kluczowe znaczenie mają jakość mleka surowego, przebieg fermentacji, warunki dojrzewania oraz ochrona produktu przed niekorzystnymi wpływami środowiskowymi (Cruz, 2019, Martínez-Ruiz, 2021). Właściwe zarządzanie każdym etapem procesu technologicznego stanowi fundament dla zapewnienia standaryzacji partii produkcyjnych oraz minimalizacji kosztów związanych z wadliwą jakością.

Dla większości serów dojrzewających proces technologiczny obejmuje kolejne, powiązane etapy (O’Callaghan i O’Sullivan, 2023):

- ✓ przygotowanie i standaryzację mleka (filtrowanie, chłodzenie, ewentualna pasteryzacja oraz normalizacja zawartości tłuszczu i białka),
- ✓ ukwaszanie, koagulację i obróbkę skrzepu (dodatek kultur starterowych i podpuszczki, krojenie i mieszanie skrzepu w celu kontroli synerezy),
- ✓ dogrzewanie, formowanie i prasowanie (kształtowanie struktury, kształtu i oczkowania sera),
- ✓ solenie (w solance lub na sucho),
- ✓ dojrzewanie w kontrolowanych warunkach temperatury i wilgotności,
- ✓ pakowanie i przygotowanie do dystrybucji.

Parametry tych etapów (np. temperatura, czas, intensywność obróbki mechanicznej) wpływają bezpośrednio na teksturę, oczkowanie, trwałość oraz profil sensoryczny sera (Martínez-Ruiz, 2021; Niro, 2022).

Mikrobiologiczny skład mleka determinuje cały proces wytwarzania sera oraz możliwość jego wykorzystania do określonego typu produktów. Kluczowe znaczenie ma identyfikacja

obecnych grup bakterii i ich funkcji technologicznych (McSweeney, 2004; Bovo, 2021). Wyróżnia się dwie zasadnicze grupy mikroflory (Żuraw, Chojnowski i Jęsiak, 1997):

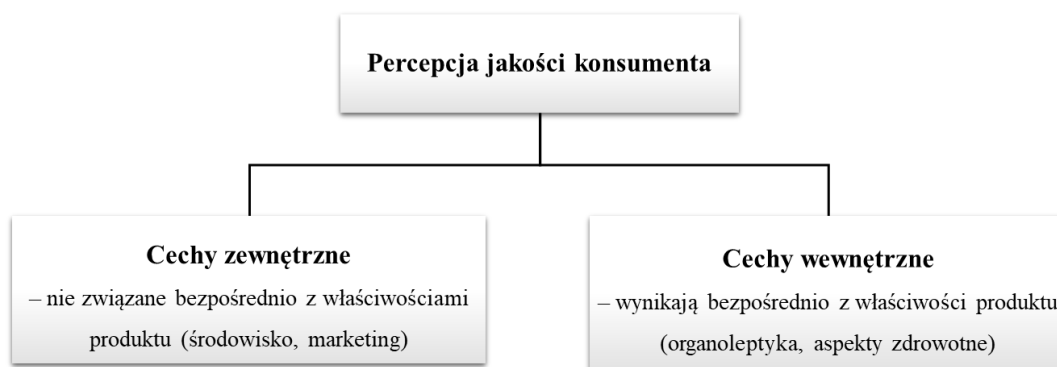
- kultury starterowe (SLAB) – celowo dodawane bakterie kwasu mlekowego (*Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*), które obniżają pH, kreują profil smakowy i przeciwdziałają rozwojowi mikroflory patogenicznej,
- kultury niestarterowe (NSLAB) – obecne naturalnie w mleku lub środowisku produkcyjnym; bardziej aktywne w długich procesach dojrzewania (Beresford i Williams, 2004).

Odpowiedni dobór i kontrola kultur mikrobiologicznych stanowią obecnie jeden z filarów systemowego podejścia do zapewnienia bezpieczeństwa i powtarzalności jakości serów dojrzewających (Bovo, 2021).

➤ **Aspekty konsumenckie jakości serów dojrzewających**

Współczesny konsument staje się coraz bardziej wymagający i świadomy, a jakość żywności jest przez niego postrzegana jako złożone i wielowymiarowe pojęcie. Nie ogranicza się ono wyłącznie do cech sensorycznych czy fizykochemicznych produktu, ale obejmuje także aspekty zdrowotne, ekologiczne, funkcjonalne i emocjonalne. Zarządzanie jakością serów dojrzewających musi zatem uwzględniać oczekiwania konsumentów wynikające z ich stylu życia, przekonań żywieniowych, a także czynników kulturowych i ekonomicznych (Grunert, 2005; Baryłko-Pikielna, 1995; Cichosz i Cieczot, 2010). Konsument oczekują nie tylko dobrego smaku, ale również bezpieczeństwa, autentyczności, zgodności składu z deklaracją producenta oraz spójności produktu z ich stylem życia (np. „naturalność”, tradycyjność, lokalne pochodzenie) (Delgado i Guinard, 2011; Guerreroi in., 2010).

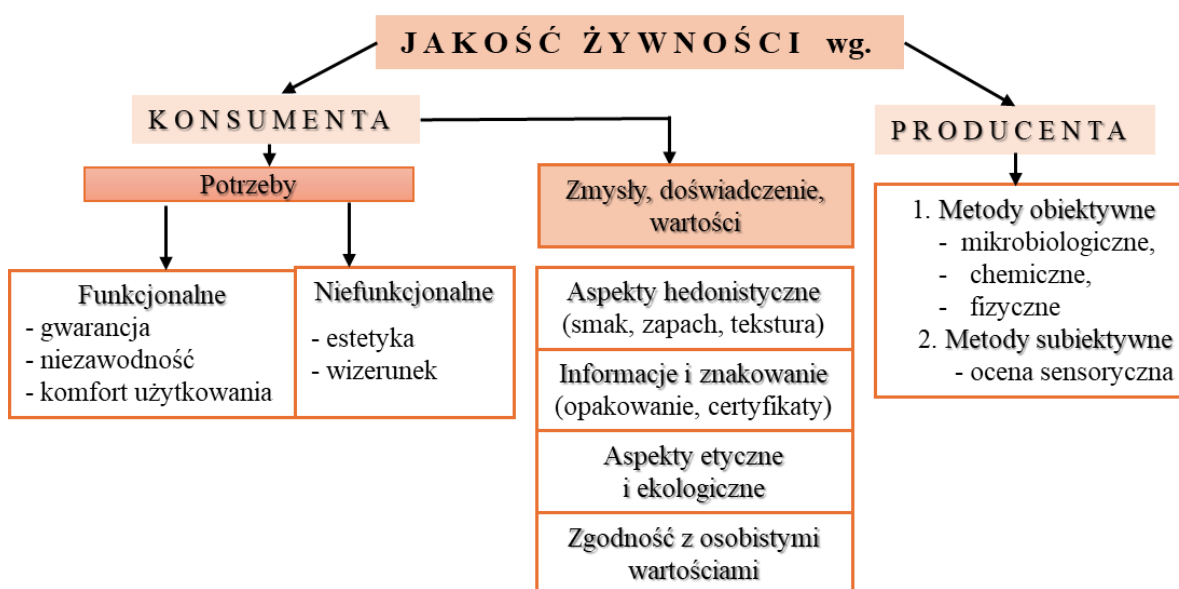
Model percepcji jakości żywności według Luning, Marcelis i Jongen (2005) wyróżnia cechy wewnętrzne produktu – takie jak smak, zapach, tekstura – oraz cechy zewnętrzne, obejmujące m.in. markę, kraj pochodzenia, formę i estetykę opakowania czy sposób prezentacji w punkcie sprzedaży. W przypadku serów dojrzewających obie grupy atrybutów odgrywają istotną rolę: konsumenci najpierw „kupują oczami”, a dopiero później weryfikują zgodność produktu z oczekiwaniami podczas konsumpcji. Schemat podziału cech istotnych z punktu widzenia konsumenta przedstawiono na Rysunku 3.



Rysunek 3. Podział percepcji jakości konsumenta

Źródło: opracowanie własne na podstawie Luning, Marcelis i Jongen (2005)

Ocena jakości żywności różni się w zależności od perspektywy oceniającego. W literaturze podkreśla się również, że producenci i konsumenci inaczej definiują jakość żywności (Jeznach, 2008; Delgado i Guinard, 2011). Dla producenta dominują kryteria obiektywne – parametry fizykochemiczne, mikrobiologiczne, zgodność z normami i stabilność procesu. Konsument natomiast bazuje głównie na ocenie zmysłowej, dotychczasowych doświadczeniach, cenie oraz zaufaniu do marki (Jeznach, 2008; Guerrero 2010, Delgado i Guinard, 2011). Różnice te ilustruje (Rysunek 4) i są one szczególnie istotne w segmencie produktów premium, jakimi są sery dojrzewające.



Rysunek 4. Postrzeganie jakości żywności przez konsumentów i producentów

Źródło: opracowanie własne na podstawie Jeznach (2008), Grzybowska-Brzezińska (2008), Guerrero et al. (2010), Delgado i Guinard, (2011).

Zarządzanie jakością serów dojrzewających musi uwzględniać różnorodne oczekiwania konsumentów. Badania rynkowe wskazują, że kluczowymi aspektami i cechami są:

- ✓ **cechy sensoryczne:** smak, zapach, tekstura, oczkowanie i barwa decydują o akceptowalności produktu (Widelska, 2007, Bielecka i Cichosz, 2020). Jakość sensoryczna jest efektem złożonych przemian biochemicznych podczas dojrzewania sera (Rubio, 2014, Shiota, 2015; McSweeney, 2004),
- ✓ **aspekty zdrowotne i bezpieczeństwa:** konsumenci oczekują produktów bezpiecznych mikrobiologicznie, o wysokiej wartości odżywczej, o ograniczonej zawartości tłuszczu i soli, oraz wzbogacanych w składniki funkcjonalne, takie jak kultury probiotyczne. Szczególnie cenione są sery o autentycznym smaku, wytwarzane w tradycyjny sposób i z naturalnych składników (Luning, Marcelis i Jongen, 2005; Cichosz i Czczot, 2010; Ranadheera, 2018, Niro, 2022),
- ✓ **atomybyty ekonomiczne i dostępność:** relacja jakości do ceny jest jednym z najczęstszych kryteriów zakupowych, szczególnie w przypadku droższych produktów premium, jakimi są sery dojrzewające (Liu, Zhang i Tang, 2015). Na decyzje zakupowe wpływa również szerokość oferty produktów premium, która wprowadza element konkurencyjności między markami,
- ✓ **wizerunek, marka i pochodzenie:** pozytywne skojarzenia z regionem produkcji czy tradycyjną metodą wytwarzania mogą wpływać na wybór konsumentki. Marka stanowi często gwarancję jakości (Martínez-Ruiz, 2021; Szajder i Tarant, 2003). Jednocześnie, jak wskazują najnowsze dane rynkowe, zainteresowanie konsumentów markami producentów w Polsce jest umiarkowane – aż 57% wartości sprzedaży paczkowanych serów żółtych stanowią marki własne sieci handlowych (CMR, 2024). To zjawisko podkreśla rosnącą rolę czynników ekonomicznych oraz siły dystrybutorów w kształtowaniu wyborów konsumentek.
- ✓ **dyspozycyjność produktu:** obejmuje m.in. łatwość porcjowania, rozpoznawalność opakowania, trwałość w transporcie i możliwość personalizacji porcji (Kijowski i Sikora, 2003; Barylko-Pikielna i Matuszewska, 2009). W najnowszych badaniach zwraca się uwagę na rolę atombytuw opakowania w kształtowaniu wielkości porcji oraz percepcji wartości produktu (Śmiechowska i Kłobukowski, 2017; Chu, Tang i Hetherington, 2024)
- ✓ **zgodność produktu z wartościami konsumentekimi:** konsumenci coraz częściej oczekują, że produkt będzie zgodny z ich systemem wartości – np. produkowany w sposób zrównoważony, lokalny, bez dodatków syntetycznych czy z poszanowaniem dobrostanu zwierząt (Cichosz i Czczot, 2010; Grzybowska-Brzezińska i Rudzewicz,

2013). W literaturze podkreśla się rosnące znaczenie dobrostanu zwierząt, zwłaszcza w kontekście mleczarstwa (Alonso i in., 2020; Zuliani i in., 2018; Aizaki i Takeshita, 2023). Tabela 3 syntetyzuje grupy czynników, stanowiąc punkt wyjścia do analizy oczekiwań konsumentów wobec serów dojrzewających.

Tabela 3. Główne grupy czynników kształtujących jakość

Czynniki kształtujące jakość	Opis
Sensoryczny	Weryfikacja przy użyciu zmysłów (barwa, wygląd, smak, zapach, tekstura)
Funkcjonalny i ekonomiczny	Łatwość eksploatacji, trwałość i koszt
Odżywczy i zdrowotny	Zawartość, przyswajalność oraz kaloryczność poszczególnych składników
Preferencje konsumenckie	Osobiste przekonania, tradycje

Źródło: Kolożyn-Krajewska i Sikora (2010)

Badania wskazują, że postrzeganie jakości żywności różni się m.in. ze względu na płeć: kobiety częściej akcentują korzyści zdrowotne i odżywcze produktów, podczas gdy mężczyźni większą uwagę zwracają na cechy użytkowe i proces zakupu (Pieczonka, 2009). Według Hrubá i Sudzina (2017) kobiety w większym stopniu koncentrują się na wartości odżywczej kupowanych serów, ich nazwie i producencie oraz aktywnie poszukują informacji na etykietach, podczas gdy mężczyźni częściej zwracają uwagę na pochodzenie produktu i informacje dostępne w Internecie. W segmencie serów dojrzewających szczególnego znaczenia nabiera tzw. *doświadczenie konsumenckie* – obejmujące zarówno odbiór sensoryczny, jak i element emocjonalny związany z tradycyjnością, lokalnością czy rzemieślniczym charakterem produktu (Ladwein i Sanchez, 2021). W efekcie jakość żywności staje się konstruktem psychospołecznym, w którym łączą się kwestie zdrowotne, sensoryczne, ekonomiczne, kulturowe i wizerunkowe (Guerrero i in., 2010).

W Polsce ramy prawne oceny jakości i bezpieczeństwa serów dojrzewających wyznaczają przede wszystkim:

- przepisy unijnego „pakietu higienicznego” (Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 i 853/2004)
- krajowe regulacje dotyczące jakości handlowej i znakowania żywności (m.in. Ustawa z 21 grudnia 2000 r. o jakości handlowej artykułów rolno-spożywczych oraz rozporządzenie MRiRW z 23 grudnia 2014 r. w sprawie znakowania poszczególnych rodzajów środków spożywczych, z późn. zm.).

Regulacje te nie definiują jednak szczegółowych progów oceny sensorycznej dla poszczególnych typów serów dojrzewających. W praktyce branżowej istotnym punktem

odniesienia pozostają zatem Polskie Normy – w przypadku serów podpuszczkowych PN-68/A-86230 – mające charakter niewiążących, dobrowolnych standardów technicznych, lecz powszechnie wykorzystywanych jako baza do formułowania specyfikacji jakościowych i procedur kontroli jakości. Norma PN-68/A-86230 definiuje szczegółowe kryteria organoleptyczne (kształt, barwa, oczkowanie, skórka, smak i zapach). Analogiczną funkcję odniesienia na poziomie międzynarodowym pełni Codex General Standard for Cheese (CXS 283-1978), który określa ogólne wymagania dla sera oraz odsyła do standardów odmianowych. Stanowią one podstawę oceny jakości handlowej oraz technologicznej, a także pomagają w identyfikacji potencjalnych niezgodności. Wybrane, najczęściej stosowane w praktyce zakładowej kryteria sensoryczne przedstawiono w (Tabeli 4). Utrzymanie stabilności tych cech jest możliwe dzięki właściwej jakości mleka surowego, kompetencjom serowarów, wysokim standardom higienicznym oraz odpowiedniemu wyposażeniu technologicznemu zakładu (Reps i Wiśniewska, 2008).

Tabela 4. Parametry opisujące jakość handlową serów dojrzewających

Parametr	Opis
Kształt	Regularny, kulisty, cylindryczny bądź blokowy; brak wzdęć (efekt nieprawidłowego przebiegu fermentacji) oraz wklęśnięć (zbyt burzliwa fermentacja)
Barwa	Jednolita, jednobarwna (brak smug, plam), dla niebarwionych serów naturalna, dla barwionych od jasnożółtej do ciemnożółtej
Oczkowanie	Kształt, wielkość oraz rozmieszczenie charakterystyczne dla danego typu sera, obecność zbyt dużej liczby małych oczek oraz tzw. szlaków (występowania szczelin składających się z oczek) uznawane jako defekty
Skórka	Mocna, gładka, sucha, bez pęknięć, do umiarkowanej grubości, brak uszkodzeń, brak wżerów, brak pleśni, brak białych plam (rak skórki)
Konsystencja	Zwarta, jednolita, elastyczna, kruchość oraz twardość zależna od typu sera
Smak	Charakterystyczny dla danego typu sera, aromatyczny, delikatny; niedopuszczalne smaki: kwaśny, gorzki, oborowy, niedojrzały, łojowaty, mydlasty, piekący, stęchły, posmak twarogowy lub środków myjących i chemikaliów
Zapach	Powinien być charakterystyczny dla danego typu sera, aromatyczny, delikatny; niedopuszczalne zapachy: drożdżowy, rybi, gnilny, zjełczały, tranowy, buraczany

Źródło: Reps i Wiśniewska (2008)

Omówione parametry stanowią kluczowe kryteria zarówno w kontroli jakości, jak i w standaryzacji serów dojrzewających. Umożliwiają identyfikację potencjalnych odstępstw od wzorca, które mogą świadczyć o niewłaściwym przebiegu procesu technologicznego lub wskazywać na ryzyko fałszowania produktu. Sery dojrzewające tworzą bowiem kategorię szczególnie wrażliwą z punktu widzenia jakości – ich właściwości sensoryczne, tekstura

i aromat są rezultatem precyzyjnie kontrolowanych procesów technologicznych, mikrobiologicznych i biochemicznych (McSweeney, 2004; Cichosz i Cieczot, 2010).

W literaturze podkreśla się, że zmiany zachodzące w czasie dojrzewania, takie jak proteoliza i lipoliza, bezpośrednio przekładają się na kształtowanie profilu smaku i zapachu sera (Fox i in., 2016). Coraz większą rolę odgrywają też podejścia umożliwiające „strojenie” profilu aromatycznego oraz jego modelowanie na podstawie danych doświadczalnych (Luo i in., 2024). Badania nad serami dojrzewającymi przechowywanymi w zróżnicowanych warunkach m.in. serami kozimi w oleju czy serami typu Ras z różnymi powłokami ochronnymi wykazały, że parametry sensoryczne są czułym wskaźnikiem wpływu przechowywania i zabezpieczenia powierzchni na jakość końcową produktu (Levak i in., 2023; Amer i in., 2023). Z perspektywy zarządzania jakością oznacza to, że systematyczna ocena tych cech może służyć nie tylko bieżącej kontroli partii produkcyjnych, lecz także optymalizacji warunków dojrzewania, przechowywania i dystrybucji serów dojrzewających.

Współczesny rynek wymaga od producentów nie tylko utrzymania wysokich standardów produkcji, ale też dostosowania się do szybko zmieniających się preferencji konsumenckich. Konsumenci coraz częściej poszukują produktów charakteryzujących się autentycznością, naturalnością i tradycyjnymi metodami wytwarzania, co znajduje odzwierciedlenie w rosnącej popularności serów premium i produktów regionalnych (Widelska, 2007; Shiota i in., 2015). Jednocześnie oczekują stabilnej jakości, powtarzalności cech sensorycznych oraz przejrzystości deklarowanych informacji – zarówno na etapie zakupu, jak i użytkowania produktu.

Wzrost zainteresowania żywnością premium wzmacnia znaczenie przejrzystości oraz wiarygodności deklarowanych cech produktu. Zjawiska te są jednak równocześnie źródłem praktyk nieuczciwych, które stają się coraz bardziej powszechne w sektorze mleczarskim (Martínez-Ruiz i in., 2021; Grzybowska-Brzezińska i Rudzewicz, 2013). W niniejszej pracy przyjmuje się, że o *zafalszowaniu* można mówić wyłącznie wtedy, gdy modyfikacja składu, na przykład częściowa lub całkowita substytucja tłuszczu mlecznego tłuszczami roślinnymi, nie zostaje jednoznacznie zakomunikowana konsumentowi i w konsekwencji wprowadza go w błąd co do charakteru, jakości lub pochodzenia produktu. W sytuacji, gdy zastąpienie tłuszczu mlecznego jest prawidłowo zadeklarowane na etykiecie, mamy do czynienia z decyzją technologiczno-ekonomiczną oraz innowacją recepturową, a nie z zafalszowaniem; takie wyroby powinny być klasyfikowane i oznakowane jako produkty seropodobne lub analogi serów, zgodnie z obowiązującymi regulacjami (Spink i Moyer, 2011; Visciano i Schirone, 2021).

Sytuacja ta stawia przed producentami oraz instytucjami nadzoru nowe wyzwania w zakresie zapewnienia zgodności produktów z normami jakościowymi i ochrony interesów konsumentów. Instytucje takie jak Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych (IJHARS), Inspekcja Weterynaryjna, Państwowa Inspekcja Sanitarna czy Urząd Ochrony Konkurencji i Konsumentów (UOKiK) odgrywają kluczową rolę w monitorowaniu rynku i weryfikacji autentyczności produktów mleczarskich.

W konsekwencji problematyka fałszowania serów dojrzewających staje się nie tylko zagadnieniem technologicznym, ale również istotnym obszarem analiz w naukach o zarządzaniu i jakości, wymagającym efektywnych narzędzi identyfikacji niezgodności oraz mechanizmów przeciwdziałania. Wątki te zostały rozwinięte w kolejnym podrozdziale.

1.3. Fałszowanie serów – skala nadużyć, konsekwencje dla konsumentów i przedsiębiorstw

Współczesny, zglobalizowany rynek żywnościowy sprzyja z jednej strony różnorodności oferty, z drugiej – zwiększa ryzyko nieuczciwych praktyk. W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost przypadków fałszowania żywności (Visciano i Schirone, 2021). Zjawisko to, określane jako „food fraud” lub „food adulteration”, polega na celowym wprowadzaniu konsumenta w błąd w celu osiągnięcia korzyści ekonomicznych (Choudhary 2020). Fałszerstwa te mogą przyjmować różne formy – od zamiany lub rozcieńczania składników, przez fałszywe oznaczenia geograficzne, aż po ukrywanie defektów jakościowych czy manipulacje dotyczące terminu przydatności do spożycia. W przypadku serów dojrzewających jest to szczególnie istotne ze względu na wysoką wartość jednostkową produktu, silne powiązanie z deklarowaną jakością oraz często podkreślaną w komunikacji rynkowej autentycznością i tradycją wytwarzania.

Skala tego procederu jest trudna do jednoznacznego oszacowania ze względu na jego ukryty charakter. Według WHO i FAO szacuje się, że nawet około 10% żywności znajdującej się w obrocie może być przedmiotem fałszerstw (Michalczyk, 2019). Główne przyczyny takiego stanu to:

- ✓ presja kosztowa w łańcuchu dostaw (rosnące ceny surowców, energii, transportu);
- ✓ wysoki popyt na produkty klasy premium (sery regionalne, ekologiczne, tradycyjne, rzemieślnicze);
- ✓ niski poziom wykrywalności niektórych rodzajów fałszerstw (zwłaszcza jeśli nie wpływają bezpośrednio na właściwości sensoryczne);
- ✓ brak efektywnych narzędzi nadzoru i zasobów kontrolnych (Bouzembrak i Marvin, 2016; Mba, 2015) oraz ograniczona zdolność tradycyjnych systemów zarządzania

jakością do identyfikowania zafałszowań, które nie pogarszają bezpośrednio bezpieczeństwa zdrowotnego produktu.

Zgodnie z Rozporządzeniem (WE) nr 178/2002, żywność uważa się za zafałszowaną, jeśli została poddana niedeklarowanej modyfikacji składu, błędnie oznakowana lub celowo zmanipulowana w celu ukrycia jej niskiej jakości. Podobnie w USA Food and Drug Administration (FDA) definiuje zafałszowanie - obecność substancji szkodliwych, fałszywe oznakowanie, zamianę składników lub usunięcie tych o wysokiej wartości odżywczej (FDA, 2018). Natomiast indyjska Food Safety and Standards Authority of India (FSSAI) rozszerza tę definicję, wyróżniając szereg przypadków, w których produkt uznaje się za sfałszowany, m.in. przez dodatek substancji niebezpiecznych, obecność ciał obcych lub oznakowanie sugerujące cechy, których produkt faktycznie nie posiada.

W przypadku serów dojrzewających **proceder fałszowania przybiera różne formy**, zależne od rodzaju produktu, potencjału zysku i możliwości technologicznych:

- ✓ ***Ukrywanie wad jakościowych związanych*** z niewłaściwą higieną produkcji lub nieprawidłowym procesem dojrzewania, co prowadzi do nadmiernej kwasowości, niepożądanego zapachu lub wzdęć sera (Van Ruth., 2017).
- ✓ ***Modyfikacja składu*** - zastępowanie tłuszczu mlecznego tańszymi tłuszczami roślinnymi (najczęściej olejem palmowym), obniżając walory odżywcze i sensoryczne produktu (Rune, 2025).
- ✓ ***Nieprawidłowe oznakowanie*** - fałszywe deklaracje dotyczące składu, gatunku mleka, zawartości tłuszczu czy białka, a także geograficznego pochodzenia (np. w ramach systemu ChNP/ChOG/GTS) (Malak-Rawlikowska, 2024).
- ✓ ***Manipulacja zawartością wody*** - poprzez dodatek lub celowe niewłaściwe usuwanie wody w celu zwiększenia masy, co wpływa na masę netto, strukturę i wartość odżywczą produktu (Chadha,, 2023).

Według raportu Najwyższej Izby Kontroli (NIK, 2019), Inspekcja Handlowa w 2018 roku stwierdziła nieprawidłowości w ponad połowie skontrolowanych partii żywności, w tym również w serach dojrzewających. Najczęstsze przypadki dotyczyły stosowania tłuszczów roślinnych zamiast mlecznych, mieszania gatunków mleka oraz fałszywego oznakowania etykiet. Coraz częściej obserwuje się również substytucję mleka krowiego suchą masą mleczną lub białkami roślinnymi przy jednoczesnym deklarowaniu „tradycyjnej metody produkcji”, mimo zastosowania tańszych technologii przemysłowych (Spink, 2013).

➤ **Proceder fałszowania serów – formy fałszowania i ich konsekwencje jakościowe**

Jednym z najczęstszych i najbardziej kontrowersyjnych przykładów fałszowania w przemyśle mleczarskim jest celowa substytucja tłuszczu mlecznego tańszymi tłuszczami roślinnymi, najczęściej olejem palmowym, bez odpowiedniego informowania o tym zabiegu na etykiecie produktu. Motywacja ma przede wszystkim charakter ekonomiczny – olej palmowy jest istotnie tańszy, a jego cena może być nawet kilkukrotnie niższa od ceny tłuszczu mlecznego (El-Nabawy, 2023). Dodatkowo jego właściwości fizykochemiczne (półstały stan w temperaturze 10–15°C, temperatura topnienia ok. 28°C) sprawiają, że z punktu widzenia technologii może imitować tłuszcz mleczny pod względem konsystencji i stabilności podczas przechowywania (Sambanthamurthi, 2000).

Z punktu widzenia konsumenta i bezpieczeństwa żywności, takie działania prowadzą do rażącego obniżenia jakości produktu. Sery, które na etapie produkcji zostały zafałszowane – na przykład poprzez zastąpienie tłuszczu mlecznego tłuszczem roślinnym – tracą swój charakterystyczny profil sensoryczny oraz bioaktywne składniki istotne dla zdrowia (Haider, 2024; Cichosz i Cieczot, 2010). Tłuszcz mleczny jest bowiem naturalnym źródłem wielu cennych związków, takich jak krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe (np. masłowy, kapronowy), fosfolipidy oraz sprzężony kwas linolowy (CLA), który wykazuje działanie przeciwnowotworowe, przeciwzapalne oraz wspiera metabolizm lipidów (Yao, 2024). W tłuszczach roślinnych substancje te są całkowicie nieobecne.

Substytucja tłuszczu mlecznego wyraźnie wpływa także na właściwości sensoryczne i reologiczne serów. Jak wykazały badania (Aljewicz, 2011, Giha, 2021, Bielecka i Cichosz, 2020) produkty z dodatkiem tłuszczów roślinnych różnią się od oryginałów smakiem, zapachem, barwą i teksturą – bywają mniej elastyczne, bardziej kruche i pozbawione kremowego profilu smakowego, co wpływa negatywnie na odbiór konsumencki. Podobne wnioski płyną z badań (Habliza, 2022), na których przykładzie serów typu Ras zostało wykazane, że przy niskim poziomie substytucji (do 2%) różnice sensoryczne były niewielkie, jednak już większy udział tłuszczu roślinnego prowadził do znacznego obniżenia akceptowalności oraz zawartości związków azotowych, co świadczyło o niższym stopniu dojrzałości sera.

W skrajnych przypadkach stosowanie niedozwolonych substancji takich jak zanieczyszczone zamienniki czy nielegalne dodatki technologiczne, może zagrażać zdrowiu konsumentów. W literaturze naukowej opisywano incydenty zatrucia pokarmowych, reakcji alergicznych, a nawet długofalowych skutków zdrowotnych związanych ze spożyciem produktów niezgodnych z deklaracją (Shears, 2010; Rune, 2025). Powtarzające się przypadki

falszerstw skutkują również utratą zaufania konsumentów do producentów, marek, a nawet całych kategorii produktów, co może mieć długoterminowy wpływ na postrzeganie jakości żywności (Lassoued, 2015).

Dla przedsiębiorstw proceder fałszowania niesie ze sobą poważne konsekwencje prawne, finansowe i reputacyjne. W przypadku wykrycia nieprawidłowości firmy narażone są na wysokie kary administracyjne, obowiązek wycofania produktów z rynku oraz utratę pozycji konkurencyjnej. W skrajnych przypadkach możliwa jest również odpowiedzialność karna osób odpowiedzialnych za produkcję (Manning i Soon, 2014). Aby zminimalizować ryzyko, producenci muszą wdrażać kosztowne i zaawansowane systemy kontroli jakości – obejmujące badania laboratoryjne, testy autentyczności, audyty dostawców oraz dokładne monitorowanie pochodzenia surowców (Spink, 2013). Z perspektywy zarządzania jakością oznacza to konieczność traktowania ryzyka zafałszowań jako integralnego elementu systemowego podejścia do jakości, a nie wyłącznie jako kwestii nadzoru prawnego.

Warto podkreślić, że fałszowanie żywności zakłóca również zasady uczciwej konkurencji. Firmy, które przestrzegają przepisów i inwestują w jakość, często nie są w stanie konkurować cenowo z podmiotami stosującymi substytuty i obniżające koszty praktyki. Tego typu nierówność może zniechęcać do podejmowania działań projakościowych i przyczyniać się do degradacji rynku (Lassoued, 2015; Bouzembrak i Marvin, 2016).

➤ **Ramy prawne i regulacje dotyczące fałszowania serów**

W Unii Europejskiej kwestie związane z bezpieczeństwem, autentycznością i jakością żywności są szczegółowo regulowane (Koca, Erbay i Öztürk 2022). Kluczowym aktem prawnym w tym zakresie jest Rozporządzenie (WE) 178/2002, które ustanawia ogólne zasady prawa żywnościowego i powołuje Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA). Dokument ten definiuje żywność zafałszowaną jako taką, która nie odpowiada deklarowanemu składowi, została błędnie oznakowana lub celowo zmanipulowana w celu ukrycia niższej jakości. Rozporządzenie podkreśla również odpowiedzialność wszystkich uczestników łańcucha żywnościowego za zapewnienie bezpieczeństwa i autentyczności produktów (Rozporządzenie WE 178/2002).

Dla przetworów mleczarskich szczególnie istotne znaczenie ma Rozporządzenie (EWG) 1898/87, które dopuszcza w ich produkcji wyłącznie stosowanie mleka oraz niezbędnych dodatków technologicznych – wykluczając użycie tłuszczów roślinnych jako zamienników dla tłuszczu mlecznego. Każda zmiana składu, która może wprowadzać konsumenta w błąd co do charakteru produktu, uznawana jest za praktykę nielegalną.

Z kolei kwestie dotyczące etykietowania produktów reguluje Rozporządzenie (UE) 1169/2011 w sprawie przekazywania konsumentom informacji na temat żywności, które nakłada na producentów obowiązek rzetelnego, jasnego i pełnego informowania o składzie produktów, w tym o obecności substytutów składników mlecznych. Brak takich informacji uznawany jest za działanie wprowadzające w błąd i podlegające sankcjom.

W polskim porządku prawnym zagadnienia te są ujęte w Ustawie z dnia 21 grudnia 2000 roku o jakości handlowej artykułów rolno-spożywczych (Dz.U. 2022 poz. 1220), która określa między innymi sposób znakowania produktów, obowiązki informacyjne producentów oraz sankcje za naruszenia. Szczególnej ochronie podlegają także produkty z certyfikatami - posiadające oznaczenia geograficzne, takie jak ChNP (Chroniona Nazwa Pochodzenia) i ChOG (Chronione Oznaczenie Geograficzne). Fałszowanie składu lub oznaczeń takich produktów narusza nie tylko przepisy prawa żywnościowego, ale również prawo własności intelektualnej, co skutkuje dodatkowymi konsekwencjami prawnymi. Warto zaznaczyć, że nazwa „ser” zastrzeżona jest wyłącznie dla produktów, w których tłuszcz mleczny nie został zastąpiony innym składnikiem. Wyroby, w których tłuszcz mleczny częściowo lub całkowicie zastąpiono tłuszczem roślinnym (np. olejem palmowym), muszą być jednoznacznie oznakowane jako „wyroby seropodobne”. Użycie określenia „ser” w odniesieniu do takich produktów stanowi poważne naruszenie przepisów i z punktu widzenia zarządzania jakością oznacza nie tylko niezgodność prawną, lecz także istotne ryzyko reputacyjne dla przedsiębiorstwa.

➤ Rola świadomości konsumenckiej i odpowiedzialności społecznej w ograniczaniu fałszowania serów

Rosnąca świadomość konsumentów w zakresie składu, metod produkcji i rzetelności deklaracji producentów odgrywa kluczową rolę w ograniczaniu zjawiska fałszowania serów. Współczesny nabywca oczekuje nie tylko wysokiej jakości sensorycznej i odżywczej, ale także transparentności, autentyczności oraz odpowiedzialności społecznej producentów (Lassoued, 2015).

Postawy prokonsumenckie przejawiają się m.in. w rosnącym zainteresowaniu etykietami produktów – konsumenci poszukują informacji dotyczących zawartości tłuszczu mlecznego, obecności substytutów, sposobu produkcji czy certyfikatów jakości i pochodzenia (Menozzi, 2022). Szczególną wagę przywiązuje się do oznaczeń takich jak: ChNP, ChOG, Gwarantowana Tradycyjna Specjalność (GTS) oraz znaków ekologicznych, które budują zaufanie i wskazują na wyższe standardy produkcji (Mucha i Vinogradov, 2025).

W dobie cyfryzacji konsumenci coraz aktywniej korzystają z nowoczesnych narzędzi, takich jak aplikacje mobilne umożliwiające skanowanie składu produktów, platformy opiniotwórcze i media społecznościowe, gdzie dzielą się swoimi doświadczeniami, ostrzeżeniami i rekomendacjami. Tego rodzaju działania mogą pełnić funkcję swoistej kontroli społecznej, zmuszając producentów do uczciwego i przejrzystego działania (Rialti, 2021).

Odpowiedzialność za jakość produktów nie spoczywa jednak wyłącznie na organach kontrolnych czy konsumentach. Współczesne przedsiębiorstwa mleczarskie, zwłaszcza funkcjonujące w segmencie premium, powinny traktować zarządzanie jakością nie tylko jako obowiązek prawny, ale również jako element strategii budowania reputacji i lojalności konsumentkiej. Odpowiedzialność społeczna firm obejmuje m.in. transparentność informacyjną, uczciwe pozyskiwanie surowców, etyczne praktyki produkcyjne oraz rzetelną komunikację z klientem (Prasanna, Verma, Bodh, 2024).

Wzrost świadomości konsumentkiej może więc pełnić funkcję motywującą dla rynku – nagradzając producentów działających w sposób uczciwy, a zarazem eliminując z rynku podmioty stosujące praktyki nieetyczne. W ujęciu długofalowym budowanie relacji opartych na zaufaniu staje się nie tylko źródłem przewagi konkurencyjnej, lecz także jednym z filarów odpowiedzialności społecznej przedsiębiorstwa i trwałego sukcesu rynkowego (Yener, Secer, Ghazalian, 2023).

Reasumując, fałszowanie serów dojrzewających stanowi wieloaspektowe wyzwanie dla branży mleczarskiej, obejmujące kwestie jakości i bezpieczeństwa żywności, a także etyczne oraz prawne aspekty. Praktyki takie jak substytucja tłuszczu mlecznego tłuszczami roślinnymi, fałszywe oznakowanie czy ukrywanie wad technologicznych nie tylko obniżają wartość odżywczą i sensoryczną produktów, ale również podważają zaufanie konsumentów i zaburzają zasady uczciwej konkurencji. Pomimo istniejących regulacji prawnych i systemów kontroli, skuteczna walka z tym procederem wymaga synergii nowoczesnych technik analitycznych, transparentności działań producentów oraz wzrostu świadomości konsumentkiej. W tym kontekście zarządzanie jakością w przemyśle mleczarskim staje się nie tylko narzędziem kontroli, lecz także strategią zarządzania ryzykiem reputacyjnym i budowania długoterminowego zaufania interesariuszy.

W kolejnym podrozdziale omówione zostaną trendy w produkcji wyrobów seropodobnych, koncentrujące się na zjawisku substytucji składników mlecznych oraz jego konsekwencjach dla jakości, autentyczności i percepcji konsumentkiej.

1.4. Trendy w produkcji wyrobów seropodobnych – substytucja składników mleka

W ostatnich latach znaczenie wyrobów seropodobnych – definiowanych jako produkty powstałe w wyniku częściowej lub całkowitej substytucji tłuszczu mlecznego tłuszczami roślinnymi – systematycznie rośnie na rynku spożywczym. Rozwój tego segmentu jest szczególnie widoczny w krajach o tradycji mleczarskiej, gdzie sery dojrzewające – choć nadal popularne – podlegają rosnącej liczbie innowacji, obejmujących zmiany w recepturach, modyfikacje wartości odżywczych oraz dostosowanie do potrzeb nowych grup konsumentów (Martínez-Ruiz, 2021). W Polsce obserwuje się podobny trend: wzrost produkcji serów dojrzewających oraz równoległe zwiększenie popytu na wyroby seropodobne, oferujące niższe koszty produkcji i alternatywy smakowo-dietetyczne (KOWR, 2022).

Na kierunki tych zmian wpływają również uwarunkowania podażowo-popytowe na rynku tłuszczu mlecznego. Według danych International Dairy Federation (IDF, 2024) światowa produkcja masła i pozostałych tłuszczów mleka wzrosła w 2023 r. o ok. 2,4%, a serów o ok. 2,2%, co dodatkowo zwiększa presję popytową na tłuszcz mleczny. W konsekwencji rośnie ilość odtłuszczonej suchej masy mleka (SNF), wymagającej zagospodarowania. Z perspektywy przedsiębiorstw sprzyja to poszukiwaniu alternatywnych rozwiązań technologicznych, w tym wykorzystaniu olejów roślinnych oraz rozwojowi wyrobów seropodobnych, które – przy zachowaniu pełnej transparentności oznakowania – mogą stanowić dla części konsumentów akceptowalną, tańszą lub funkcjonalnie zróżnicowaną alternatywę wobec klasycznych serów dojrzewających (IDF, 2024).

Podstawą produkcji wyrobów seropodobnych jest substytucja tłuszczu mlecznego olejami roślinnymi – m.in. palmowym, kokosowym, masłem shea – które po rafinacji wykazują właściwości fizyczne zbliżone do tłuszczu mlecznego, zachowując przy tym półstałą konsystencję w warunkach przechowywania (10–15 °C) (Konovalenko, 2019; Aljewicz, 2016). Odpowiednio dobrane mieszanki tłuszczów wraz z emulgatorami i stabilizatorami pozwalają uzyskać strukturę zbliżoną do tradycyjnych serów, co ułatwia ich akceptację wśród konsumentów, szczególnie o umiarkowanej świadomości składu.

Jednocześnie zastępowanie składników mlecznych niesie istotne konsekwencje żywieniowe i sensoryczne. Produkty seropodobne nie zawierają części bioaktywnych składników tłuszczu mlecznego, takich jak krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe czy CLA (Cichosz i Cieczot, 2010), co w wielu aspektach prowadzi do obniżenia wartości odżywczej. Z drugiej strony stosowane w nich tłuszcze roślinne nie zawierają cholesterolu i zazwyczaj charakteryzują się wyższym udziałem jedno- i wielonienasyconych kwasów tłuszczowych, co dla części konsumentów może być postrzegane jako cecha pożądana, zwłaszcza w kontekście

diet ukierunkowanych na ograniczenie spożycia cholesterolu. Profil sensoryczny takich wyrobów jest zwykle bardziej neutralny, a niekiedy określany jako „płaski”, co producenci kompensują dodatkami aromatycznymi, przyprawami lub modyfikacją fermentacji (Zhang, 2024).

Kierunki rozwoju rynku wyrobów seropodobnych są ściśle związane ze zmieniającymi się preferencjami konsumentów. Coraz więcej osób poszukuje produktów pochodzenia roślinnego również w segmencie nabiałowym. Najczęściej wskazywane motywy wyboru to:

- ✓ czynniki ekonomiczne – niższa cena (Johnson, 2019),
- ✓ preferencje dietetyczne i prozdrowotne – np. produkty bez laktozy, o mniejszej zawartości cholesterolu (Kamath, 2022),
- ✓ argumenty etyczne i środowiskowe – ograniczenie spożycia żywności pochodzenia zwierzęcego (Değirmenci, 2025).

Badania prowadzone w krajach UE wskazują, że konsumenci oczekują jednoznacznego oznaczenia produktu, pozwalającego odróżnić wyroby mleczne od tych z dodatkiem tłuszczów roślinnych (Luning i in., 2019). Taka transparentność stanowi fundament budowania zaufania i jest kluczowa dla podejmowania świadomych decyzji zakupowych.

Proces technologiczny produkcji wyrobów seropodobnych nawiązuje do klasycznego serowarstwa obejmuje ukwaszanie mleka, jego koagulację, krojenie skrzepu, oddzielanie serwatki, formowanie i dojrzewanie. Różnica polega na dodaniu tłuszczów roślinnych lub odpowiednio przygotowanych emulsji, zwykle na etapie przygotowania surowca lub formowania (Mohd, 2022). Osiągnięcie właściwych cech strukturalnych i sensorycznych wymaga precyzyjnego sterowania parametrami technologii, takimi jak temperatura, pH i wilgotność. Wyroby seropodobne stawiają także dodatkowe wyzwania:

- ✓ zachowanie właściwości sensorycznych (tekstury, topienia, aromatu),
- ✓ zapewnienie bezpieczeństwa mikrobiologicznego utrudnionego przez zmodyfikowany skład tłuszczowy,
- ✓ dobór kultur starterowych i parametrów pasteryzacji, pozwalających ograniczyć ryzyko niepożądanych zmian jakości.

Kwestie nazewnictwa oraz zasad etykietowania wyrobów seropodobnych, w tym zakaz używania określenia „ser” dla produktów z częściową lub całkowitą substytucją tłuszczu mlecznego, wynikają z przepisów prawa unijnego i krajowego, szczegółowo omówionych w podrozdziale 1.3. W praktyce zarządzania jakością oznacza to konieczność ścisłego powiązania parametrów receptury i procesu technologicznego z wymaganiami prawnymi dotyczącymi klasyfikacji i prezentacji produktu na rynku.

Z perspektywy producentów wyroby seropodobne stanowią narzędzie dywersyfikacji oferty, umożliwiają obniżenie kosztów i dostosowanie produktów do zmieniających się potrzeb rynku. Jednak rzetelne oznakowanie i przejrzysta komunikacja pozostają podstawą budowania zaufania – ich brak może prowadzić do poważnych szkód wizerunkowych (Manning i Soon, 2014). Producenci stosujący certyfikowane systemy jakości oraz strategie transparentności mogą uzyskać trwałą przewagę konkurencyjną w segmencie produktów alternatywnych (Martínez-Ruiz, 2021).

Reasumując, **wyroby seropodobne, powstające w wyniku substytucji tłuszczu mlecznego olejami roślinnymi, stanowią dynamicznie rozwijający się segment rynku.** Rozwój ten wynika zarówno z presji ekonomicznej i zmieniających się preferencji żywieniowych, jak i postępu technologicznego pozwalającego na wytwarzanie produktów o cechach zbliżonych do tradycyjnych serów (Balthazar, 2021). Warunkiem zrównoważonego rozwoju rynku jest jednak pełna transparentność oznakowania, która chroni konsumentów i wspiera zdrową konkurencję.

Z perspektywy zarządzania jakością i autentycznością oznacza to konieczność stosowania dokładnych metod identyfikacji składu oraz skutecznych narzędzi oceny jakości, pozwalających odróżnić sery dojrzewające od wyrobów seropodobnych. To właśnie potrzeba takich narzędzi – szybkich, obiektywnych i nieinwazyjnych – stanowi jeden z kluczowych impulsów do poszukiwania nowych metod oceny jakości, które zostaną omówione w dalszych rozdziałach rozprawy.

2. Zarządzanie procesem kontroli i metodami oceny jakości wyrobów mleczarskich w przedsiębiorstwach

W warunkach rosnącej konkurencji rynkowej i coraz większych oczekiwań konsumentów, zarządzanie jakością wyrobów gotowych staje się jednym z kluczowych elementów strategii konkurencyjnej nowoczesnych przedsiębiorstw mleczarskich. Dotyczy to w szczególności produkcji serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych, w których jakość końcowa zależy od kontroli wieloetapowych i złożonych procesów technologicznych (Gandhi, 2020). Kluczowym wyzwaniem pozostaje nie tylko utrzymanie stabilności parametrów jakościowych, ale również wdrażanie nowoczesnych, szybkich i niedestrukcyjnych metod diagnostycznych, umożliwiających ocenę produktów na różnych etapach ich cyklu życia (Carneiro, 2025).

W kontekście niniejszej rozprawy szczególną uwagę poświęcono innowacyjnym technikom elektrycznej oceny jakości, które w ostatnich latach zyskują na znaczeniu jako uzupełnienie lub alternatywa dla tradycyjnych technik kontrolnych. Zastosowanie pomiarów właściwości elektrycznych – takich jak przewodność, impedancja czy charakterystyki dielektryczne – otwierają nowe możliwości w zakresie oceny jakości produktów mleczarskich (Upadhyay, 2019), w tym również serów dojrzewających. Celem dalszych rozważań jest określenie ich potencjału praktycznego oraz możliwości integracji z systemami zarządzania jakością i wspomagania decyzji technologicznych.

W kolejnych podrozdziałach omówione zostaną zasady kontroli jakości, organizacyjne uwarunkowania jej wdrażania, korzyści i bariery systemów zarządzania, a także tradycyjne i innowacyjne metody oceny jakości produktów mleczarskich. Szczególny nacisk zostanie położony na wdrożenie i rozwój metod elektrycznych jako narzędzi wspierających zarządzanie jakością i innowacyjność procesów produkcyjnych.

2.1. Kontrola jakości w przemyśle mleczarskim – cele, wymagania i etapy postępowania

Kontrola jakości w przemyśle mleczarskim, zwłaszcza w produkcji serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych, stanowi jeden z kluczowych filarów zarządzania jakością. Obejmuje nie tylko weryfikację zgodności produktów z wymaganiami prawnymi i wewnętrznymi standardami, lecz także wspiera proces doskonalenia, budowanie zaufania konsumentów oraz utrzymanie konkurencyjności na rynku żywnościowym (Goetsch i Davis,

2014). Skutecznie zaprojektowany system kontroli jakości pełni równocześnie funkcję strażnika bezpieczeństwa oraz narzędzia wspierającego innowacje w łańcuchu wartości.

Podstawowym celem kontroli jakości jest bieżące monitorowanie zgodności parametrów fizykochemicznych, mikrobiologicznych i sensorycznych produktów z określonymi wymaganiami wynikającymi zarówno z przepisów prawa, jak i wewnętrznych standardów zakładu. Dotyczy to m.in. składu chemicznego (zawartości tłuszczu, białka, wody i soli), cech fizykochemicznych (aktywności wody, pH) czy składu mikroflory w serach dojrzewających. Wczesne wykrycie nieprawidłowości pozwala na szybkie reagowanie poprzez korektę procesu technologicznego, wyeliminowanie wadliwych partii i zapobieganie dalszym stratom (Giannakourou i Taoukis, 2020). Jednocześnie działania te przyczyniają się do zachowania powtarzalności cech sensorycznych, takich jak smak, konsystencja czy barwa, które są kluczowe dla postrzeganej jakości wyrobu przez konsumentów. Poza zapewnianiem stabilnych parametrów wyrobu i zgodności z przepisami prawnymi, kontrola jakości spełnia również funkcję motywacyjną i edukacyjną dla personelu. W przedsiębiorstwach nastawionych na doskonalenie kontrola jakości nie jest wyłącznie działaniem inspekcyjnym, ale staje się elementem systemowym – wspierającym codzienne operacje, strategię marketingową i rozwój nowych produktów.

Aby kontrola jakości mogła funkcjonować skutecznie, należy precyzyjnie zdefiniować wymagania zarówno dla surowca, jak i dla poszczególnych etapów produkcji i dystrybucji. W przemyśle mleczarskim istotne znaczenie mają m.in. wymagania dotyczące czystości mikrobiologicznej mleka, braku pozostałości antybiotyków, warunków pasteryzacji, przebiegu fermentacji oraz kontroli procesów dojrzewania. Kluczowe znaczenie ma także zgodność z międzynarodowymi normami, takimi jak ISO 22000, HACCP czy IFS Food, które wspierają identyfikację zagrożeń, zarządzanie krytycznymi punktami kontrolnymi (CCP) i dokumentowanie procesów w sposób zgodny z zasadami traceability (Bomba, 2020).

Systematyczna kontrola jakości w przedsiębiorstwie obejmuje pięć głównych etapów – projektowanie i wdrażanie wyrobu, projektowanie procesów technologicznych, fazę produkcji właściwej, dystrybucję i użytkowanie produktu, analizę niezgodności i doskonalenie (Rysunek 5). Już na etapie projektowania produktu definiuje się jego docelowe właściwości, tj. profil smakowy, skład chemiczny, teksturę czy termin przydatności oraz wymagania prawne i jakościowe, które musi spełniać (Oakland, 2014). Następnie, w fazie projektowania procesu, ustala się technologie wytwarzania (np. pasteryzacja, koagulacja, dojrzewanie), dobiera urządzenia oraz definiuje krytyczne punkty wymagające szczególnego nadzoru.



Rysunek 5. Etapy i elementy systemu kontroli jakości w przemyśle mleczarskim

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Oakland, 2014; Janczewska i Janczewski, 2022; Giannakourou i Taoukis, 2020)

Etap 3 – produkcja właściwa (wytwarzanie) – obejmuje bieżące monitorowanie kluczowych parametrów procesowych oraz prowadzenie analiz chemicznych, mikrobiologicznych i sensorycznych, które stanowią podstawę działań korygujących i zapobiegawczych (Giannakourou i Taoukis, 2020). Etap 4 – dystrybucja i użytkowanie produktu – koncentruje się na kontroli warunków przechowywania i transportu oraz na analizie informacji zwrotnych od klientów, co umożliwia identyfikację nowych obszarów wymagających doskonalenia (Goetsch i Davis, 2014).

Ostatnim, ale nie mniej ważnym elementem systemu kontroli jakości jest niezwłoczna reakcja na niezgodności oraz konsekwentne doskonalenie procesów. Kluczowe znaczenie ma tu przeprowadzanie analiz przyczyn źródłowych (ang. *root cause analysis*) oraz wdrażanie skutecznych działań zapobiegawczych i korygujących (Oakland, 2014).

Odpowiednio zaprojektowana i wdrożona kontrola jakości w przemyśle mleczarskim umożliwia nie tylko redukcję ryzyka, lecz także stymuluje innowacyjność – m.in. poprzez wdrażanie metod cyfrowego monitoringu, szybkich testów identyfikacji mikroflory czy zautomatyzowanych urządzeń do pobierania próbek i oceny parametrów surowca oraz wyrobu gotowego. W kontekście dalszych rozważań szczególnego znaczenia nabiera analiza korzyści i barier związanych z wdrażaniem systemów kontroli jakości – zarówno na poziomie operacyjnym, jak i strategicznym. Zagadnienia te zostaną omówione w kolejnym podrozdziale (2.2), w którym podjęta zostanie próba identyfikacji kluczowych czynników sprzyjających skutecznemu zarządzaniu jakością, a także barier ograniczających pełne wykorzystanie potencjału tych systemów w przedsiębiorstwach mleczarskich. Wraz z postępującą cyfryzacją i automatyzacją procesów rośnie znaczenie szybkich, obiektywnych narzędzi diagnostycznych, które mogą wspierać bieżącą ocenę jakości oraz wczesne wykrywanie niezgodności procesowych.

W rozdziale 2.3 przedstawione zostaną natomiast szczegółowo metody oceny jakości – zarówno tradycyjne, jak i innowacyjne – wspierające realizację opisanych etapów oraz

umożliwiające praktyczne wdrażanie założeń systemowego zarządzania jakością w produkcji serów dojrzewających

2.2. Korzyści i bariery zarządzania jakością produktów mleczarskich oraz funkcjonowania systemów jakości

Zarządzanie jakością produktów mleczarskich odgrywa kluczową rolę nie tylko w zapewnianiu bezpieczeństwa produktu, lecz także w budowaniu zaufania konsumentów i przewagi konkurencyjnej. We współczesnym ujęciu obejmuje ono zarówno kształtowanie polityki i celów jakościowych, jak i projektowanie oraz nadzorowanie systemów kontroli jakości w całym łańcuchu wartości. Nowoczesne podejście do jakości nie ogranicza się do spełniania obowiązków kontrolnych – stanowi kompleksową koncepcję zarządzającą, obejmującą planowanie, monitorowanie, analizowanie i doskonalenie procesów wytwarzania (Goetsch i Davis, 2014, Luning i Marcelis, 2025). Jego celem jest dostarczanie produktów zgodnych z oczekiwaniami klientów, co przekłada się na stabilność finansową przedsiębiorstwa oraz pozytywny wizerunek marki (Ruales Guzmán i Castellanos Domíngue, 2023).

Wdrożenie kompleksowego systemu zarządzania jakością może przynieść przedsiębiorstwu wiele wymiernych korzyści (Bannikova i in., 2019). Do najczęściej wymienianych należą: poprawa prestiżu i rozpoznawalności firmy, wzrost zaangażowania pracowników na różnych szczeblach organizacyjnych, standaryzacja procesów produkcyjnych, a także zmniejszenie liczby reklamacji i strat surowcowych (Krishnan i Devarajan, 2025).

Przedsiębiorstwa, które wdrażają zintegrowane systemy, takie jak obligatoryjne z punktu widzenia prawa żywnościowego wymagania GMP, GHP i system HACCP oraz dobrowolne systemy zarządzania bezpieczeństwem i jakością żywności, m.in. ISO 9001, ISO 22000, FSSC 22000, IFS Food, BRCGS Food Safety czy SQF, uznawane w ramach inicjatywy GFSI, zyskują również większą przejrzystość struktur organizacyjnych, lepszą komunikację między działami oraz skuteczniejsze zarządzanie zasobami (Ruales Guzmán, i Castellanos Domínguez, 2023). Systemy te nie tylko usprawniają codzienną kontrolę jakości, lecz także sprzyjają rozwojowi kultury jakości oraz zwiększają elastyczność organizacyjną w reagowaniu na zmienne wymagania rynku i regulacji prawnych (Patil i in., 2023). W praktyce oznacza to szybsze wdrażanie innowacji produktowych oraz zwiększenie możliwości eksportowych dzięki spełnianiu standardów międzynarodowych, takich jak Codex Alimentarius, standardy BRC czy wytyczne GFSI (Dora i in., 2013). Warto podkreślić, że systemy jakości i systemy kontroli jakości stanowią narzędzie wspierające szerszy proces

zarządzania jakością, rozumianego jako długofalowe kształtowanie kultury organizacyjnej, sposobu podejmowania decyzji oraz alokacji zasobów – i nie są z nim tożsame.

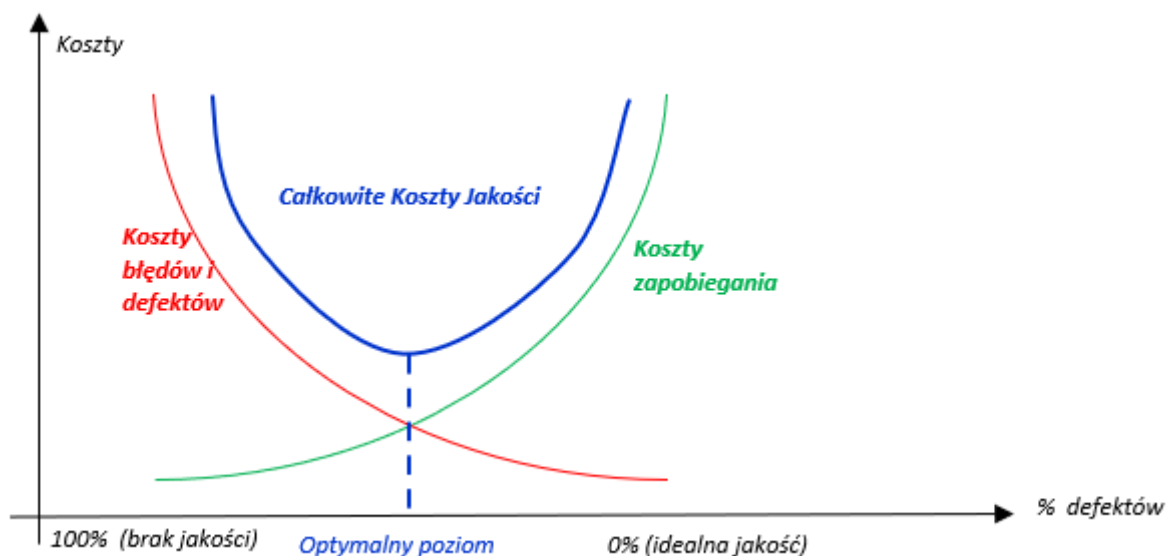
Djekic i wsp. (2024) wykazali, że wdrożenie tych systemów w mleczarniach przyczyniło się do redukcji kosztów związanych z reklamacjami o 25–30%. Równocześnie integracja analiz instrumentalnych i sensorycznych znacząco podnosiła skuteczność wykrywania niezgodności w produkcie gotowym. W zakładach, które wykorzystują zautomatyzowane metody oceny parametrów fizykochemicznych, obserwuje się również wzrost wskaźnika FTR (ang. *First Time Right*) powyżej 95% oraz ograniczenie liczby nieplanowanych przestojów (Srivastava, Sharma i Sahu, 2025).

Mimo licznych korzyści, wdrożenie i utrzymanie skutecznego systemu jakości, obejmującego zintegrowane procedury kontroli jakości, napotyka na wiele barier (Ruales Guzmán i Castellanos Domíngue 2023). Do najważniejszych należą wysokie koszty inwestycyjne związane z zakupem nowoczesnej aparatury (np. do analiz mikrobiologicznych, spektroskopii dielektrycznej czy rezonansu magnetycznego), konieczność intensywnych szkoleń personelu oraz utrzymanie procedur zgodnych z międzynarodowymi standardami (Montgomery, 2010). Dodatkowym wyzwaniem jest integracja systemów zarządzania jakością z istniejącą strukturą operacyjną, co często wymaga reorganizacji procesów, zmiany kultury pracy oraz wdrożenia cyfrowych narzędzi wspierających analizę danych (Pyzdek i Keller, 2003). Istotną barierą pozostają także ograniczenia organizacyjne i kompetencyjne – niedostateczne przygotowanie kadry, niska świadomość jakościowa wśród pracowników czy opór wobec zmian i cyfryzacji procesów kontrolnych. Ich przezwyciężenie wymaga budowania kultury jakości, inwestowania w rozwój kompetencji oraz wdrażania zautomatyzowanych narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji – np. systemów predykcyjnych bazujących na danych z nowoczesnych metod oceny jakości.

Zarządzanie jakością oznacza konieczność równoważenia trzech kluczowych czynników: jakości, kosztów i czasu (Oakland, 2012). Tradycyjnie przyjmowano, że podnoszenie jakości wymaga wyższych nakładów i wydłuża czas realizacji, jednak wdrażanie koncepcji Lean Management i Six Sigma pozwala ograniczać marnotrawstwo i zmienność procesów, co sprzyja jednoczesnej poprawie jakości i efektywności kosztowej (Montgomery, 2010; Pyzdek i Keller, 2003).

Pomocna okazuje się w tym analiza kosztów jakości, która dzieli całkowite nakłady na koszty zgodności (działania zapobiegawcze i kontrolne) oraz koszty niezgodności (błędy, reklamacje, straty materiałowe, awarie). Zależność między tymi kategoriami ilustruje krzywa kosztów jakości (Rysunek 6), zgodnie z którą całkowite koszty jakości osiągają minimum przy określonym poziomie jakości – przy poziomie niższym rośnie udział kosztów

niezgodności, przy poziomie wyższym nadmiernie wzrastają koszty działań zapobiegawczych i kontrolnych.



Rysunek 6. Krzywa kosztów jakości

Źródło: <https://akademijakosci.com/koszty-jakosci/> (data dostępu: 24.11.2025 r.)

W literaturze przedmiotu coraz częściej podkreśla się znaczenie analizy kosztów jakości jako narzędzia wspomagającego strategiczne decyzje zarządcze (Szczepańska, 2009). Szczególną uwagę zwraca się na rozróżnienie między kosztami dostosowania a kosztami niedostosowania – koncepcję tę jako jeden z pierwszych zaprezentował Crosby (1980). Koszty dostosowania obejmują działania ukierunkowane na zapobieganie wadom i utrzymanie jakości zgodnej z wymaganiami klientów, takie jak szkolenia, audyty, prewencyjne badania laboratoryjne czy wdrożenie innowacyjnych metod kontrolnych. Według Crosby’ego stanowią one zazwyczaj od 3 do 5% wartości sprzedaży. Z kolei koszty niedostosowania to wszelkie straty związane z produkcją wyrobów niespełniających wymagań – reklamacje, zwroty, utracone przychody oraz negatywny wpływ na reputację marki (Sansalvador, 2018).

Zainteresowanie tą tematyką wynika głównie z potrzeby ciągłego doskonalenia systemów zarządzania jakością oraz z konieczności poprawy konkurencyjności przedsiębiorstw na rynku krajowym i międzynarodowym (Ruales Guzmán i Castellanos Domíngue, 2023). Wysoki poziom kosztów jakości – szczególnie niedostosowania – osłabia pozycję rynkową przedsiębiorstwa. Dlatego też wiele firm podejmuje wysiłki w kierunku ich redukcji poprzez wykorzystanie najnowszych osiągnięć nauki i techniki, automatyzację kontroli jakości oraz bieżące monitorowanie wskaźników efektywności.

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają innowacyjne metody oceny jakości, takie jak metody oparte na pomiarach właściwości elektrycznych, które umożliwiają szybką, nieniszczącą i zautomatyzowaną analizę fizykochemicznych cech produktów (Pliquett, 2010; Banach i in., 2008; Cheng i in., 2021; Adetunji i in., 2022). Ich wdrożenie można traktować jako koszty dostosowania, które mimo początkowych nakładów inwestycyjnych w dłuższej perspektywie przyczyniają się do ograniczenia strat jakościowych i poprawy wskaźników FTR (Crosby, 1980; Szczepańska, 2009; Hamrol, 2023; Balon, Dziadkowiec i Dobrowolska, 2024; Djekic i in., 2024; Srivastava, Sharma i Sahu, 2025). W konsekwencji sprzyja to podniesieniu rentowności procesów oraz wzmocnieniu pozycji konkurencyjnej przedsiębiorstwa mleczarskiego (Ruales Guzmán i Castellanos Domínguez, 2023).

W zakładach mleczarskich coraz częściej stosuje się rachunek kosztów jakości, w którym analizowane są kluczowe wskaźniki efektywności (KPI), takie jak FTR, poziom reklamacji, straty surowcowe czy relacja kosztów kontroli do kosztów błędów (Balon, Dziadkowiec, Dobrowolska, 2024). Dane te umożliwiają podejmowanie świadomych decyzji operacyjnych, np. ograniczania kontroli rutynowej na rzecz działań prewencyjnych i cyfryzacji. W tym kontekście pomocna jest macierz relacji między wskaźnikami kosztów jakości (Tabela 5), której interpretacja pozwala ocenić aktualny stan systemu oraz zidentyfikować priorytetowe obszary do doskonalenia (Hamrol, 2023).

Tabela 5. Możliwe relacje między wskaźnikami kosztów jakości w przedsiębiorstwie.

Kosztów jakości	W1 – niski poziom	W1 – wysoki poziom
W2 – niski poziom	SYTUACJA KORZYSTNA Utrzymanie obecnych rozwiązań, poszukiwanie dalszych usprawnień	SYTUACJA NEUTRALNA Skoncentrowanie wysiłków na doskonaleniu całego systemu jakości
W2 – wysoki poziom	SYTUACJA NEUTRALNA Wymagana optymalizacja metod kontroli i zapobiegania	SYTUACJA SKRAJNIE NIEKORZYSTNA Wymagane działania naprawcze w odniesieniu do produktów, procesów i systemu kontroli

W1 - koszty jakości vs. przychody, W2 - koszty niezgodności vs. koszty jakości ogółem

Źródło: opracowanie własne na podstawie Hamrol (2023)

Interpretacja tej macierzy pozwala nie tylko zidentyfikować aktualną kondycję systemu zarządzania jakością, ale także wskazać obszary priorytetowe dla inwestycji i działań doskonalących. Szczególnie w sektorze produkcji serów dojrzewających – gdzie czas i warunki procesu mają kluczowe znaczenie – takie narzędzia analityczne mogą realnie wpływać na efektywność ekonomiczną i reputację firmy. Ponadto, jak zauważa Dziadkowiec

(2024), skuteczność systemu jakości nie powinna być oceniana wyłącznie przez pryzmat wskaźników ekonomicznych, ale również przez zdolność organizacji do zapobiegania ryzyku, uczenia się na błędach i adaptacji do zmieniających się wymagań rynkowych. W tym kontekście, coraz większą wagę przywiązuje się do tzw. „dojrzałości jakościowej” organizacji – poziomu integracji jakości w kulturze organizacyjnej, systemach zarządzania i codziennych decyzjach operacyjnych (Ruales Guzmán i Castellanos Domínguez, 2023). Rozwijanie tej dojrzałości wiąże się z koniecznością inwestycji nie tylko w technologie i systemy, lecz także w kompetencje kadry oraz mechanizmy komunikacji i współpracy między działami.

Reasumując, skuteczne zarządzanie jakością w przemyśle mleczarskim, w tym w zakładach produkujących sery dojrzewające, ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa, powtarzalności cech wyrobu oraz satysfakcji klienta (Maaz i Ahmad, 2022). Zastosowanie zintegrowanych systemów jakościowych – wspartych rzetelną analizą kosztów i wskaźników efektywności – pozwala nie tylko ograniczyć liczbę reklamacji czy strat materiałowych, ale także budować długofalową przewagę konkurencyjną. Współczesne przedsiębiorstwa coraz częściej poszukują metod oceny jakości, które pozwalają na szybkie, obiektywne i zautomatyzowane wykrywanie nieprawidłowości. Dlatego obok klasycznych metod referencyjnych rośnie znaczenie nowoczesnych narzędzi monitorowania jakości on-line i in-line, co stanowi punkt wyjścia do dalszych rozważań przedstawionych w rozdziale 2.3.

2.3. Metody i narzędzia oceny jakości wyrobów mleczarskich wspomagające proces zarządzania jakością

Nowoczesne zarządzanie jakością w branży mleczarskiej – zwłaszcza dla wymagających produktów, takich jak sery dojrzewające – opiera się na zintegrowanym podejściu do kontroli surowców, procesów technologicznych oraz cech gotowego wyrobu. Ocena jakości nie ogranicza się jedynie do spełniania wymogów norm prawnych – coraz częściej staje się narzędziem wspierającym innowacyjność, redukcję strat i wzmacnianie konkurencyjności przedsiębiorstw mleczarskich (Ruales Guzmán, i Castellanos Domínguez, 2023).

Współczesne metody badawcze umożliwiają szybkie wykrycie odchyleń od parametrów technologicznych i natychmiastowe działania korygujące – nawet w trakcie produkcji lub dojrzewania. Dzięki temu przedsiębiorstwa zapewniają nie tylko stabilność cech produktu, ale także jego powtarzalną akceptowalność sensoryczną i zgodność z oczekiwaniami rynku (Azarmipour, 2020)

W niniejszym rozdziale omówiono kluczowe metody i narzędzia oceny jakości w praktyce mleczarskiej – od klasycznych metod referencyjnych (instrumentalnych

i sensorycznych), po nowoczesne rozwiązania wykorzystujące zjawiska elektryczne. Metody te stanowią istotny element systemu zarządzania jakością, umożliwiając podejmowanie decyzji opartych na danych oraz bieżące monitorowanie zdolności procesów. Szczególną uwagę poświęcono technikom wykorzystującym właściwości elektryczne materiałów, które znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle mleczarskim jako szybkie, zautomatyzowane i nieniszczące narzędzia monitorowania jakości serów dojrzewających.

2.3.1. Metody referencyjne – instrumentalne i sensoryczne

Integralnym elementem systemu zarządzania jakością w sektorze mleczarskim są tzw. metody referencyjne, zwalidowane i standaryzowane procedury analityczne służące obiektywnej ocenie jakości surowca, produktu w toku oraz wyrobu gotowego. Metody te stanowią podstawę dokumentowania zgodności z wymaganiami prawa żywnościowego, norm branżowych i specyfikacji handlowych, a także pełnią funkcję punktu odniesienia przy wdrażaniu nowych, szybszych i bardziej zautomatyzowanych technik oceny jakości (Jeznach, 2008; Hamrol, 2023). W praktyce obejmują one m.in. normy ISO i IDF dotyczące oznaczania zawartości tłuszczu, soli, suchej masy, aktywności wody oraz wybranych wskaźników mikrobiologicznych oraz wytyczne Codex Alimentarius i standaryzowane procedury oceny sensorycznej serów (Baryłko-Pikielna, 2014), które stanowią podstawowy punkt odniesienia przy ocenie przydatności nowych metod, w tym technik opartych na pomiarach właściwości elektrycznych (Jha i in., 2011).

W praktyce wyróżnia się dwie główne grupy metod referencyjnych: metody instrumentalne oraz metody sensoryczne. Metody instrumentalne obejmują klasyczne badania fizykochemiczne, mikrobiologiczne i reologiczne, wykonywane zgodnie z normami ISO, PN, AOAC czy IDF. W przypadku serów dojrzewających szczególnie ważne są metody znormalizowane w normach ISO i IDF, takie jak oznaczanie zawartości soli (np. ISO 5943), tłuszczu (ISO 1735, ISO 23319/IDF 250), suchej masy (ISO 5534), aktywności wody (ISO 21543), wybranych parametrów mikrobiologicznych (ISO 21527, ISO 16649-2) oraz ujednoliconą oceną sensoryczną (ISO 22935-2). Normy te uzupełniają wymagania Codex Alimentarius, m.in. General Standard for Cheese (CXS 283-1978) oraz powiązane standardy dla poszczególnych grup serów. W produkcji serów dojrzewających obejmuje to przede wszystkim oznaczenie zawartości tłuszczu i białka, poziomu soli, aktywności wody i pH oraz wybrane badania mikrobiologiczne. Dodatkowo stosuje się pomiary tekstury (np. profilową analizę tekstury – TPA) i innych parametrów reologicznych, które pozwalają ilościowo opisać twardość, sprężystość czy żuźność sera oraz powiązać te cechy z przebiegiem dojrzewania. Uzupełnieniem jest instrumentalna analiza barwy w systemie CIE-LAB, umożliwiająca

obiektywny pomiar jasności (L^*) i składowych barwy (a^* , b^*), co pozwala śledzić zmiany zachodzące w strukturze i na powierzchni sera.

Zaletą metod instrumentalnych jest wysoka powtarzalność, obiektywizm wyniku oraz możliwość porównywania danych między laboratoriami (Jeznach, 2008; Barylko-Pikielna i Matuszewska, 2014). Z perspektywy zarządzania jakością umożliwiają one budowę stabilnych kart kontrolnych, ustalanie limitów specyfikacji i ocenę zgodności z normami (Hamrol, 2023; Szczepańska, 2009). Ich ograniczeniem są jednak relatywnie wysokie koszty aparatury i odczynników, konieczność posiadania wykwalifikowanego personelu, czasochłonność oraz najczęściej destrukcyjny charakter oznaczeń, co utrudnia zastosowanie tych metod do ciągłego monitorowania dużych partii produkcyjnych (Jha i in., 2011; Visciano i in., 2020).

Drugą kluczową grupę metod referencyjnych stanowią metody sensoryczne, oparte na ocenie wzrokowej, węchowej, smakowej i dotykowej produktów przez wyszkolone panele ocenijące (Barylko-Pikielna, 2014). W odniesieniu do serów dojrzewających szczególne znaczenie ma ocena profilu aromatyczno-smakowego, związanego z intensywnością i charakterem przemian proteolitycznych, lipolitycznych i glikolitycznych, a także analiza tekstury i wyglądu zewnętrznego (barwa, oczkowanie, struktura skórki) (McSweeney, 2004; Bielecka i Cichosz, 2020).

Tabela 6. Wybrane analityczne metody sensoryczne stosowane w ocenie jakości serów dojrzewających.

Grupa Metod	Wybrane metody
Metody dyskryminacyjne (progowe i wykrywania różnic)	Metody określania wartości progowych: metoda limitów, metoda „schodkowa”, metoda stałego bodźca, metoda 3-AFC. Metody wykrywania różnic (różnicowe): metoda trójkątowa, metoda duo-trio, metoda parzysta, metoda „dwóch z pięciu”, metoda szeregowania (kolejności).
Metody ilościowego określania ocenianej cechy jakościowej - skalowanie	Metody skalowania statyczne: skale kategorii, skale liczbowe i interwałowe, skale liniowe, skale typu „just right”. Metody skalowania dynamiczne: metoda Time–Intensity .
Metody opisowe określania jakościowo-ilościowego wielu cech (profilowanie)	Metody analizy opisowej statyczne: profilowanie drogą konsensusu, Ilościowa Analiza Opisowa, profilowanie różnicowe (odchylenia od wzorca), metody typu Spectrum. Metody analizy opisowej dynamiczne: profilowanie dynamiczne.
Inne metody analityczne i hybrydowe	Metody wskaźnikowe (np. wskaźnik słoności, kwaśności), metody hybrydowe: Flash Profile, metoda LMS, metoda LAM, CATA (<i>Check-All-That-Apply</i>), testy hedoniczne (konsumenckie skale lub testy akceptacji).

Źródło: Barylko-Pikielna (2014)

W analizie sensorycznej serów dojrzewających stosuje się przede wszystkim trzy grupy metod: dyskryminacyjne, skalowania oraz opisowe (Barylko-Pikielna, 2014). Metody dyskryminacyjne (np. test trójkątowy, duo-trio) służą wykrywaniu różnic między próbkami. Metody skalowania, wykorzystujące skale kategorii, liniowe czy typu „just right”, umożliwiają ilościowe określanie intensywności wybranych cech. Z kolei metody opisowe, takie jak QDA czy profilowanie typu Spectrum, pozwalają na zbudowanie szczegółowego profilu sensorycznego sera. Wybrane metody zestawiono w (Tabeli 6).

Metody referencyjne – instrumentalne i sensoryczne – odgrywają podwójną rolę. Z jednej strony zapewniają formalną wiarygodność wyników oceny jakości (np. w kontaktach z organami nadzoru, odbiorcami sieciowymi czy jednostkami certyfikującymi), z drugiej stanowią podstawę walidacji i kalibracji metod alternatywnych, takich jak techniki spektroskopowe, obrazowanie czy metody oparte na pomiarach właściwości elektrycznych (Kilcast, 2013; Zhi i in., 2016).. Wyniki uzyskane metodami referencyjnymi są punktem odniesienia przy ocenie przydatności praktycznej nowych narzędzi pomiarowych oraz przy szacowaniu ich czułości i zdolności do wykrywania zmian jakościowych w czasie dojrzewania sera marki (Ruales Guzmán i Castellanos Domíngue, 2023).

Jednocześnie w literaturze i praktyce przemysłu mleczarskiego podkreśla się ograniczenia metod referencyjnych w kontekście rosnących wymagań rynkowych: wysoką pracochłonność, relatywnie długi czas uzyskania wyników oraz ograniczone możliwości zastosowania in-line (Croissant, 2011; Burmistrov i in., 2021).. Z perspektywy zarządzania jakością rodzi to potrzebę wykorzystywania nowoczesnych, nieniszczących technik oceny, które mogłyby uzupełniać podejście klasyczne poprzez dostarczanie szybkich, powtarzalnych informacji o stanie produktu w trakcie procesu.

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają metody oparte na pomiarach właściwości elektrycznych produktów mleczarskich, które – przy odpowiednim powiązaniu z wynikami metod referencyjnych – mogą stanowić narzędzie diagnostyczno-decyzyjne wspomagania procesu zarządzania jakością serów dojrzewających. Zagadnienia te omówiono w kolejnym podrozdziale (2.3.2).

2.3.2. Innowacyjne metody elektryczne oceny jakości wyrobów mleczarskich

Rozwój innowacyjnych metod elektrycznych stanowi odpowiedź na rosnące wyzwania współczesnego przemysłu mleczarskiego, który musi zapewnić wysoką jakość, autentyczność i bezpieczeństwo wyrobów przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów i spełnianiu oczekiwań konsumentów wobec przejrzystości procesów produkcyjnych (Zhang, 2024; Goetsch i Davis,

2014). W większości przypadków klasyczne techniki analizy jakości żywności są czasochłonne, kosztowne, wymagające udziału wysoko wykwalifikowanego personelu i – co szczególnie istotne – destrukcyjne, co oznacza, że analizowany produkt nie może zostać wykorzystany po badaniu.

W tym kontekście rosnące znaczenie zyskują metody i narzędzia pomiarowe wykorzystujące zjawiska elektryczne, które umożliwiają szybką, bezkontaktową i nieniszczącą ocenę fizykochemicznych właściwości żywności (Żywica, 2010; Grossi, 2017). Ich podstawą jest analiza reakcji badanego materiału na przyłożone pole elektryczne – dzięki czemu możliwy jest pomiar parametrów przewodnościowych i dielektrycznych, stanowiących pośrednie wskaźniki jakości surowca lub produktu gotowego. Do najczęściej analizowanych wielkości elektrycznych należą:

- ✓ Impedancja (Z) – całkowity opór układu wobec prądu zmiennego, obejmujący zarówno opór czynny, jak i bierny,
- ✓ Konduktancja (G) i przewodność właściwa (σ) – określające zdolność materiału do przewodzenia prądu elektrycznego,
- ✓ Reaktancja (X_c) – część bierna impedancji, związana z opóźnieniem przepływu prądu,
- ✓ Pojemność elektryczna (C) oraz stała dielektryczna (ϵ'), stratność dielektryczna (ϵ'') i tangens kąta stratności ($\tan\delta$) – opisujące zdolność materiału do magazynowania i rozpraszania energii elektrycznej w polu zmiennym (Wang, 2023; Zhao, 2021).

Pomimo dostępności precyzyjnego sprzętu na rynku, efektywność pomiarów elektrycznych w zastosowaniach przemysłowych zależy w dużej mierze od charakterystyki badanego materiału oraz od właściwego dostosowania warunków pomiarowych do specyfiki produktu. Zakres częstotliwości sygnału, geometria elektrod, warunki temperaturowe czy wilgotnościowe – wszystkie te czynniki mogą znacząco wpływać na wyniki i ich interpretację. Dlatego też dla każdego zastosowania konieczne jest przeprowadzenie optymalizacji metody pomiarowej, uwzględniającej nie tylko parametry fizykochemiczne produktu, ale także wymagania praktyczne związane z warunkami przemysłowymi (Tambare, i in., 2021)

W celu uzyskania danych bezpośrednio skorelowanych z właściwościami jakościowymi lub z etapami procesu technologicznego, stosuje się zaawansowane metody przetwarzania sygnałów i analiz statystycznych – w tym modelowanie nieliniowe, algorytmy uczenia maszynowego czy metody redukcji wymiarów. Dzięki temu pomiary impedancji elektrycznej zyskują wysoką wartość diagnostyczną i stają się praktycznym narzędziem diagnostyczno-decyzyjnym wspierającym podejmowanie decyzji operacyjnych w ramach systemów zarządzania jakością.

➤ *Zjawiska elektryczne w produktach mleczarskich*

Właściwości elektryczne produktów mleczarskich wynikają z ich unikalnej, wielofazowej struktury, w której współistnieją faza wodna, tłuszczowa oraz koloidalna – tworząc złożoną matrycę fizykochemiczną. Z punktu widzenia fizyki, mleko i jego przetwory stanowią układy koloidalne, w których obserwuje się zjawiska takie jak transport ładunku, polaryzacja dielektryczna oraz interakcje między rozproszonymi cząstkami a otaczającym je medium wodnym (An i in., 2025). Zjawiska te można opisać za pomocą podstawowych zależności fizycznych, m.in. prawa Ohma:

$$R = \frac{U}{I}, \quad \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{RA}$$

gdzie: R – oporność, σ – przewodność właściwa, l – długość między elektrodami, A – powierzchnia elektrod.

Jeśli materiał wykazuje zdolność do magazynowania energii elektrycznej, wówczas posiada właściwości pojemnościowe (C), a jego impedancja (Z) przybiera postać zespoloną:

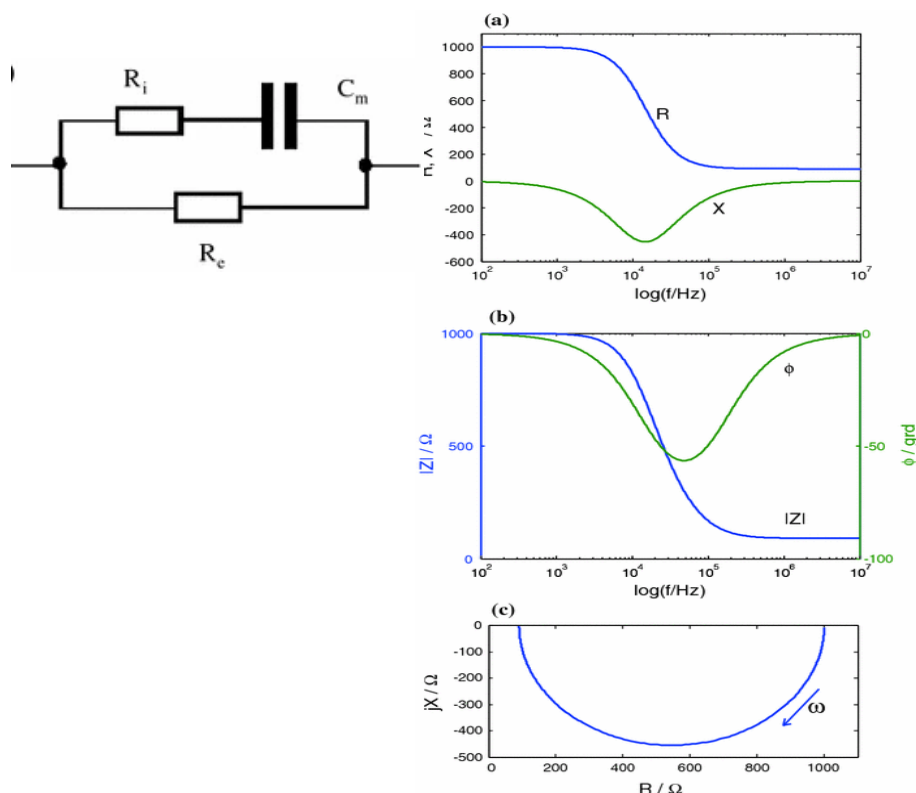
$$X_c = \frac{1}{\omega C}, \quad \omega = 2\pi f$$

$$Z(j\omega) = R + jX = R + \frac{1}{j\omega C}, \quad Z = Z' + jZ''$$

gdzie: R – rezystancja (część rzeczywista), X_c - reaktancja (część urojona), Z – impedancja zespolona Z' – rzeczywista składowa impedancji, Z'' – urojona składowa impedancji, f – częstotliwość sygnału, C – pojemność elektryczna

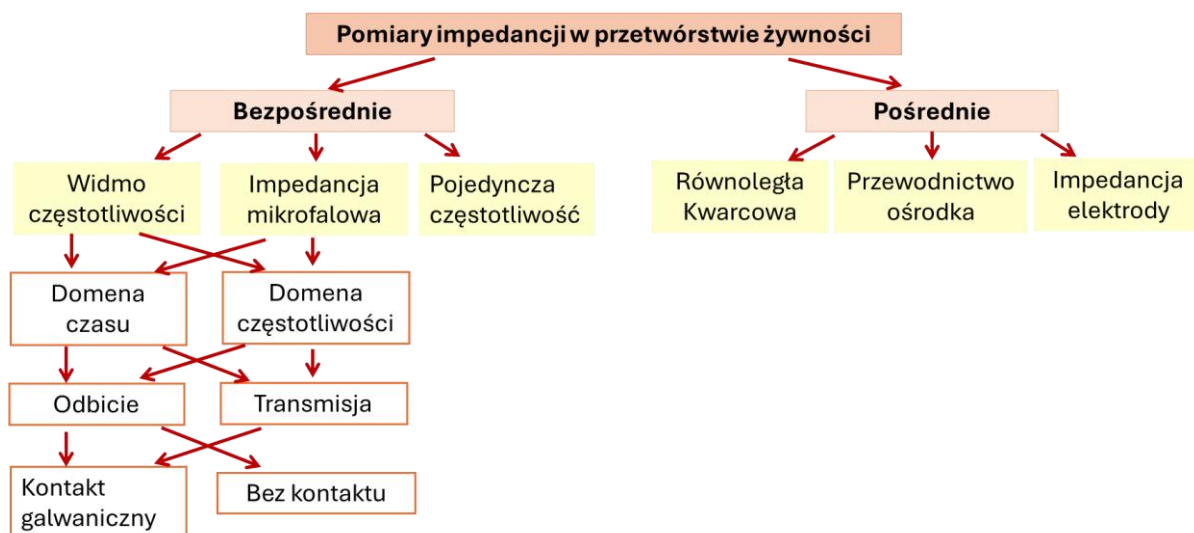
Rysunek 7. przedstawia zachowanie się impedancji w modelu układu złożonego z rezystorem ($R_i = 100 \, \Omega$) i kondensatorem ($C_m = 10 \, \text{nF}$), połączonych szeregowo i równolegle z dodatkowym rezystorem ($R_c = 1 \, \text{k}\Omega$).

W zależności od struktury wewnętrznej, żywność można podzielić na materiały strukturalne i niestructuralne. Do grupy pierwszej zalicza się produkty zawierające błony komórkowe o właściwościach dielektrycznych (np. warzywa, mięso, ryby, żywe kultury bakterii) (Żywica, 2010). Produkty niestructuralne, takie jak soki, mleko UHT, oleje czy przetwory homogenizowane, nie zawierają uporządkowanej, ciągłej struktury błon komórkowych, co wpływa na inny przebieg zmian właściwości przewodnościowych (Banach i in. 2008).



Rysunek 7. Zmiany (a) impedancji rzeczywistej i urojonej względem częstotliwości, (b) modułu i kąta fazowego względem częstotliwości oraz (c) impedancji urojonej względem części rzeczywistej. Źródło: Pliquett (2010)

W przetwórstwie mleczarskim wykorzystuje się zarówno bezpośrednie, jak i pośrednie metody pomiaru impedancji. Metody bezpośrednie polegają na rejestrowaniu odpowiedzi elektrycznej materiału na przyłożone pole, co umożliwia określenie jego właściwości dielektrycznych i przewodnościowych (Pliquett 2010, Durante i in. 2015). W pomiarach pośrednich natomiast analizowane są zmiany parametrów ośrodka będące skutkiem procesów biologicznych, mogących wpływać np. na przewodność jonową próbki. Dobór konkretnej konfiguracji pomiarowej zależy od charakteru badanego materiału oraz celu analizy. (Rysunek 8) przedstawia schematyczny przegląd metod pomiaru impedancji stosowanych w przetwórstwie żywności, z uwzględnieniem różnych zakresów częstotliwości oraz typów interpretacji danych.



Rysunek 8. Metody pomiaru impedancji stosowane w przetwórstwie żywności
Źródło: Opracowanie własne na podstawie Pliquett (2010)

W ostatnich latach coraz większą popularność zyskują układy impedancyjne w konfiguracji czteropunktowej, które pozwalają ograniczyć wpływ zjawisk elektrochemicznych zachodzących na granicy elektroda–próbka. Czujniki te projektowane są w różnych układach geometrycznych – liniowym, spiralnym lub współśrodkowym – co umożliwia ich zastosowanie w pomiarach impedancyjnych dla różnych postaci produktów mleczarskich, zarówno ciekłych, jak i o strukturze żelowej (Vema, 2023).

➤ ***Właściwości elektryczne składników produktów mleczarskich a interpretacja pomiarów***

Dla materiałów niejednorodnych - jak sery - wartości przewodności elektrycznej (σ) mogą się znacząco różnić w zależności od ich mikrostruktury, zawartości składników mineralnych, tłuszczu i białek. Mleko i jego przetwory wykazują właściwości typowe dla układów elektrolitycznych, w których głównymi nośnikami ładunku są jony sodu, potasu, chlorkowe oraz jony wapnia i magnezu obecne w fazie wodnej (Mabrook i Petty, 2003).

Faza wodna odpowiada za przewodnictwo jonowe produktu. Jej udział zależy od zawartości wody, rodzaju soli oraz stopnia rozpuszczenia białek. Przewodność wzrasta wraz z rosnącym stężeniem elektrolitów (np. Na^+ , Cl^-) oraz z temperaturą, co wynika ze zwiększonej ruchliwości jonów. W temperaturze 20°C przewodność właściwa mleka wynosi zazwyczaj od 4,5 do 6,0 mS/cm (Mabrook i Petty, 2003). Dodatki wody, typowe dla zafałszowań, prowadzą do obniżenia stężenia soli i laktozy, a tym samym – do zmniejszenia przewodności.

Faza tłuszczowa działa jak dielektryk - kuleczki tłuszczowe o średnicy 0,1–10 μm nie przewodzą prądu, lecz zwiększają pojemność dielektryczną układu. Większa zawartość

tłuszczu skutkuje spadkiem przewodnictwa oraz wzrostem reaktancji pojemnościowej, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości sygnału. Obecność fazy tłuszczowej ogranicza efektywną przestrzeń przewodzenia dla jonów, co w modelach elektrycznych odwzorowuje się przy pomocy dodatkowych komponentów – takich jak stałe elementy fazowe (CPE) czy elementy typu Warburga, służących do lepszego oddania zjawisk dyfuzyjnych i polaryzacyjnych. **Białka mleka (kazeina i serwatkowe)** tworzą koloidalną strukturę miceli, których właściwości elektrokinetyczne (np. potencjał zeta) wpływają na impedancję materiału (Banach, 2024). W procesie dojrzewania sera dochodzi do degradacji miceli kazeinowych w wyniku proteolizy, co prowadzi do uwolnienia wolnych aminokwasów i peptydów. Zmienia to skład jonowy i właściwości koloidalne układu, co może prowadzić do istotnych zmian (często wzrostu) przewodności oraz modyfikacji charakterystyk dielektrycznych. Równocześnie struktury żelowe powstające w wyniku sieciowania białek wpływają na oporność i właściwości dielektryczne materiału. **Laktoza**, jako cukier niezdisocjowany w roztworze wodnym, wywiera niewielki bezpośredni wpływ na przewodnictwo. Jednak jej fermentacja przez mikroflorę w trakcie dojrzewania sera pośrednio wpływa na parametry elektryczne – poprzez obniżenie pH oraz generację kwasów organicznych, które z kolei modyfikują stężenie jonów i stan przewodnictwa.

Podsumowując, właściwości przewodnościowe (impedancja, przewodność) oraz dielektryczne (pojemność elektryczna) produktów mleczarskich są ściśle uzależnione od ich składu chemicznego i mikrostruktury. Zależności te zostały potwierdzone eksperymentalnie i przedstawione w (Tabeli 7).

Tabela 7. Zależności między składem mleka a jego parametrami elektrycznymi

Składnik mleka	Zakres zawartości (%)	f [kHz]	Zmiany impedancji	Zmiany Przewodności (mS/cm)	Zmiany pojemności	Uwagi
Tłuszcz	0-4,5	10-500	Wzrost o 20-40%	6,0 → 4,0	Zmniejszenie o 10-25%	Właściwości dielektryczne kuleczek tłuszczowych
Białko ogółem	2,8-4,0	1-100	Spadek	4,2-5,8	Wzrost	Zwiększone zdolności przewodzenia i polaryzacji
Laktoza	4,2-5,2	1-10	Nieistotne	5,5-4,8	Minimalny wpływ	Niska przewodność – związek nieelektrolityczny
Sole mineralne	0,6-0,9	1-1000	Znaczny spadek	4,8-6,5	Nieznaczny wzrost	Główne źródło jonów – wpływ na przewodnictwo

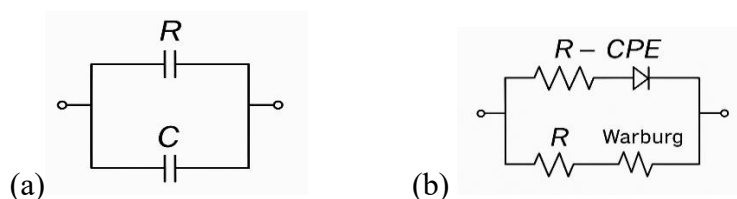
Źródła: Banach i in., (2008); Islam, (2022).

➤ *Techniki i modele elektryczne w ocenie jakości – przegląd i kierunki rozwoju*

Techniki elektryczne, oprócz zastosowania w badaniach mleka, znalazły zastosowanie w coraz szerszej gamie wyrobów mleczarskich. Złożona, dynamicznie zmieniająca się matryca biologiczna (białka, tłuszcz, woda, sole) pozwala na identyfikację istotnych zmian jakościowych przy użyciu odpowiednio skalibrowanych układów pomiarowych (Park, 2018). Szczególne znaczenie mają tu pomiary przewodności oraz impedancji (w tym spektroskopia impedancyjna – EIS), które dostarczają informacji zarówno o składzie chemicznym, jak i o zmianach mikrostruktury produktów w trakcie dojrzewania lub w wyniku zabiegów technologicznych (Huang, 2022; Caicedo-Eraso i in., 2020).

W celu interpretacji wyników pomiarów wykorzystuje się tzw. modele elektryczne, które opisują produkt jako układ elementów rezystancyjnych i pojemnościowych. Najprostsze modele typu R–C, łączące oporność (R) i pojemność (C) w układach szeregowych lub równoległych, pozwalają odzwierciedlić podstawową strukturę produktów zawierających przewodzącą fazę wodną oraz dielektryczne komponenty, takie jak tłuszcz i kompleksy białkowe. W takim ujęciu rezystancja odzwierciedla przewodnictwo jonowe fazy wodnej (np. roztworu Na^+ , K^+ , Cl^-), natomiast pojemność wiąże się głównie z granicami faz – powierzchnią kuleczek tłuszczowych i miceli kazeinowych.

W przypadku bardziej złożonych produktów, w tym serów dojrzewających, proste modele R–C bywają niewystarczające ze względu na dużą niejednorodność struktury i występowanie zjawisk dyspersyjnych. W takich sytuacjach stosuje się tzw. elementy zastępcze o charakterze pośrednim między czystą rezystancją a pojemnością (np. element stałej fazy – CPE), które lepiej opisują rozciągnięte w czasie procesy polaryzacji w nieregularnej, porowatej matrycy białkowo-tłuszczowej (Grossi i Riccò, 2017). Schematyczne przykłady modeli typu R–C oraz R–CPE przedstawiono na (Rysunek 9).



Rysunek 9. Modele właściwości elektrycznych produktów mleczarskich: (a) RC i (b) R-CPE

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (McSweeney, 2004; Grossi i Riccò, 2017).

Bardziej zaawansowane podejścia, wykorzystywane głównie w badaniach naukowych, obejmują modele opisujące zjawiska dyfuzji jonów w porowatym lub żelowym materiale oraz wieloskładnikową dyspersję odpowiedzi dielektrycznej. Są one stosowane m.in. do analizy fermentowanych produktów mleczarskich i serów dojrzewających, w których lokalne zmiany

stężenia jonów oraz modyfikacje struktury żelowej odgrywają istotną rolę. Uzyskane charakterystyki impedancji poddaje się następnie analizie statystycznej, z wykorzystaniem metod wielowymiarowych lub algorytmów uczenia maszynowego, co umożliwia klasyfikację próbek i identyfikację odchyłeń jakościowych z wysoką dokładnością (Vema, 2023).

Dobór konkretnego modelu oraz stopnia jego złożoności zależy od celu badania. Uproszczone modele R–C są przydatne przy szybkiej ocenie zawartości tłuszczu czy wykrywaniu rozcieńczeń mleka, natomiast układy uwzględniające elementy dyspersyjne i dyfuzyjne znajdują zastosowanie w monitorowaniu procesów dojrzewania serów oraz zmian mikrostruktury. Z perspektywy praktyki przemysłowej szczególnie istotna jest możliwość odniesienia parametrów elektrycznych do mierzalnych cech technologicznych i użytkowych produktu t.j. skład chemiczny, stopień dojrzałości czy akceptowalność sensoryczna. To właśnie takie zależności stanowią podstawę konstruowania narzędzi oceny jakości wykorzystujących pomiary elektryczne.

Zaobserwowane w dotychczasowych badaniach możliwości wykorzystania metod elektrycznych i różnego typu czujników do oceny jakości mleka oraz produktów mleczarskich zestawiono w (Tabeli 8). Stanowią one ważny punkt odniesienia dla dalszych prac, koncentrujących się na praktycznym zastosowaniu pomiarów właściwości elektrycznych w ocenie jakości serów dojrzewających.

Postęp w technologii czujników oraz elektronice pomiarowej zwiększa możliwości praktycznego zastosowania metod elektrycznych w przemyśle mleczarskim. Pomiary impedancji i przewodności mogą być realizowane zarówno in-line (w czasie rzeczywistym), jak i at-line (blisko linii produkcyjnej), co pozwala na szybką ocenę kluczowych parametrów surowców i produktów bez konieczności pobierania próbek do laboratorium (Scandurra i in., 2022; Caicedo-Eraso i in., 2020; Jingkai i in., 2020; Xie i in., 2024; Ahmed i in. 2007, Ghasemi-Varnamkhasti, 2017, La Gioia i in., 2018).

W systemach in-line stosuje się elektrody zintegrowane z rurociągami procesowymi, umożliwiające ciągłe monitorowanie zawartości suchej masy, homogenizacji czy wykrywania potencjalnych zafałszowań surowca. Czujniki te są często włączone w zakładowe systemy automatyki (np. SCADA, MES), co pozwala na natychmiastowe reagowanie technologiczne. W pomiarach at-line wykorzystuje się kompaktowe analizatory impedancyjne i spektroskopy EIS, które umożliwiają szybką ocenę stopnia fermentacji lub dojrzałości sera, wspierając bieżące decyzje operacyjne (Scandurra i in., 2022; Ghodinde i in., 2024).

Skuteczność pomiarów zależy od odpowiedniego doboru elektrod oraz konfiguracji układu pomiarowego. Znaczenie mają m.in.: geometria czujnika, stabilność interfejsu elektroda–próbka oraz materiał elektrod zapewniający obojętność chemiczną i powtarzalność

pomiarów. Ważne jest także ograniczenie wpływu zjawisk powierzchniowych, takich jak polaryzacja elektrod, co często osiąga się poprzez stosowanie elektrod wielopunktowych. Rozwiązania te pozwalają adaptować metody elektryczne do produktów o różnej konsystencji — od mleka po żelowe struktury serów dojrzewających (Żywica i in., 2012; Banach i in., 2012; Ahmed i in., 2007; La Gioia i in., 2018).

Tabela 8. Wykorzystanie metod elektrycznych w kontroli jakości produktów mleczarskich

Produkt	Cel/wykorzystanie	Parametr(y)/metoda elektryczna	Zakres częstotliwości	Model elektryczny/ Czujnik	Źródło literaturowe
Mleko UHT (tłuste/odtł.)	Klasyfikacja typu Ocena przechowywania	Admitancja, konduktancja	20–100 kHz	R–C z CPE (interfejs elektroda–mleko)	Scandurra, 2022
Mleko surowe	Ocena zafałszowania mleka wodą	Impedancja (Z), admitancja (Y), pojemności C_p i C_s	100 Hz–1 MHz	RRC z kondensatorem płytkowym	Banach i in. (2012)
Mleko surowe i homogenizowane	Ocena wpływu homogenizacji na strukturę	Impedancja, przewodność	~100 Hz–1 MHz	RRC	Banach et al. 2008
Sery dojrzewające	Monitorowanie procesu dojrzewania (lab.)	Impedancja	1 kHz–1 MHz	R–C + CPE (interfejs)	Huang, 2020
Sery z olejem palmowym	Wykrywanie fałszowania dod. tłuszczu	Impedancja, Kąt fazowy	100 Hz–100 kHz	R–C–CPE	Huang, 2020
Jogurty / mleko fermentowane	Ocena zmian mikrostruktury przez dojrzewanie	Impedancja widmowa	1 kHz–1 MHz	R–C+CPE	Zhao, 2021
Mleko	Wykrywanie mleka zafałszowanego	Impedancja	40 kHz–200 kHz	Impedancja elektrochemiczna	Durante, 2015
Mleko	Wykrywanie mleka syntetycznego	Przewodnictwo elektryczne	20 Hz–1 MHz	Pomiar przewodnictwa AC, elektrody platynowe	Sadat, 2006
Produkty mleczne	Monitorowanie jakości skrzepów mlecznych	Elektroniczny nos	-	-	Tazi, 2018
Mleko	Wykrywanie zafałszowań sodą, wodą, cukrem, mocznikiem i żelatyną	Spektroskopia dielektryczna	0–150 MHz	Kondensator płytkowy (PPC) i rezonator cylindryczny (CS)	Ghasemi-Varnamkhasti, 2017
Mleko	Monitorowanie koagulacji enzymatycznej;	Spektroskopia dielektryczna	200–2400 MHz	Otwarta sonda koaksjalna (OECP)	Dobozi, 2023
Mleko o różnej zawartości tłuszczu	Ocena wpływu czasu przechowywania; częstotliwość;	Spektroskopia dielektryczna	200 MHz – 20 GHz		Szerement, 2018
Mleko	Identyfikacja etapów koagulacji kwasowej;	Stała dielektryczna ϵ' , współczynnik strat dielektrycznych ϵ''	100 MHz – 20 GHz		Harindran, 2020
Mleko w proszku -odtłuszczone i pełne	Ocena właściwości dielektrycznych mleka	Metoda PPC i OECP	5 MHz – 3 GHz (OECP) 5–30 MHz (PPC)	PPC i OECP	Lau, 2020
Masło słone i niesłone	Badanie wpływu temperatury	Metoda OECP	500 – 3000 MHz	OECP	Ahmed, 2007
Jogurt	Monitorowanie procesu fermentacji jogurtu;	stała dielektrycznej ϵ' , współczynnik strat ϵ''	10–3000 MHz	OECP + analizator sieci wektowej (VNA)	Singh, 2025
Ser	Ocena dojrzewania	ϵ'	200–2400 MHz	OECP	Dobozi, 2021
Ser	Proces solenia	ϵ' , ϵ'' i przewodnictwo jonowe (σ)	500 MHz – 20 GHz		Velazquez-Varela, 2018

Źródło: Opracowanie własne na podstawie źródeł literaturowych (ostatnia kolumna)

Zaletą metod elektrycznych jest ich nieniszczący charakter, możliwość automatyzacji oraz szybki czas analizy, co czyni je obiecującym narzędziem wspierającym zarządzanie jakością. Wciąż jednak brakuje badań kompleksowo opisujących zmiany parametrów elektrycznych serów podpuszczkowych dojrzewających w funkcji czasu oraz ich praktyczne powiązanie z cechami technologicznymi i jakościowymi produktu.

Zidentyfikowana luka badawcza dotyczy niewystarczającego rozpoznania relacji między właściwościami elektrycznymi serów a przebiegiem ich dojrzewania, co ogranicza możliwości projektowania szybkich, obiektywnych i nieniszczących narzędzi wspierających decyzje w zarządzaniu jakością.

3. Cele i hipotezy badawcze

Celem głównym badań było określenie możliwości zastosowania innowacyjnego narzędzia oceny jakości produktów serowarskich – serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych – wykorzystującego parametry elektryczne do monitorowania procesu dojrzewania oraz diagnozowania zmian jakościowych badanych produktów. Dodatkowo w pracy podjęto próbę określenia przydatności i ograniczeń analizowanego narzędzia, z uwzględnieniem problematyki autentyczności i jakości dojrzałych produktów serowarskich.

Realizacja celu głównego obejmowała dwa etapy badawcze, dlatego dla każdego z nich określono cele szczegółowe.

ETAP 1 – badania pilotażowe

Cele szczegółowe:

- E1.1.** Określenie charakterystyki elektrycznej mleka surowego, pasteryzowanego oraz pasteryzowanego z olejem palmowym, wykorzystywanych w produkcji serów i wyrobów seropodobnych, na podstawie pomiarów wybranych parametrów elektrycznych,
- E1.2.** Określenie wpływu substytucji tłuszczu mlekowego olejem palmowym oraz dojrzewania sera i wyrobów seropodobnych (28 dni) na zmiany parametrów tekstury oraz parametrów elektrycznych, mierzonych przy użyciu własnego układu pomiarowego z czujnikiem CPD.
- E1.3.** Ocena przydatności prototypowego narzędzia elektrycznego (układu pomiarowego z czujnikiem CPD) oraz identyfikacja jego ograniczeń w szybkiej, nieniszczącej ocenie zmian tekstury serów i wyrobów seropodobnych.

ETAP 2 – badania zasadnicze

- E2.1.** Określenie jakości serów i wyrobów seropodobnych podczas 28 dni dojrzewania na podstawie zmian ich składu chemicznego, dynamiki proteolizy, barwy oraz tekstury.
- E2.2.** Określenie właściwości elektrycznych serów i wyrobów seropodobnych surowych oraz dojrzewających w czasie 28 dni, na podstawie parametrów przewodnościowych (Z, G) i pojemnościowych (Cp, Cs) mierzonych przy użyciu czujnika CPM,
- E2.3.** Porównanie wyników uzyskanych z wykorzystaniem innowacyjnego narzędzia elektrycznego z wynikami metod referencyjnych (analizy składu, wskaźników proteolizy, barwy, tekstury) z zastosowaniem analizy statystycznej (PCA, korelacji)

oraz opracowanie modeli regresyjnych umożliwiających prognozowanie jakości technologicznej wyrobów dojrziałych na podstawie parametrów elektrycznych.

E2.4. Ocena potencjału zastosowania innowacyjnego narzędzia elektrycznego jako narzędzia diagnostycznego wspierającego proces zarządzania jakością produktu (z tłuszczem mlecznym i olejem palmowym) oraz ocena autentyczności serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych, z ogólnym odniesieniem do wymagań systemów zapewnienia jakości i bezpieczeństwa żywności.

Aby zweryfikować stopień realizacji sformułowanych celów oraz określić kierunek dalszych analiz empirycznych, przyjęto następujące hipotezy badawcze (H1-H4), odnoszące się do wpływu substytucji tłuszczu, właściwości metrologicznych zastosowanego narzędzia oraz zależności między parametrami elektrycznymi a wyróżnikami technologicznymi i jakościowymi serów dojrzewających oraz wyrobów seropodobnych.

H1: Substytucja tłuszczu mlekowego olejem roślinnym w produkcji wyrobów seropodobnych wpływa istotnie na wskaźniki jakości technologicznej oraz parametry elektryczne w porównaniu z serami dojrzewającymi.

H2: Czujnik pomiarowy CPM wykazuje większą przydatność do oceny jakości wyrobów serowarskich niż czujnik CPD, co przejawia się wyższą czułością i lepszą powtarzalnością uzyskiwanych parametrów elektrycznych.

H3: Zmiany parametrów elektrycznych i technologicznych (składu chemicznego, tekstury, barwy i związków azotowych) serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych korelują ze sobą w czasie dojrzewania (3–28 dni), co uzasadnia wykorzystanie innowacyjnego narzędzia elektrycznego do wspierania procesów oceny i zarządzania jakością tych produktów.

H4: Innowacyjne narzędzie elektryczne, opracowane przy użyciu własnego układu pomiarowego (czujnika CPM) oraz parametrów elektrycznych opisujących zastępczy model elektryczny RCC produktów serowarskich, umożliwia szybką ocenę jakości, autentyczności i stopnia dojrzałości serów dojrzewających oraz wyrobów seropodobnych.

W celu zapewnienia pełnej przejrzystości konstrukcji badawczej oraz wskazania logicznych zależności między założeniami teoretycznymi a częścią empiryczną w Tabeli 9 przedstawiono syntetyczne zestawienie celów badawczych, odpowiadających im hipotez oraz zadań badawczych. Zestawienie to porządkuje kluczowe elementy projektu badawczego, wskazuje ich powiązania z zastosowaną metodyką oraz umiejscowienie szczegółowych analiz

w dalszych rozdziałach rozprawy, co ułatwia ocenę spójności i adekwatności przyjętej struktury badawczej.

Tabela 9. Powiązanie celów badawczych, hipotez oraz zadań badawczych w rozprawie

Cel szczegółowy	Hipotezy	Zadania badawcze	Metody i narzędzia badawcze	Rozdział
E1.1 Określenie charakterystyki elektrycznej mleka surowego, pasteryzowanego i z olejem palmowym	H1	Analiza różnic między wariantami mleka	Czujnik CPD; Pomiary Z, G, Cp, Cs; analiza opisowa	5.1.1
E1.2 Ocena wpływu substytucji tłuszczu oraz dojrzewania na teksturę i parametry elektryczne	H1	Analiza zmian tekstury i parametrów elektrycznych przez 28 dni - Analiza zmian w czasie	Pomiary tekstury (TPA); Czujnik CPD; Analiza trendów	5.1.2
E1.3 Ocena przydatności prototypowego układu CPD	H2	- Ocena czułości i powtarzalności CPD - Identyfikacja ograniczeń	Czujnik CPD; Analiza odchyleń pomiarowych Porównania wewnątrzgrupowe	5.1.3
E2.1 Określenie jakości serów i wyrobów seropodobnych podczas dojrzewania	H1, H3	-Analiza składu chemicznego i proteolizy + pomiary tekstury i barwy przez 28 dni	Wskaźniki proteolizy; TPA; CIELab; oznaczenia fizykochemiczne	5.2.1
E2.2 Określenie właściwości elektrycznych serów i wyrobów seropodobnych	H1, H2, H3, H4	Analiza zmian parametrów elektrycznych w czasie dojrzewania	Czujnik CPM; model RCC; analiza zmian	5.2.2
E2.3 Porównanie wyników pomiarów elektrycznych z metodami referencyjnymi i budowa modeli regresyjnych	H3, H4	- Korelacje między parametrami elektrycznymi a cechami jakości - Modele regresyjne dla produktów dojrziałych	Statystyka wielowymiarowa (PCA, regresja liniowa); pakiet Statistica 13.3	5.2.3 5.2.4
E2.4 Ocena potencjału narzędzia elektrycznego jako narzędzia diagnostycznego w zarządzaniu jakością	H3, H4	- Ocena czułości narzędzia - Ocena możliwości zastosowania w ZKP, HACCP, laboratoriach zakładowych	Parametry elektryczne + modele; analiza zgodności; założenia do wdrożenia	5.2.5. Rozdz. 6

4. Metodyka badań

4.1. *Materiał badawczy i zakres badań*

Materiał badawczy stanowiły sery dojrzewające typu holenderskiego oraz wyroby seropodobne, które zostały wyprodukowane zgodnie z wymogami obowiązującymi w dwóch zakładach (X i Y) w północno-wschodnim rejonie Polski (Rysunek 10a).

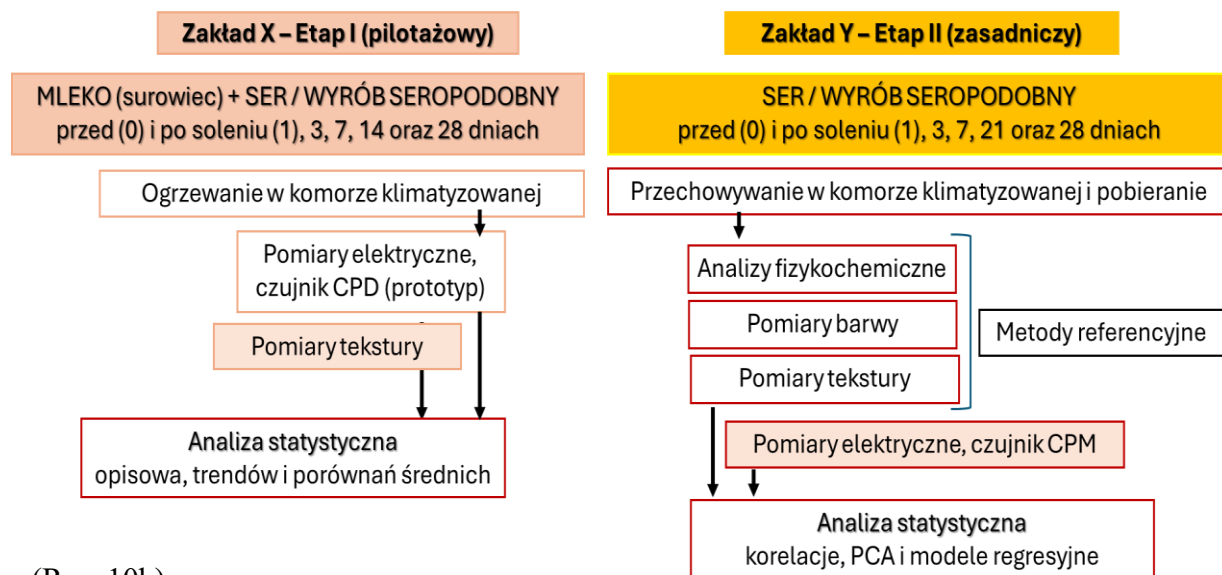
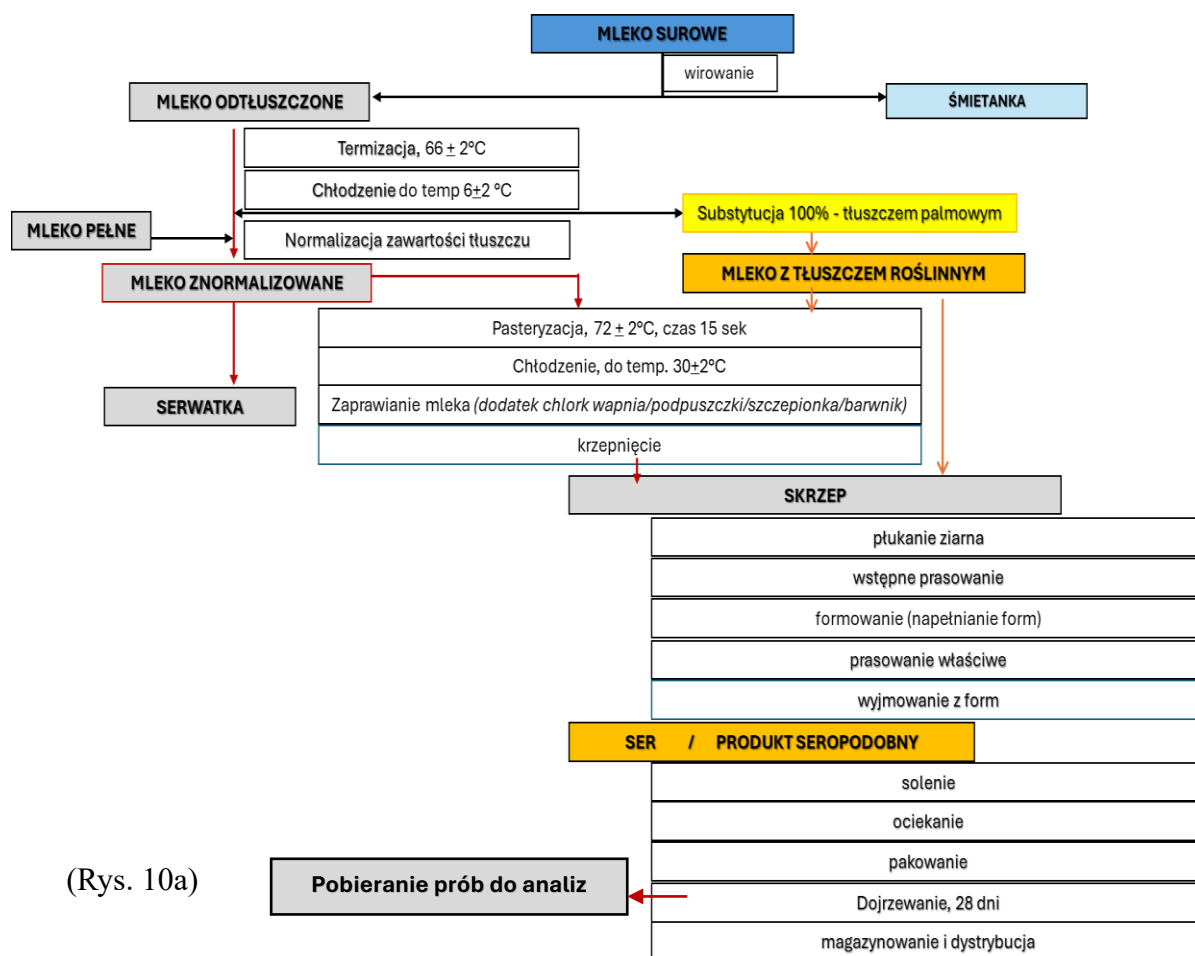
Surowcem do produkcji serów oraz wyrobów seropodobnych było mleko surowe, spełniające wymagania jakościowe dla mleka surowego, określone Rozporządzeniu (WE) nr 853/2004 parlamentu europejskiego i rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. ustanawiające szczególne przepisy dotyczące higieny w odniesieniu do żywności pochodzenia zwierzęcego (Dz.U. L 139 z 30.4.2004, str. 55). W produkcji wyrobów seropodobnych, zastosowano 100% substytucję tłuszczu mlekowego - olejem palmowym. Proces produkcji wyrobów seropodobnych, poza substytucją tłuszczu mlekowego olejem roślinnym, nie różnił się od klasycznego procesu technologicznego. Warunki dojrzewania wyrobów seropodobnych były takie same jak w przypadku serów typu holenderskiego (temp. $12\pm 1^{\circ}\text{C}$, wilgotność $85,0\pm 1,0\%$). Próbkę sera i wyrobów seropodobnych pobierano z magazynu zakładów mleczarskich (X i Y) w formie gotowych wyrobów – 3kg bloków, zapakowanych w folię crioVac (PN-ISO 707:2009). Produkty transportowane były w lodówkach turystycznych (temp 4°C). Docelowym przedmiotem badań były sery dojrzewające oraz wyroby seropodobne, które w zależności od etapu badań (I i II) pobierano i badano na różnych etapach jego produkcji:

- przed (0) i po soleniu (1) oraz po 3, 7, 14 i 28 dniach dojrzewania (etap I, zakład X),
- przed (0) i po soleniu (1), oraz po 3, 7, 21 i 28 dniach dojrzewania (etap II, zakład Y).

Schematyczne zestawienie przebiegu doświadczenia oraz punktów poboru próbek w etapie I i II przedstawiono na rysunku 10b.

W doświadczeniu przyjęto okres dojrzewania wynoszący 28 dni, co odpowiada minimalnemu czasowi kształtowania cech sensorycznych i fizykochemicznych serów półtwardych typu holenderskiego. W tym czasie zachodzą najbardziej dynamiczne przemiany biochemiczne i reologiczne, które determinują jakość technologiczną produktów (McSweeney i Sousa, 2000; Amarita, 2001). Przyjęty okres umożliwił również porównanie serów i wyrobów seropodobnych w warunkach odpowiadających wczesnej fazie dojrzewania, w której produkty te są przeznaczone do konsumpcji i wykazują charakterystyczne właściwości jakościowe.

W czasie produkcji serów i wyrobów seropodobnych (przeznaczonych do badań na etap I i II), prowadzono procesy kontroli parametrów technologicznych badanych produktów.



Rysunek 10. Schemat produkcji sra i wyrobu seropodobnego stosowany w zakładach mleczarskich (a) oraz schemat doświadczenia w etapie I i II (b).

Źródło: Opracowanie własne

Charakterystykę parametrów kontroli jakości surowców (mleko: surowe, znormalizowane, z dodatkiem oleju palmowego) i produktów gotowych (ser i wyrób seropodobny) wraz z wymaganiami normatywnymi, zestawiono w (Tabela 10).

Tabela 10. Charakterystyka surowca i produktów gotowych

Przedmiot badań	Parametry kontroli jakości	Wymagania
Mleko surowe	Kwasowość - 6,3°SH; pH - 7,1; ciężar właściwy - 1,031g; zawartość tłuszczu - 4,2%	PN-86/A-86041
Mleko znormalizowane	Kwasowość - 6,4°SH; pH - 6,72; ciężar właściwy - 1,028g; zawartość tłuszczu - 3,3%	j.w.
Mleko z dodatkiem tłuszczu roślinnego	Kwasowość - 6,3°SH; pH - 6,72; ciężar właściwy - 1,031g; zawartość tłuszczu - 3,2%	j.w.
Ser	pH = 5,57; zawartość wody – 43%; zawartość tłuszczu 26%, zawartość tłuszczu w s.m. = 45,6%	PN-68/A-86230
Wyrób seropodobny	pH = 5,45; zawartość wody – 43,2%; zawartość tłuszczu 25%, zawartość tłuszczu w s.m. = 44%	ZN05/OSM/10

Źródło: Opracowanie własne

4.1.1. Metody referencyjne – analizy fizykochemiczne

Próbki sera i wyrobów seropodobnych przygotowywano zgodnie z normą ISO 707:2009 (IDF 50:2008). Przed przystąpieniem do analiz, reprezentatywną próbkę sera dwukrotnie mielono za pomocą urządzenia tarkującego (BOSH MUZ4MM3), a następnie dokładnie mieszano.

➤ Skład chemiczny

W serach i wyrobach seropodobnych został oznaczony skład chemiczny w 6 powtórzeniach. Zawartość tłuszczu oznaczono zgodnie z normą ISO 8968-1:2014 (IDF 20-1:2014), zawartość chlorku sodu zgodnie z normą ISO 8968-1:2014 (IDF 20-1:2014), zawartość suchej masy wg ISO 5534:2005 (IDF 4:2004).

➤ Kwasowość czynna (pH)

Kwasowość czynną serów i wyrobów seropodobnych oznaczano wg PN-73-A-86232 – (Mleko i przetwory mleczarskie. Sery. Metody badań). Pomiar pH określono w zawiesinie materiału badawczego, przygotowanej przez zmieszanie 10 g sera tartego (za pomocą urządzenia tarkującego (BOSH MUZ4MM3) z 10 ml wody w cylindrze (h=3 cm, śr=1,5 cm). Do tego celu wykorzystano pH-metr Elmetron CP 502 (Polska) z elektrodą szklaną, którą przed pomiarami skalibrowaną dwoma buforami roztwory o pH 4,01 i 7,00 (Merck, Polska) i przed każdym pomiarem przepłukiwano wodą destylowaną pomiaru wykonywano w 3 powtórzeniach, dla każdego oznaczenia.

➤ ***Dynamika proteolizy***

Fracje azotowe: związki azotowe ogółem (TN), związki rozpuszczalne w pH 4,4 (SN), związki rozpuszczalne w 12% kwasie trichlorooctowym (TCA-SN) oraz związki azotowe rozpuszczalne w 5% kwasie fosforowolframowym (PTA-SN) w serach i wyrobach seropodobnych przygotowano według zaleceń normy ISO 27871: 2011 (IDF 224:2011) - *Cheese and processed cheese - Determination of the nitrogenous fraction*, natomiast oznaczanie azotu prowadzono według normy ISO 8968-1:2014 (IDF 20-1:2014) - *Milk and milk products - Determination of nitrogen content - Kjeldahl principle and crude protein calculation*. Wyniki dotyczące zawartości związków azotowych rozpuszczalnych - SN, niebiałkowych – TCA-SN i aminokwasowych - PTA-SN wyrażano w procentach związków azotowych ogółem - TN.

➤ ***Oznaczanie związków azotowych***

Każdą przygotowaną próbkę sera i wyrobu seropodobnego, w ilości 20g rozpuszczano w 0,5M roztworze cytrynianu trójsodowego. Po wymieszaniu umieszczano w łaźni wodnej z wytrząsaniem, w temp. 45°C /15 minut. Po homogenizacji (homogenizator laboratoryjny, IKA Ultra Turrax), uzyskiwano jednorodną zawiesinę, którą ponownie umieszczono w łaźni wodnej w temp. 45 °C/1 godz. Po ilościowym przeniesieniu do kolby miarowej o objętości 200ml, mieszano, a następnie chłodzono do temperatury pokojowej.

➤ ***Związki azotowe ogółem (TN)***

Pobierano próbkę sera w ilości ok. 0,5g (z dokładnością do 3 miejsca po przecinku) i przenoszono do rury mineralizacyjnej (Foss), po czym oznaczano zawartość związków azotowych ogółem, metodą Kjeldahl'a, korzystając z normy ISO 8968-1, 2014 (IDF 20-1:2014) (ISO8968-1, 2014).

➤ ***Fracje związków azotowych rozpuszczalnych (SN)***

Do przygotowanej próbki (50 ml zawiesiny) dodawano ok. 11 cm 1M HCL i korygowano pH do wartości 4,4 (jeśli było to konieczne). Mieszaninę przenoszono ilościowo do kolby miarowej o objętości 100 ml. Po przefiltrowaniu mieszaniny na sączku Whatmanna 40, pobierano 15 ml przesączu i przenoszono do kolby mineralizacyjnej. Zawartość SN oznaczano metodą Kjeldahl'a, zgodnie z normą ISO 27871, 2011 (IDF 224:2011) (ISO27871, 2011).

➤ ***Fracje związków azotowych rozpuszczalnych (TCA-SN, PTA-SN)***

Przygotowaną próbkę (50 ml zawiesiny) przenoszono do kolby miarowej o objętości 100 ml i uzupełniano 20 ml:

a/. 24% roztworem kwasu trichlorooctowym (TCA-SIN).

b/. 25% roztworu kwasu fosforowolframowego, mieszano, po czym uzupełniano 25% kwasem siarkowym (PTA-SN).

Po przefiltrowaniu mieszaniny na sączku Whatmanna 40, pobierano 20 ml przesączu i przenoszono do kolby mineralizacyjnej. Zawartość PTA-SN oznaczano metodą Kjedał'a, zgodnie z normą ISO27871, 2011 (IDF 224:2011) (ISO27871, 2011).

➤ ***Makroskładniki (Ca, P)***

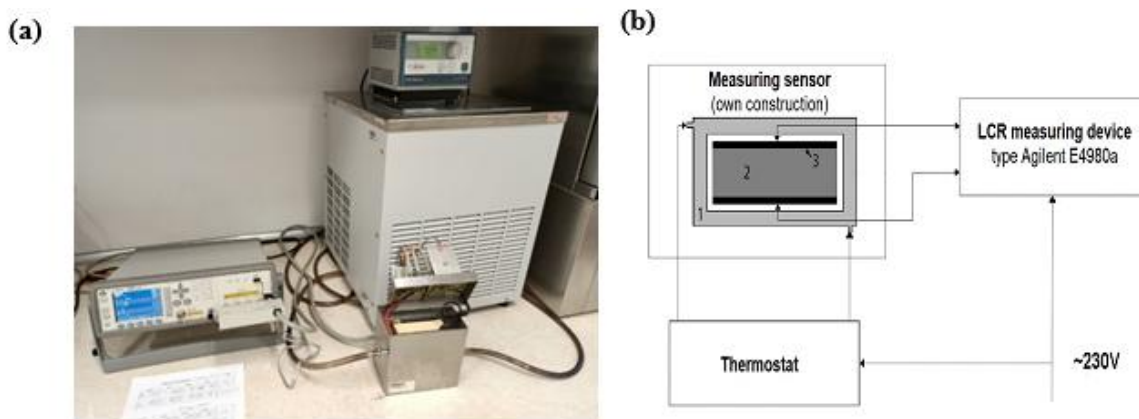
Próbki serów i wyrobów seropodobnych poddano mineralizacji na sucho w piecu muflowym w temperaturze 550°C w czasie 16-18 godz., do uzyskania jasnego, wolnego od śladów węgla popiołu (Krełowska-Kułas, 1993; Nogala-Kałużka 2016). Zawartość Ca i P w mineralizatach oznaczono metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej w płomieniu powietrzno-acetylenowym przy użyciu spektrometru absorpcji atomowej serii iCE 3000 (Thermo-Scientific, Hemel Hempstead, UK), wyposażonym w lampę deuterową do korekcji tła oraz lampy katodową przy odpowiednich długości fali. Zawartość fosforu oznaczono metodą kolorymetryczną z zastosowaniem molibdenianem amonu oraz z siarczanem sodu i hydrochinonem (Merck, Germany). Pomiaru dokonano z zastosowaniem Spectrofotometr Cary 60 UV-VIS (Agilent, Canada) przy długości fali 610 nm.

4.1.2. Metody instrumentalne

➤ ***Pomiary elektryczne - element innowacyjnego narzędzia oceny jakości***

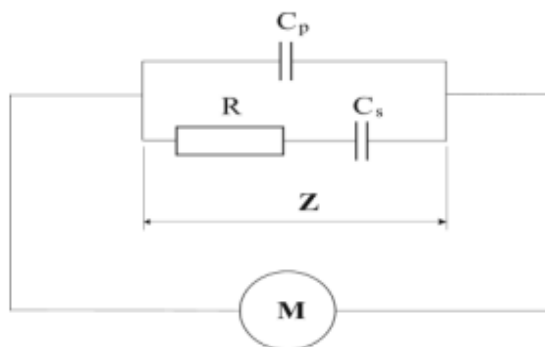
Pomiary elektryczne surowca (mleka, oleju palmowego) oraz serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych wykonano przy użyciu zintegrowanego, innowacyjnego narzędzia pomiarowego, stanowiącego kluczowy komponent projektowanego narzędzia oceny jakości serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych. Badania przeprowadzono przy użyciu zestawu pomiarowego (Rysunek 11a) oraz zastępczego modelu RCC (rezystancjny szeregowo-równoległy + pojemność) produktów spożywczych (Rysunek 12), tworzących razem spójny układ pomiarowy, który we wcześniejszych badaniach promotora pracy (Banach i in. 2008, 2012a,b, 2024, Żywica, Banach, Kiełczewska 2012) posłużył również do określenia zmian jakości produktów mleczarskich.

Poglądowy schemat układu pomiarowego użytego do badań przedstawiono na rysunku 11b.



Rysunek 11. Zestaw pomiarowy: **(a)** oraz schemat układu pomiarowego **(b)** do badania ich właściwości elektrycznych (1 - płaszcz wodny; 2 - badana próbka; 3 - pojemnik szklany z elektrodami, w etapie II), wykorzystany do innowacyjnej metody oceny jakości serów i wyrobów seropodobnych.

Źródło: Opracowanie własne

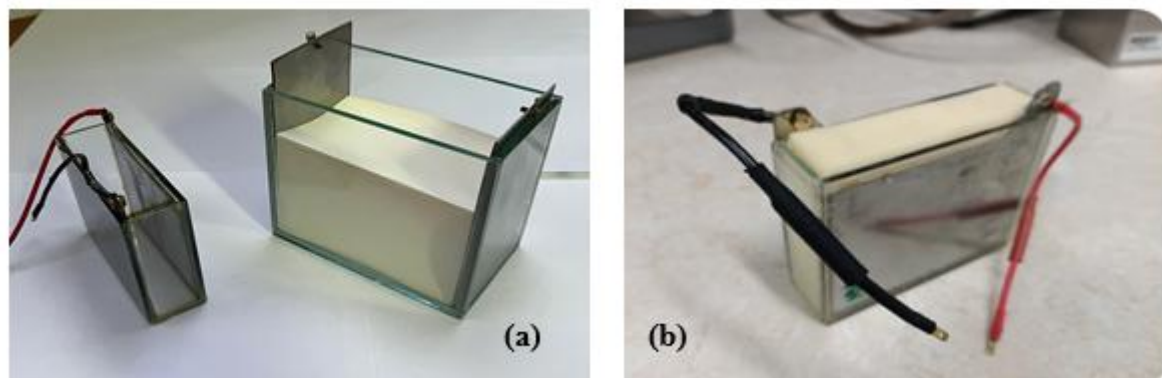


Rysunek 12. Schemat zastępczego modelu elektrycznego (RCC) surowców i produktów żywnościowych: Z – impedancja, R – rezystancja, C_p – równoważna równoległa pojemność elektryczna, C_s – równoważna szeregową pojemność elektryczna, M – urządzenie pomiarowe. *Źródło: Opracowanie własne*

Zestaw (układ) pomiarowy, wykorzystany do wykonania pomiarów parametrów elektrycznych wyrobów mleczarskich, składał się z następujących elementów:

- ✓ komora klimatyzacyjna firmy Memmert ICP 500 (GmbH + Co. KG D-91126, Schwabach FRG, Niemcy),
- ✓ główne urządzenie pomiarowe - miernik LCR, typ E4980a (Agilent, Colorado Springs, CO, USA),
- ✓ metalowy zbiornik z płaszczem wodnym połączony przewodami z układem termostatowanym,
- ✓ termostat (PolyScience, Niles, IL, USA),

- ✓ czujnik pomiarowy o dużej szczelinie między elektrodami płytowymi (CPD: dług. × szer. × wys.: 119 × 70 × 109 mm), które znajdowały się na dwóch krótszych ściankach zbiornika – (Rysunek 13a) (wykorzystany w etapie 1 – badania pilotażowe)
- ✓ czujnik pomiarowy o małej szczelinie między elektrodami płytowymi (CPM: dług. × szer. × wys.: 94 × 24.5 × 78 mm), które znajdowały na dwóch dłuższych ściankach zbiornika – Rysunek 13b (wykorzystany w etapie 2 – badania zasadnicze).



Rysunek 13. Czujniki pomiarowe własnej konstrukcji: CPD (a) oraz CPM (b).

Źródło: Opracowanie własne

W etapie I zastosowano czujnik CPD o większej odległości między elektrodami, co umożliwiło ocenę koncepcyjną metody i jednocześnie pozwoliło zidentyfikować ograniczenia w zakresie powtarzalności pomiarów, wynikające z dużej wrażliwości układu na sposób przygotowania próbki. Z tego względu w etapie II użyto czujnika CPM, którego mniejsza szczelina i większa powierzchnia kontaktu z próbką poprawiły stabilność sygnału oraz ograniczyły wpływ zmienności operacyjnej. Dobór czujnika CPM wynikał z potrzeby zwiększenia wiarygodności pomiarów w procesie oceny jakości produktów serowarskich.

Próbki do badań elektrycznych, wycinano z różnych części bloków (zewnątrznych i wewnętrznych) o masie ok. 400g (etap 1) i ok. 150g (etap 2) każdy i wkładano do czterech czujników pomiarowych - zbiorników szklanych (Rysunek 13a, 13b). Próbki ściśle przylegały do elektrod i ścianek zbiorników. Aby osiągnąć wymaganą temperaturę próbki (ok. 20°C), zbiorniki wkładano do komory klimatyzacyjnej, w której temperatura powietrza wynosiła $20 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Po uzyskaniu wymaganej temperatury próbki, czujniki z badanymi próbkami przenoszono do metalowego zbiornika, wyposażonego w płaszcz wodny, który podłączony był dwiema rurkami (tworząc obieg zamknięty) do termostatu (PolyScience, Niles, Illinois, USA). Działanie to miało na celu zapobiegnięcie niekontrolowanej zmiany temperatury próbek podczas pomiarów elektrycznych. Następnie, celę pomiarową (metalowy zbiornik+ czujnik z próbką), za pomocą przewodów pomiarowych, podłączano do miernika LRC. Przed rozpoczęciem pomiarów wykonano kompensację przewodów (długość 1 m)

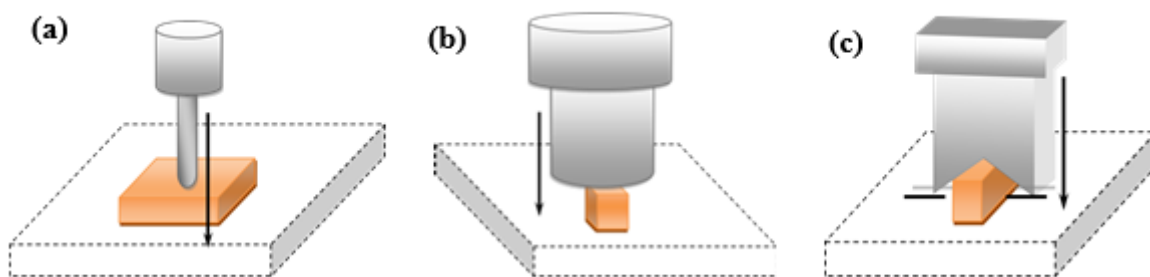
łączących miernik LCR z całą pomiarową, wykorzystując funkcję wewnętrzną miernika. Dokonano pomiarów parametrów elektrycznych: przewodnościowych - impedancji (Z); przewodności (G) oraz dielektrycznych - pojemności równoległej (C_p) i szeregowej (C_s), w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 2 MHz, oraz napięciu 200 mV. Zmierzone wartości parametrów zapisywane były na zewnętrznej pamięci USB (Standard USB 1.1). Prezentowane w pracy zmierzone wartości tych parametrów, są wartościami średnimi z 6 powtórzeń, a różnica między nimi była $<1\%$.

Opisany układ pomiarowy, w połączeniu z modelem RCC i procedurą analityczną, stanowi integralną część koncepcji narzędzia służącego do oceny jakości i stopnia dojrzałości badanych produktów.

➤ *Pomiary tekstury (etap I)*

Pomiary tekstury sera i wyrobów seropodobnych prowadzone przy wykorzystaniu uniwersalnego urządzenia testującego INSTRON, typ 4301. Właściwości mechaniczne badanych próbek określono na podstawie 3 rodzajów testów: przebijania, ściskania i cięcia. Wyniki testów analizowano za pomocą komputera z oprogramowaniem: Instron Series IX. Automated Material Testing System, Version 8.04.

- ✓ Test przebijania wykonano na próbkach o wymiarach 30 x 5 x 30 mm, przy działaniu trzpieniem płaskościętym o średnicy 6,4 mm oraz prędkości elementów roboczych 50 mm/min (Rysunek 14 a). Dokonano pomiarów maksymalnej siły przebiccia (F_p) oraz odkształcenia podczas przebijania (D_p), w 12 powtórzeniach.
- ✓ Test ściskania wykonano na próbkach w kształcie sześciianu, o wymiarach 10 x 10 x 10 mm. Dokonywano pomiarów maksymalnej siły ściskania (F_s) i odkształcenia przy maksymalnej sile ściskania (D_s) przy działaniu nacisku powierzchni płaskiej podstawy walca (Rysunek 14 b).
- ✓ Test cięcia wykonano na próbkach sera i wyrobów seropodobnych w kształcie prostopadłościanu, o wymiarach 10 x 10 x 30 mm. Wykonano pomiary: maksymalnej siły cięcia (F_c) oraz odkształcenia podczas cięcia (D_c), w 12 powtórzeniach. Zastosowano jednonożowy układ tnący Warnera-Bratzlera, typ 2830-013, o grubości noża 1,016 mm oraz 60° kąta ostrza oraz prędkości elementów roboczych 50 mm/min (Rysunek 14 c).



Rysunek 14. Sposób wykonania testu: przebijania (a), ściskania (b) oraz cięcia (c) badanego materiału.

Źródło: Opracowanie własne

➤ *Profilowa Analiza Tekstury –TPA (etap II)*

Analizę tekstury przeprowadzono, wykorzystując test podwójnego ściskania profilowej analizy tekstury, za pomocą urządzenia TA.XT. Plus texture analyser (Stable Micro Systems, UK). Próbkę w kształcie sześciangu (20×20 mm) poddawano dwukrotnemu ściskaniu do 50% pierwotnej wysokości, przy prędkości głowicy $0,83 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Teksturę sera i wyrobów seropodobnych scharakteryzowano za pomocą zmierzonych parametrów ($n=12$): twardość I i II, adhezyjność, i kohezyjność, natomiast elastyczność odczytywano z wykresu siła–czas a żujność wyliczano z zależności (żujność = twardość I × kohezyjność × elastyczność). Pomiary wykonywano po 15 minut ± 5 od wyjęcia sera z komory chłodniczej, w temperaturze otoczenia ($20^\circ\text{C} \pm 1$).

➤ *Pomiary barwy*

Ocenę barwy serów i wyrobów seropodobnych przeprowadzono za pomocą spektrofotometru HunterLab (typ MiniScan XE, iluminat/obserwator D65/10*, USA) (Rysunek 15 a,b) - stosując skalę CIELAB. Wykonano pomiary parametrów: L^* - jasności (+)/czerni (-), a^* - barwy czerwonej(+) / zielonej(-) i b^* - barwy żółtej (+) / niebieskiej (-), które korelują z wizualnym odczuciem barwy przez człowieka. Przed rozpoczęciem pomiarów urządzenie kalibrowano za pomocą białej i czarnej płytki ceramicznej. Pomiary barwy prowadzono na próbkach w kształcie prostopadłościanu – rys. 15c, uzyskanych po porcjowaniu sera wg. Normy PN-ISO 707:2009, w 18 powtórzeniach.



Rysunek 15. Spektrofotometr HunterLab (a,b) oraz kształt badanych próbki sera i wyrobu seropodobnego (c).

Źródło: Opracowanie własne

4.2. Analiza statystyczna

Analizy statystyczne przeprowadzono w celu ilościowej oceny zmian parametrów jakościowych serów (S) oraz wyrobów seropodobnych (WS) w czasie dojrzewania oraz identyfikacji zależności między parametrami fizykochemicznymi, tekstury, barwy i elektrycznymi badanych produktów. Dane obejmowały parametry tekstury (twardość, sprężystość, spójność, gumowatość, żujność, elastyczność, przyczepność), barwy (L^* , a^* , b^*), cechy fizykochemiczne (białko, tłuszcz, sucha masa, sól, woda, aw, pH, Ca, P), frakcje azotowe (TN, SN/TN, TCA/TN, PTA/TN) oraz parametry elektryczne (Z, G, Cp, Cs) w zakresie częstotliwości 100 Hz–1 MHz. Dla wszystkich zmiennych obliczono statystyki opisowe (średnia, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności), stanowiące podstawę dalszych analiz porównawczych i korelacyjnych.

Wpływ czasu dojrzewania i rodzaju produktu (S vs WS) na wartości analizowanych parametrów oceniano z wykorzystaniem jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA, a po stwierdzeniu istotności efektów głównych wykonywano porównania średnich testem Fishera (oznaczenia literowe a, b, c).

Do oceny siły i kierunku liniowych zależności między zmiennymi zastosowano współczynnik korelacji Pearsona, co umożliwiło identyfikację powiązań między parametrami technologicznymi a elektrycznymi oraz wybór zmiennych do dalszego modelowania regresyjnego (Cohen, 2013). Za istotne uznano zależności od $r \approx 0,40$ (Everard i in., 2015; Nelson, 2006), przy czym w przypadku wysokich wartości $r (\geq 0,70)$ uwzględniano również związki o $p \approx 0,06$ – $0,09$, co wynika z większej naturalnej zmienności materiału biologicznego (Nelson, 2006).

Strukturę współzależności między wieloma parametrami jednocześnie analizowano z wykorzystaniem analizy głównych składowych (PCA), co umożliwiło redukcję wymiarowości, identyfikację głównych wzorców zmienności oraz wizualizację relacji między

próbkami i zmiennymi w przestrzeni czynnikowej (Jolliffe, Cadima, 2016). Wyniki PCA posłużyły do interpretacji powiązań między cechami tekstury, barwy, składu chemicznego, związków azotowych i parametrów elektrycznych oraz do opisu kierunku zmian w trakcie dojrzewania.

Możliwość wykorzystania właściwości elektrycznych jako predyktorów jakości oceniano z zastosowaniem regresji liniowej, w której zmiennymi objaśniającymi były parametry przewodnościowe (Z, G) i pojemnościowe (cp, Cs), natomiast zmiennymi objaśnianymi – wybrane wskaźniki jakości fizykochemicznej, strukturalnej i proteolizy po 28 dniach dojrzewania.

Wszystkie analizy statystyczne przeprowadzono przy użyciu pakietu Statistica 13.3 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, Kalifornia, USA) przy poziomach istotności $p < 0,05$ i $p < 0,01$.

5. Wyniki badań i ich dyskusja

5.1. Badania pilotażowe - etap I

Współczesne podejście do zarządzania jakością produktów żywnościowych coraz częściej uwzględnia interdyscyplinarne strategie badawcze, łączące klasyczne narzędzia oceny z nowoczesnymi, nieniszczącymi technikami pomiarowymi. Niniejszy etap badań wpisuje się w ten nurt, łącząc wiedzę z zakresu technologii żywności, fizykochemii oraz zarządzania jakością i stanowiąc etap przedwdrożeniowej oceny przydatności metody elektrycznej.

Etap I badań pilotażowych polegał na określeniu zależności między parametrami elektrycznymi, mierzonymi przy pomocy własnej konstrukcji układu pomiarowego (czujnik pomiarowy – CPD) a cechami tekstury produktów dojrzewających. Celem była wstępna ocena czułości i powtarzalności pomiarów oraz identyfikacja ograniczeń technologicznych czujnika CPD, co ma kluczowe znaczenie dla późniejszych analiz jakościowych. Uzyskane wyniki posłużyły także do zaplanowania etapu II – badań zasadniczych, z wykorzystaniem czujnika małego (CPM), o założonej wyższej czułości i lepszej stabilności sygnału.

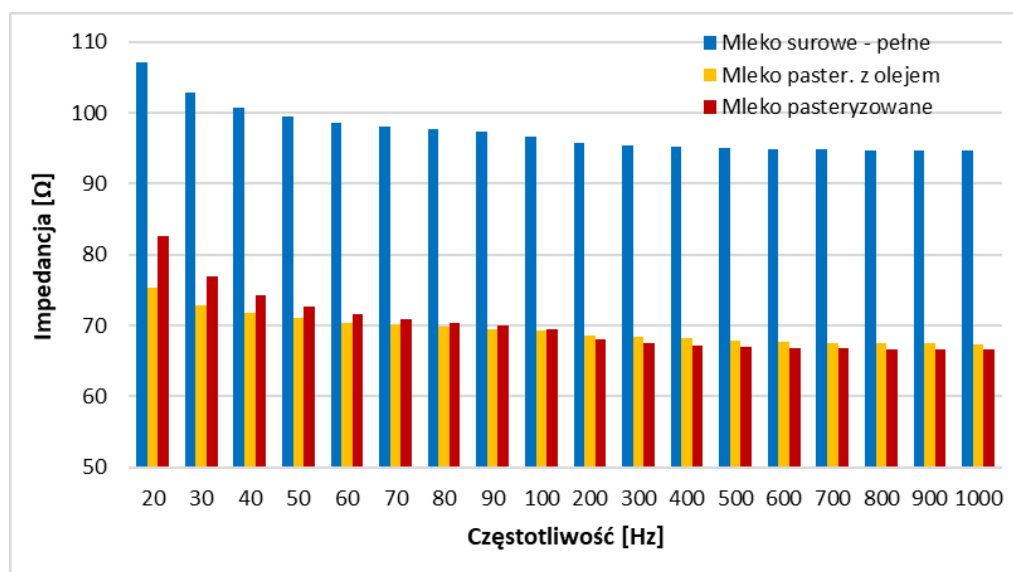
W niniejszym rozdziale przedstawiono: charakterystykę surowca wykorzystanego w produkcji serów i wyrobów seropodobnych (5.1.1), ocenę właściwości mechanicznych i elektrycznych surowych wyrobów serowarskich (5.1.2), analizę zmian tekstury oraz parametrów elektrycznych podczas dojrzewania serów i wyrobów seropodobnych (5.1.3), a w następnym podrozdziale oceniono potencjał diagnostyczny zastosowanej metody elektrycznej w kontekście oceny tekstury wyrobów serowarskich (5.2).

5.1.1. Charakterystyka elektryczna mleka wykorzystanego w produkcji

W ramach badań wstępnych scharakteryzowano surowiec (mleko) wykorzystanego do produkcji serów, tj. trzech typów mleka: mleka surowego (MS), mleka pasteryzowanego (MP) oraz mleka pasteryzowanego z dodatkiem oleju palmowego (MP+O). Charakterystyka ta miała na celu nie tylko opis fizykochemiczny surowca, lecz także ocenę różnic w jego zachowaniu elektrycznym, istotnych z punktu widzenia dalszych etapów procesu technologicznego oraz zarządzania jakością produktu. Pod względem jakości zmierzone w zakładzie mleczarskim parametry (Tabela 10) potwierdziły, że mleka spełniają wymogi określone w Polskich Normach (Tabela 10).

Dla celów porównawczych wykonano także pomiary elektryczne: Z , C_s i C_p w funkcji częstotliwości (f), przy użyciu własnej konstrukcji układu pomiarowego (Rysunek 16). Pomiary prowadzono w zakresie częstotliwości 20–1000 Hz, co umożliwiło analizę

zachowania badanych próbek zarówno w obszarze niskich częstotliwości, wrażliwym na procesy polaryzacji międzyfazowej, jak i w zakresie wyższych częstotliwości, gdzie istotniejszy staje się udział przewodnictwa jonowego i właściwości dielektrycznych fazy wodnej.

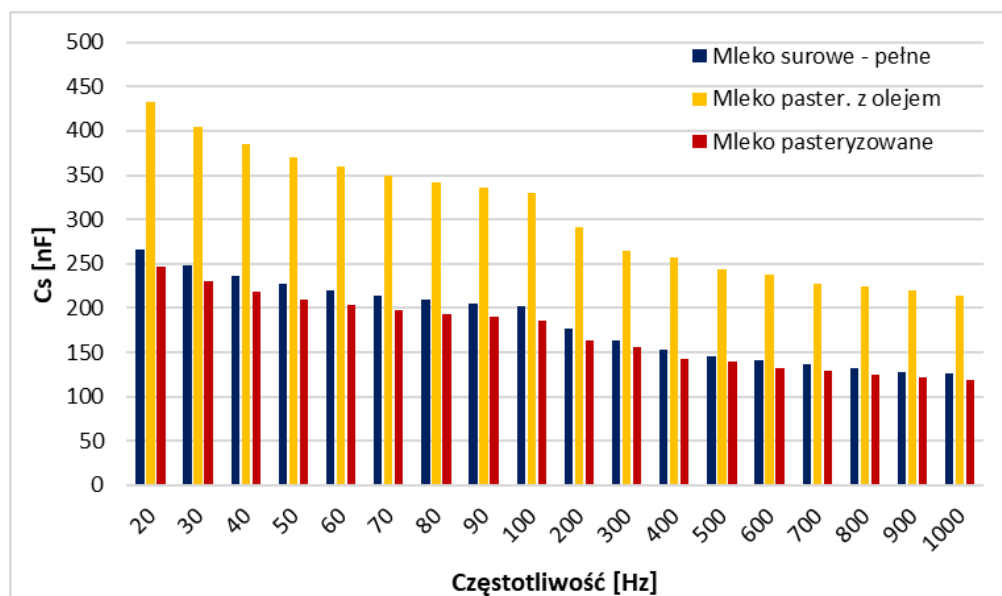


Rysunek 16. Zmiany impedancji mleka: surowego, pasteryzowanego oraz z olejem palmowym w funkcji częstotliwości pomiarowej od 20 do 1000 Hz.

W zakresie częstotliwości 20–1000 Hz zaobserwowano wyraźne różnice w wartościach impedancji (Z). Najwyższą Z charakteryzowało się mleko surowe (MS), w którym wartości zmieniały się w zakresie 108–95 Ω . Może to wynikać z obecności naturalnych białek, nienaruszonej struktury miceli kazeinowych oraz wyższej zawartości jonów wapnia i fosforanów, typowych dla mleka nieprzetworzonego (Savaidis, 2011). Relatywnie wysoka Z może świadczyć o większej integralności struktury koloidalnej, co ma znaczenie dla przebiegu koagulacji i formowania skrzepu w dalszych etapach procesu produkcji sera.

Mleko pasteryzowane (MP) oraz pasteryzowane z olejem palmowym (MP+O) wykazywały niższe wartości Z w porównaniu z mlekiem surowym - MS. Wartości impedancji wynosiły odpowiednio 80–70 Ω (MP) oraz 75–65 Ω (MP+O). Różnice te można wyjaśnić denaturacją białek serwatkowych i zmniejszeniem liczby swobodnych nośników ładunku elektrycznego w wyniku pasteryzacji (Karoui i De Baerdemaeker, 2007). Dodatek oleju palmowego mógł dodatkowo zmodyfikować układ koloidalny mleka poprzez zmianę rozmieszczenia fazy lipidowej. Uzyskane wyniki wskazują, że już na etapie surowca możliwe jest różnicowanie mleka o odmiennym stopniu przetworzenia oraz składzie tłuszczowym na podstawie parametrów impedancyjnych, co wzmacnia potencjał wykorzystania metody elektrycznej jako narzędzia wstępnej kontroli jakości dostaw.

Wyniki pomiarów pojemności szeregowej (C_s) wskazały odwrotną tendencję w stosunku do impedancji. Najwyższe wartości C_s uzyskano dla mleka MP+O, co może świadczyć o zwiększonej zdolności układu do magazynowania ładunku elektrycznego w obecności cząsteczek lipidowych. Wartości C_s dla MP+O osiągały ok. 450 nF przy 20 Hz, podczas gdy dla MP i MS wynosiły odpowiednio ~250 nF i ~260 nF (Rysunek 17). Otrzymane wyniki sugerują, że dodatek tłuszczu roślinnego modyfikuje właściwości polaryzacyjne układu, co może być wykorzystane do identyfikacji obecności tłuszczów niemlecznych w surowcu, szczególnie w połączeniu z innymi parametrami elektrycznymi.

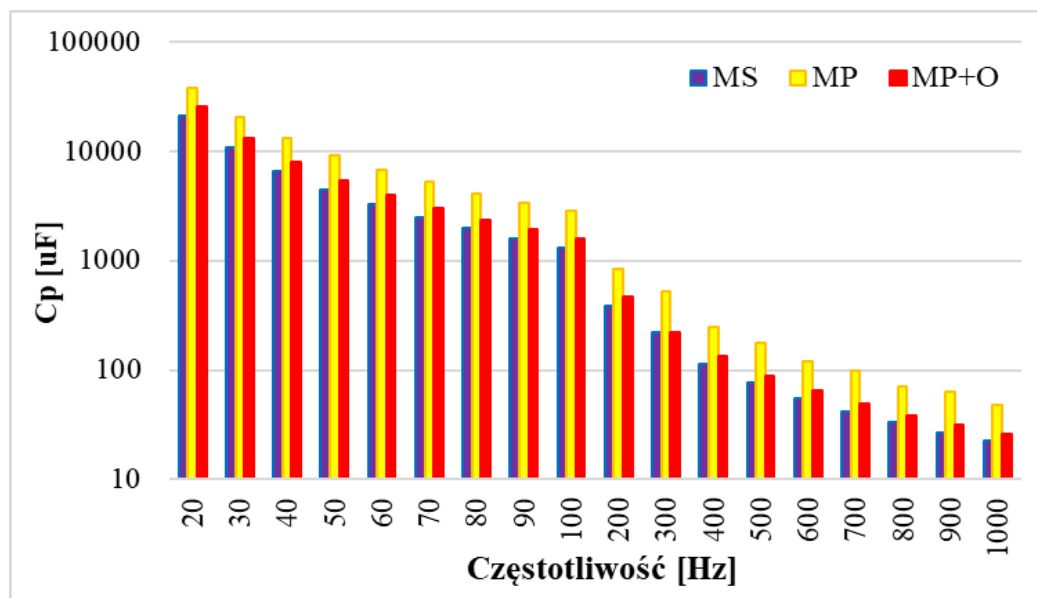


Rysunek 17. Zmiany wartości C_s mleka surowego, pasteryzowanego oraz mleka pasteryzowanego z olejem palmowym w funkcji częstotliwości (20 - 1000 Hz).

Wartości pojemności równoległej (C_p) wykazywały silną zależność od częstotliwości. Dla mleka pasteryzowanego (MP) obserwowano najwyższe wartości C_p w całym zakresie pomiarowym – np. ok. 37 700 μ F przy 20 Hz, podczas gdy dla mleka z dodatkiem oleju palmowego (MP+O) oraz mleka surowego (MS) wartości były znacząco niższe (odpowiednio 25 700 μ F i 20 800 μ F). Wraz ze wzrostem częstotliwości C_p malało logarytmicznie we wszystkich próbkach, osiągając wartości rzędu kilkudziesięciu μ F powyżej 500 Hz (Rysunek 18).

Całkowita substytucja tłuszczu mlekowego olejem palmowym nie powodował zwiększenia wartości C_p dla MP, lecz jej obniżenie, zwłaszcza przy niskich częstotliwościach. Można to wyjaśnić niższą przenikalnością dielektryczną fazy lipidowej (ϵ' olejów roślinnych ~2–3) w porównaniu z wodą ($\epsilon' \sim 80$), co ogranicza zdolność układu do gromadzenia ładunku elektrycznego (Vrba i Vrba, 2013). Mleko pasteryzowane odznaczało się najwyższymi

wartościami C_p , prawdopodobnie w wyniku częściowej homogenizacji białkowo-tłuszczowej i stabilizacji miceli kazeinowych podczas obróbki termicznej (Wang, 2003). Z kolei MS charakteryzowało się szybkim zmniejszeniem C_p wraz ze wzrostem częstotliwości, co można wynikać z jego większej heterogeniczności strukturalnej i obecności niestabilnych miceli białkowych (Jha, 2011).



Rysunek 18. Zmiany wartości C_p mleka surowego (MS), pasteryzowanego (MP) oraz mleka pasteryzowanego z olejem palmowym (MP+O) w funkcji częstotliwości (20 - 1000 Hz).

Taki przebieg zmian C_p potwierdza, że proces pasteryzacji oraz dodatek tłuszczu roślinnego w istotny sposób modyfikują właściwości dielektryczne mleka, co może być wykorzystane do różnicowania surowca w rutynowej kontroli jakości.

Zaobserwowane różnice w wartościach impedancji i pojemności wynikają ze zmiany w strukturze fizykochemicznej mleka, zależne zarówno od procesu pasteryzacji, jak i od obecności tłuszczu roślinnego. Mleko pasteryzowane wykazywało najwyższe wartości C_p , co sugeruje stabilizację układu koloidalnego podczas obróbki cieplnej, natomiast dodatek oleju palmowego obniżał zdolność układu do magazynowania ładunku elektrycznego. Mleko surowe odznaczało się najwyższą impedancją oraz niższymi wartościami pojemności, co świadczy o zwartej strukturze koloidalnej i ograniczonej przewodności. Z punktu widzenia zarządzania jakością surowca wyniki te wskazują, że parametry elektryczne mogą pełnić rolę czułych wskaźników zmian strukturalnych, pozwalających na różnicowanie mleka o odmiennym stopniu przetworzenia i składzie lipidowym oraz na wczesne wykrywanie potencjalnych niezgodności. Różnice te mają potencjalne znaczenie technologiczne, ponieważ mogą wpływać na przebieg koagulacji, odwodnienie skrzepu oraz aktywność mikroflory

starterowej, a tym samym na jakość i teksturę gotowych serów. Tak wyraźne różnice parametrów elektrycznych sugerują możliwość ich wykorzystania do wczesnej kontroli jakości surowca i identyfikacji rodzaju zastosowanego tłuszczu.

Uzyskane wyniki stanowią zatem istotny punkt odniesienia dla kolejnych etapów badań, w których analizowana jest zależność pomiędzy właściwościami elektrycznymi surowca a strukturą i teksturą serów oraz wyrobów seropodobnych o różnym stopniu dojrzałości (rozdziały 5.1.2 i 5.1.3), a także potencjał diagnostyczny metody w kontekście zarządzania jakością produktu końcowego (5.2).

5.1.2. Charakterystyka tekstury i właściwości elektrycznych wyrobów serowarskich przed soleniem

Analiza właściwości mechanicznych (Tabela 11) świeżo wyprodukowanego sera (S) i wyrobu seropodobnego (WS) dostarczyła informacji o ich odporności na różne formy obciążeń. W teście cięcia (F_c , D_c) wyrób seropodobny odznaczał się większą siłą potrzebną do przecięcia próbki, co sugeruje jego zwartą strukturę białkowo-tłuszczową, sprzyjającą mechanicznemu utrzymaniu kształtu. Ser wykazywał natomiast większe odkształcenie (D_c), co potwierdza jego większą podatność na deformację w trakcie obciążenia i wskazuje na bardziej „plastyczną”, mniej usieciowaną strukturę koloidalną.

Tabela 11. Parametry tekstury sera (S) i wyrobu seropodobnego (WS) przed soleniem.

Rodzaj testu	Parametr tekstury	S		WS	
		X	V [%]	X	V [%]
Cięcia	F_c [N]	5,56 ^a	9,21	6,19 ^a	12,12
	D_c [mm]	8,90 ^a	10,50	8,67 ^a	8,96
Przebijania	F_p [N]	3,88 ^a	8,81	3,50 ^a	18,07
	D_p [mm]	8,78 ^a	7,45	8,31 ^a	7,88
Ściskania	F_s [N]	18,94 ^a	31,24	22,81 ^a	29,74
	D_s [mm]	5,00 ^a	0,00	5,06 ^a	4,94

X – wartość średnia; V – współczynnik zmienności; F_c – maksymalna siła cięcia; F_p – maksymalna siła przebicia; F_s – maksymalna siła ściskania, D_s – odkształcenie przy F_s , D_c – odkształcenie przy F_c , D_p – odkształcenie przy F_p , ^{a-a} – brak istotnych różnic między S vs. WS.

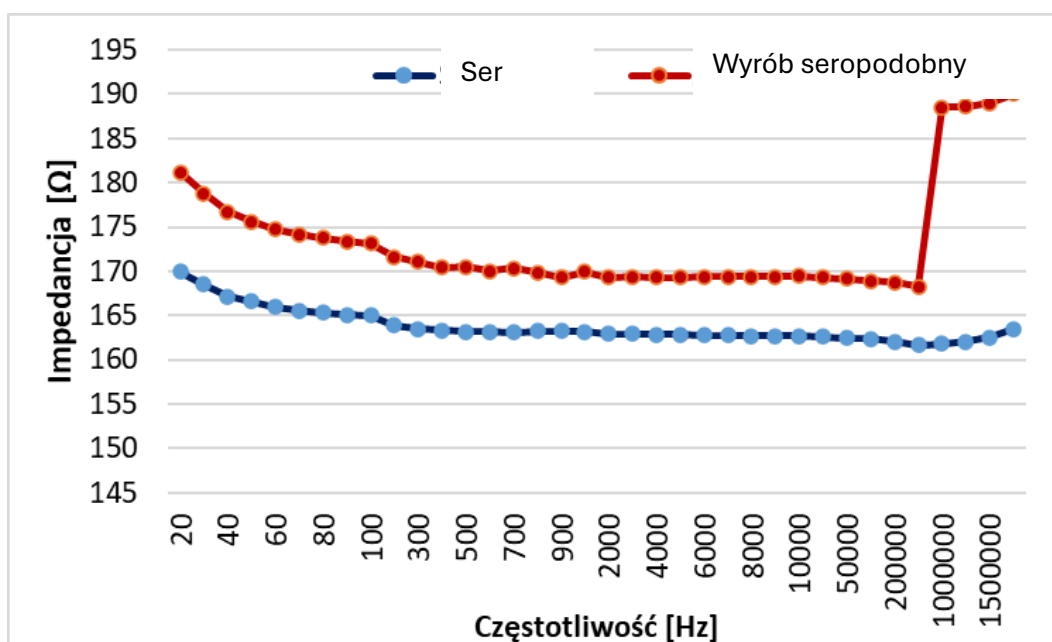
W teście przebijania ser odznaczał się wyższymi wartościami siły maksymalnej (F_p), a także większe odkształcenie (D_p), co świadczy o jego lepszej odporności lokalnej na działanie skoncentrowanego nacisku. Jednocześnie wyniki były bardziej powtarzalne w serze niż w wyrobie seropodobnym, gdzie odnotowano większą zmienność (tabela 11). Może to wskazywać na niejednorodny rozkład fazy tłuszczowej w WS, co jest zgodne z obserwacjami

dotyczącymi stabilności emulsji w produktach seropodobnych (Vrba i Vrba, 2013). Z punktu widzenia zarządzania jakością większa zmienność parametrów mechanicznych w WS może stanowić potencjalne źródło niezgodności w procesie produkcyjnym i wymagać ściślejszej kontroli warunków wytwarzania.

W teście ściskania to wyrób seropodobny wykazywał wyższą wartość siły ściskania (F_s), potwierdzając większą twardość i stabilność pod obciążeniem. Wartości odkształcenia (D_s) były bardzo zbliżone w obu próbkach (S, WS), co sugeruje podobną podatność na końcową kompresję. Należy jednak zaznaczyć, że ser cechował się większą zmiennością w tym zakresie, co potwierdza jego heterogeniczną strukturę i podatność na dalsze zmiany podczas dojrzewania (Żywica, 2010).

Podsumowując, wyniki wskazują, że WS charakteryzuje się większą zwartością i wyższymi wartościami sił maksymalnych (F_c , F_s), co sprzyja standaryzacji technologicznej i uzyskiwaniu powtarzalnych cech użytkowych produktu. Ser natomiast, pomimo niższej odporności mechanicznej, wykazywał większe odkształcenia (D_c , D_p) i stabilniejsze wyniki w przebijaniu (F_p). Zjawiska te są zgodne z doniesieniami literaturowymi dotyczącymi wpływu struktury koloidalnej na właściwości mechaniczne produktów mleczarskich (Jha i in., 2011; Wang i in., 2003). W kontekście zarządzania jakością można zatem uznać, że ser – jako produkt bardziej zmienny i podatny na deformacje – jest dobrym surowcem do dalszego kształtowania cech w procesie dojrzewania, podczas gdy wyrób seropodobny lepiej odpowiada wymaganiom powtarzalności produkcji przemysłowej.

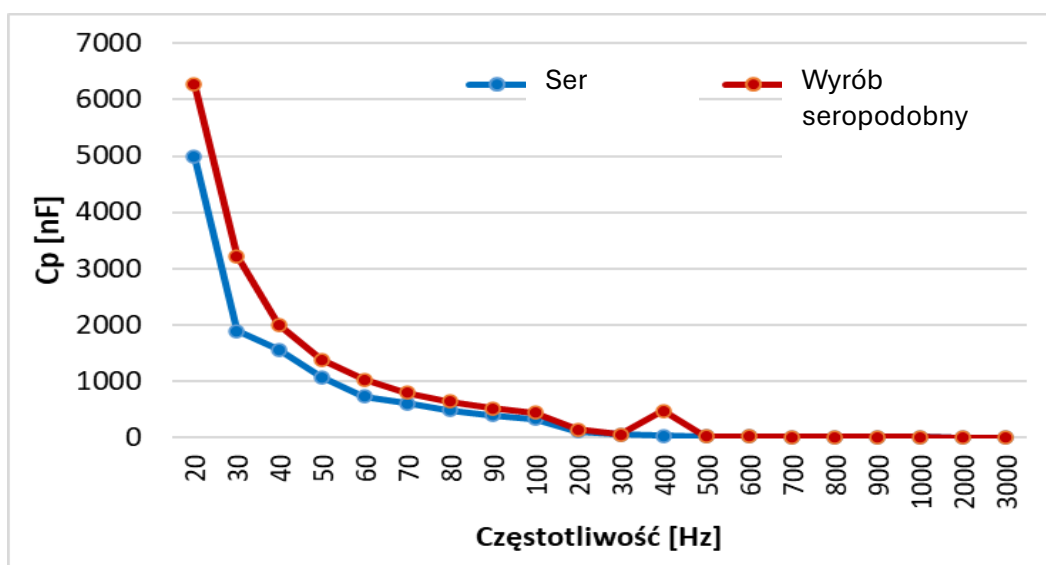
Wartości impedancji sera w zakresie częstotliwości (20 Hz – 1,5 MHz) były istotnie ($p < 0,01$) niższe niż w przypadku wyrobu seropodobnego. Świadczy to o większej przewodności elektrycznej sera, wynikającej z wyższego udziału składników jonowych i wody we frakcji rozpuszczalnej oraz bardziej złożonego układu koloidalnego białek i tłuszczu mlekowego (Rysunek 19). Różnice te są spójne z uzyskanymi wcześniej rezultatami dla mleka o różnym składzie tłuszczowym i stopniu przetworzenia, potwierdzając, że struktura lipidowo-białkowa istotnie kształtuje odpowiedź impedancyjną wyrobów serowarskich.



Rysunek 19. Zmiany wartości impedancji sera i wyrobu seropodobnego przed soleniem (surowych) w funkcji częstotliwości prądu pomiarowego.

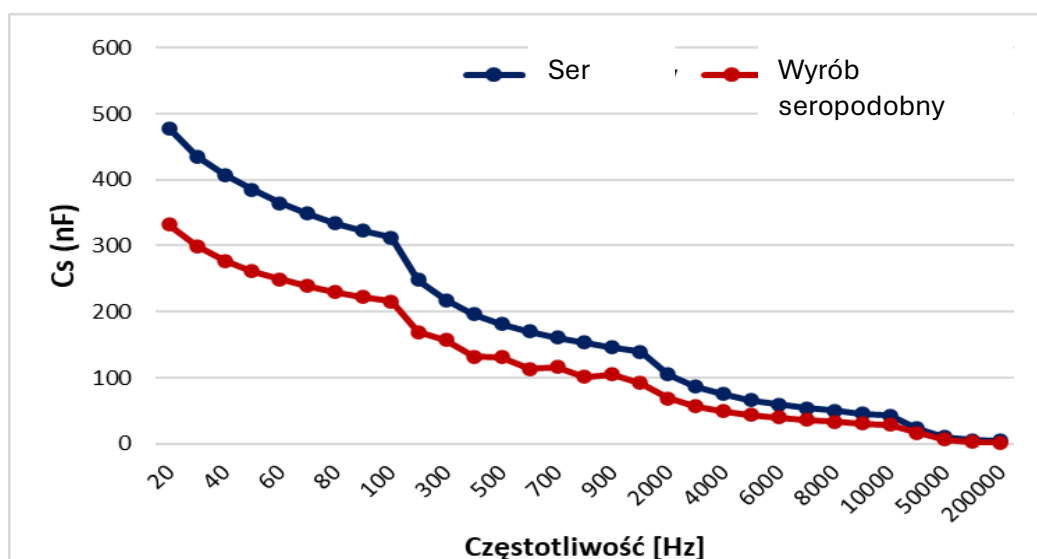
Powyżej 1 MHz w WS zaobserwowano gwałtowny wzrost wartości Z , niewystępujący w próbce S. Skok ten ma charakter punktowy i pojawia się na granicy zakresu pracy układu pomiarowego, co sugeruje raczej wpływ elementów układu pomiarowego (np. pojemności pasożytniczych, indukcyjności przewodów, możliwej zmiany zakresu pracy mostka impedancyjnego) niż rzeczywistą zmianę właściwości dielektrycznych badanego wyrobu seropodobnego (Rysunek 19). Z tego względu wartości Z rejestrowane powyżej 1 MHz należy traktować jako obarczone istotnym błędem instrumentalnym i wykorzystywać jedynie pomocniczo, natomiast zasadnicza interpretacja porównawcza opiera się na $f = 20 \text{ Hz} - 1 \text{ MHz}$.

Wyniki C_p wykazały największe różnice w zakresie niskich częstotliwości (20–200 Hz), gdzie wartości C_p dla wyrobu seropodobnego były wyraźnie wyższe niż dla sera (Rysunek 20). Wraz ze wzrostem częstotliwości różnice między próbkami malały, a powyżej ok. 300 Hz krzywe praktycznie się pokrywały. W przedziale 300–3000 Hz wartości C_p były niskie i charakteryzowały się zwiększoną zmiennością, co ogranicza możliwość jednoznacznej interpretacji (Rysunek 20). Zjawisko to może wynikać zarówno z ograniczeń zastosowanej dużej celi pomiarowej (CPD), jak i z większej wrażliwości pomiarów C_p na lokalne niejednorodności struktury świeżych wyrobów. W praktyce oznacza to, że C_p w zakresie niskich częstotliwości może służyć jako parametr różnicujący rodzaj produktu (S vs. WS), natomiast w wyższych częstotliwościach powinien być interpretowany ostrożnie.



Rysunek 20. Zmiany wartości pojemności równoległej (C_p) sera i wyrobu seropodobnego przed soleniem (surowych) w funkcji częstotliwości, $f = 20 - 3000$ Hz.

Analiza C_s potwierdziła systematyczny spadek wraz ze wzrostem częstotliwości (20 Hz – 200 kHz). W całym badanym zakresie C_s było wyższe w serze niż w WS – np. przy 20 Hz wynosiło odpowiednio 480 nF i 330 nF. Oznacza to większą zdolność matrycy białkowo-tłuszczowej sera do polaryzacji ładunków, wynikającą z obecności naturalnych kompleksów kazeinowo-tłuszczowych. W produkcie seropodobnym niższe wartości C_s wskazują na ograniczoną możliwość akumulacji ładunku w układzie z olejem palmowym (Rysunek 21).



Rysunek 21. Zmiany wartości pojemności elektrycznej szeregowej (C_s) sera i wyrobu seropodobnego przed soleniem (surowego) w funkcji częstotliwości, $f = 20$ Hz – 200 kHz.

Parametr C_s wydaje się zatem szczególnie użyteczny jako wskaźnik stopnia „mlekowego” charakteru produktu i potencjalne narzędzie wspomagające ocenę autentyczności wyrobów serowarskich.

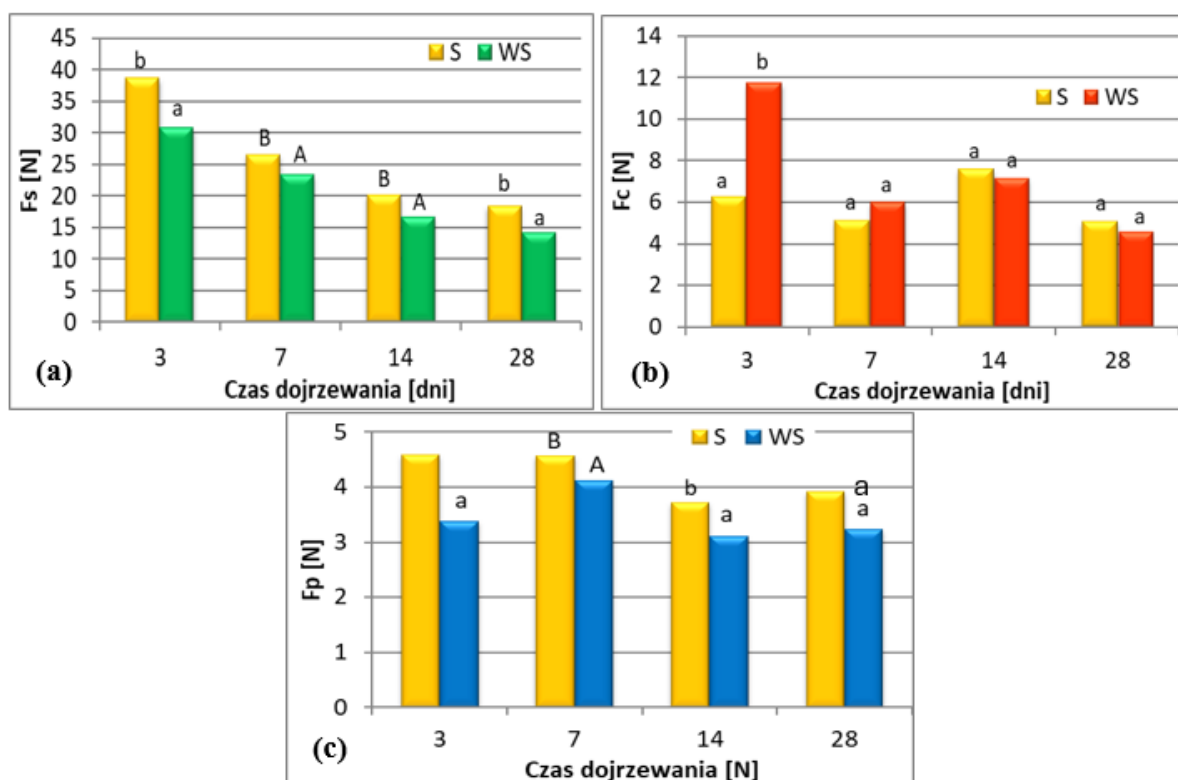
Uzyskane różnice w Z , C_p i C_s między serem a wyrobem seropodobnym są zgodne z doniesieniami literaturowymi. Jha i wsp. (2011) wskazują, że przewodność i przenikalność dielektryczna zależą głównie od frakcji wodnej i składu jonowego, natomiast obecność lipidów obniża wartości parametrów elektrycznych. Everard i wsp. (2015) oraz Wang i wsp. (2003) podkreślają, że zdolność do polaryzacji układów koloidalnych jest silnie związana z białkami i strukturą matrycy, co tłumaczy wyższe wartości C_s w serze. Z kolei niższe wartości w WS są typowe dla emulsji z dodatkiem tłuszczów roślinnych, charakteryzujących się odmiennymi właściwościami dielektrycznymi (Vrba i Vrba, 2013). Wyniki te potwierdzają przydatność pomiarów elektrycznych jako metody różnicowania produktów o zróżnicowanym składzie lipidowym oraz ich potencjał aplikacyjny w zarządzaniu jakością – zarówno na etapie weryfikacji surowca, jak i standaryzacji właściwości wyrobów gotowych.

Przeprowadzone w etapie I pomiary z wykorzystaniem czujnika CPD pozwoliły na wstępną ocenę czułości i powtarzalności układu, ale ujawniły również istotne ograniczenia jego konstrukcji. Zastosowanie dużej szczeliny między elektrodami umieszczonymi na krótszych ściankach zbiornika osłabiało efektywne pole elektryczne w próbce i sprzyjało powstawaniu obszarów o mniej reprezentatywnym rozkładzie linii pola, co – zgodnie z doniesieniami literaturowymi – prowadzi do obniżenia czułości układów impedancyjnych oraz zwiększenia wpływu zjawisk brzegowych i pojemności pasożytniczych (Barsoukov, Macdonald, 2005; Weng i in., 2020). W praktyce skutkowało to większą wrażliwością wyników na niewielkie różnice w ułożeniu i objętości próbki oraz ograniczoną zdolnością do rejestrowania subtelnych zmian strukturalnych towarzyszących dojrzewaniu. Z tego powodu w badaniach zasadniczych (etap II) zastosowano czujnik CPM, o mniejszej szczelinie i elektrodach umieszczonych na dłuższych ściankach zbiornika, co zwiększa powierzchnię styku między elektrodą a badaną próbką, wzmacnia natężenie pola elektrycznego w całej objętości materiału i pozwala ograniczyć wpływ efektów brzegowych, zgodnie z zaleceniami dotyczącymi konstrukcji czujników pojemnościowych do produktów mleczarskich (Banach i in., 2012; Żywica i in., 2012; Lau i in., 2020). Dzięki temu możliwe było uzyskanie bardziej powtarzalnych, czułych pomiarów przy mniejszej masie próbki, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia praktycznej użyteczności narzędzia w warunkach laboratoryjnych i potencjalnych zastosowań at-line.

5.1.3. Zmiany tekstury i właściwości elektrycznych serów oraz wyrobów seropodobnych w czasie dojrzewania

Wyniki pomiarów maksymalnej siły ściskania (F_s) wskazały na systematyczny spadek twardości obu produktów wraz z czasem dojrzewania (Rysunek 22 a). Początkowo (3 dzień) wartości dla sera Edamskiego wynosiły ok. 40 N, a dla wyrobu seropodobnego ok. 33 N. Po 28 dniach obniżyły się odpowiednio do ok. 18 N i 14 N. Świadczy to o stopniowym rozluźnianiu sieci kazeinowej w wyniku proteolizy i uwalniania frakcji rozpuszczalnych. Wyższe wartości dla sera, w porównaniu do wyrobów seropodobnych, w całym okresie dojrzewania, sugerują stabilizującą rolę naturalnego tłuszczu mlekowego i kompleksów kazeinowo-wapniowych.

Maksymalna siła cięcia (F_c) wykazywała inny charakter zmian (Rysunek 22 b). W 3 dniu dojrzewania wartości były wyraźnie wyższe dla analogu (~12 N) niż dla sera (~6 N), co może wskazywać na bardziej kruche i mniej spoiste wiązania w matrycy z udziałem oleju palmowego. Jednak w kolejnych tygodniach różnice ulegały zatarciu i po 28 dniach wartości dla obu produktów oscylowały wokół 4–5 N, przy czym obserwowane zmiany miały charakter niewielkich wahań, a nie prostego, liniowego spadku.



^{a-b} – wartości oznaczone małymi różnymi literami różnią się (S-WS) istotnie, $p < 0,01$

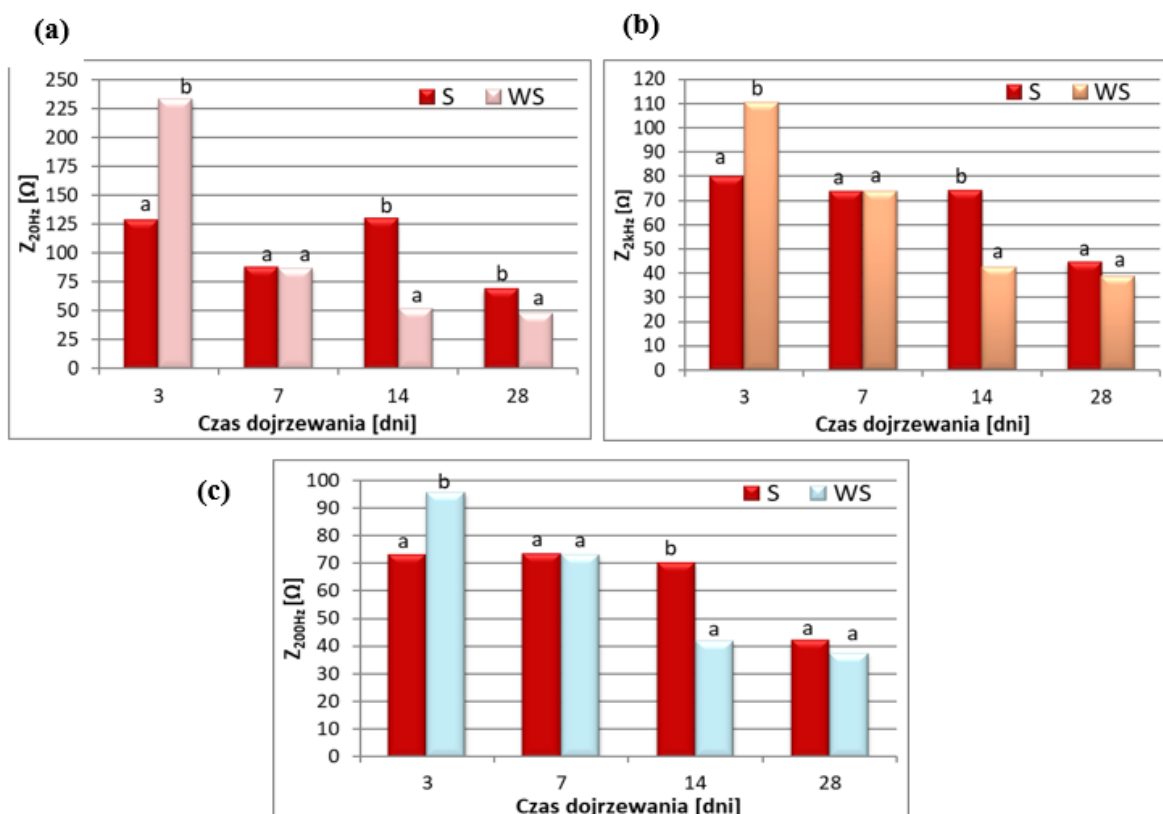
^{A-B} – wartości oznaczone dużymi różnymi literami różnią się (S-WS) istotnie, $p < 0,05$

^{a-a} – wartości oznaczone takimi samymi literami, nie różnią się istotnie

Rysunek 22. Zmiany parametrów tekstury sera (S) i wyrobów seropodobnych (WS) w czasie ich 28 dni dojrzewania: siły ściskania (F_s , a) siły cięcia (F_c , b) i siły przebijania (F_p , c)

W przypadku siły przebijania (F_p) obserwowano zróżnicowany przebieg zmian w trakcie dojrzewania (rys. 21c). W 3. i 7. dniu wartości F_p były istotnie wyższe dla sera (ok. 4,6–4,8 N) niż dla wyrobu seropodobnego (odpowiednio ok. 3,5 N i 4,0 N). W 14. dniu u obu produktów nastąpiło obniżenie F_p , przy czym różnice między nimi nadal pozostawały istotne statystycznie ($S > WS$). Dopiero po 28 dniach dojrzewania wartości F_p dla sera i wyrobu seropodobnego były podobne i nie różniły się istotnie, co wskazuje na stopniowe wyrównywanie odporności lokalnej na przebijanie niezależnie od rodzaju zastosowanego tłuszczu. Zaobserwowane zmiany są zgodne z typowym przebiegiem dojrzewania serów – degradacja białek i modyfikacja układów koloidalnych prowadzą do obniżenia sił mechanicznych (Everard, 2015; Żywica, 2010). Wyższa twardość i spójność sera może wynikać z obecności naturalnych kompleksów kazeinowo-wapniowych, utrudniających rozluźnienie sieci białkowej, w przeciwieństwie do emulsji roślinnych, gdzie matryca tłuszczowa nie wiąże się trwale z białkami (Jha, 2011; Vrba i Vrba, 2013).

Analiza impedancji (Z) wykazała systematyczne zmniejszanie się wartości tego parametru w trakcie dojrzewania, zarówno w serze (S), jak i w wyrobie seropodobnym (WS), niezależnie od częstotliwości pomiarowej (Rysunek 23a,b,c).



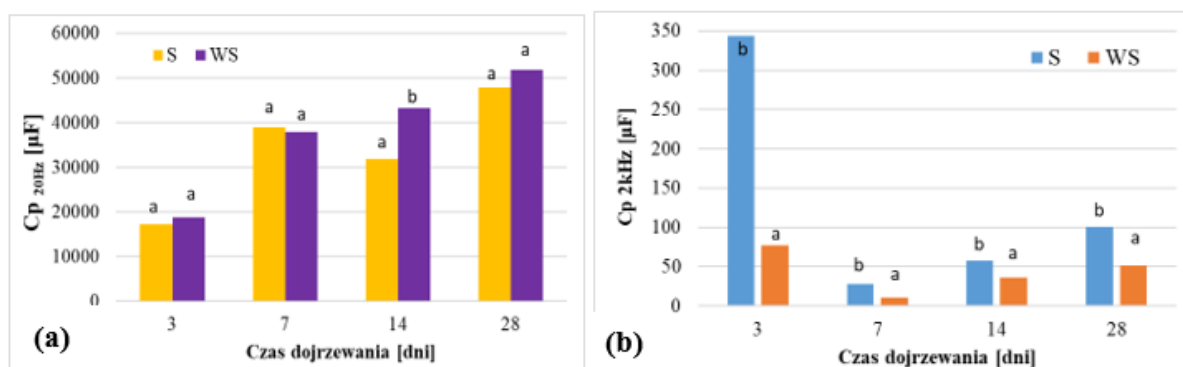
a-b – wartości oznaczone małymi różnymi literami różnią się ($S-WS$) istotnie, $p < 0,01$

a-a – wartości oznaczone takimi samymi literami, nie różnią się istotnie

Rysunek 23. Zmiany wartości impedancji (Z) sera (S) i wyrobów seropodobnych (WS) w czasie dojrzewania, zmierzonej przy $f=20\text{Hz}$ (a) 2 kHz (b) i 200 kHz (c)

Przy 20 Hz początkowa wartość Z była istotnie wyższa ($p < 0,01$) w WS ($\sim 225 \Omega$) niż w serze ($\sim 125 \Omega$), lecz po 28 dniach obniżyła się odpowiednio do ~ 70 i 50Ω . Podobne trendy zaobserwowano przy 2 kHz i 200 kHz (Rysunek 23b,c), choć różnice między produktami były mniej wyraźne. Spadek Z świadczy o wzroście przewodnictwa jonowego w wyniku proteolizy i uwalniania związków rozpuszczalnych.

Wartości C_p przy 20 Hz (Rysunek 24) istotnie wzrastały w obu produktach w miarę dojrzewania, co wskazuje na zwiększającą się zdolność układu do polaryzacji, związanej z akumulacją frakcji jonowych i wzrostem mobilności dipoli w sieci białkowej. Z kolei C_p przy 2 kHz (Rys.23b) wykazało gwałtowny spadek między 3 a 7 dniem dojrzewania, szczególnie w serze (z $\sim 320 \mu F$ do $< 50 \mu F$), a następnie stabilizację na niskim poziomie w obu produktach. Oznacza to, że przy wyższych częstotliwościach dominują mechanizmy polaryzacji międzyfazowej, a różnice wynikające z rodzaju tłuszczu ulegają zatarciu.



a-b – wartości oznaczone małymi różnymi literami różnią się (S-WS) istotnie, $p < 0,01$

a-a – wartości oznaczone takimi samymi literami, nie różnią się istotnie

Rysunek 24. Zmiany wartości równoległej pojemności elektrycznej (C_p) sera (S) i wyrobów seropodobnych (WS) w czasie dojrzewania, zmierzonej przy $f=20\text{Hz}$ (a) i 2 kHz (b)

W pomiarach C_s i C_p powyżej 2 kHz (Rysunek 24 b) wartości okazały się bardzo zmienne, a niekiedy przyjmowały nawet wartości ujemne, co wskazuje na występowanie zakłóceń sygnału oraz artefaktów fazowych typowych dla pomiarów materiałów biologicznych przy niewystarczającej powierzchni elektrod. Takie zjawisko świadczy, że zastosowana duża cewa pomiarowa, wyposażona w elektrody o małej powierzchni czynnej, nie sprawdziła się w tym zakresie częstotliwości. W tej konfiguracji zwiększa się udział efektów brzegowych na styku elektroda–próbka oraz trudności w utrzymaniu stabilnego kontaktu, co prowadzi do niestabilności rejestrowanych wartości.

Zastosowanie elektrod o większej powierzchni mogłoby znacząco poprawić jakość pomiarów, ponieważ zmniejsza opór kontaktowy, redukuje wpływ ubocznych pojemności i zapewnia bardziej równomierny rozkład pola elektrycznego w próbce. Według Barsoukov

i Macdonald (2005) geometria elektrod ma kluczowe znaczenie przy analizie materiałów biologicznych, a zbyt mała powierzchnia prowadzi do zafałszowania wyników. Podobnie Weng (2020) podkreślają, że w żywności o złożonej strukturze koloidalnej małe elektrody potęgują efekty brzegowe i utrudniają rejestrację rzeczywistych zmian dielektrycznych. Dlatego problemy obserwowane przy wyższych częstotliwościach wynikają nie tylko z natury samych produktów (dyspersja dielektryczna, relaksacje dipolowe), lecz także z ograniczeń konstrukcyjnych zastosowanego układu pomiarowego.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że w trakcie dojrzewania zarówno ser, jak i wyrób seropodobny ulegają zmiękczeniu (zmniejszenie F_s , F_c i F_p) oraz wykazują stopniowy wzrost przewodnictwa jonowego (najlepiej widoczny przy 20 Hz). Ser cechował się większą twardością i stabilnością struktury, podczas gdy wyrób seropodobny z dodatkiem oleju palmowego osiągał niższe wartości mechaniczne i odmienny profil zmian pojemnościowych. Parametry elektryczne, szczególnie Z i C_p rejestrowane przy niskich częstotliwościach, mogą zatem stanowić użyteczne, nieniszczące wskaźniki przebiegu dojrzewania i jakości sera. Natomiast ograniczona powtarzalność pomiarów pojemnościowych przy wyższych częstotliwościach wskazuje na konieczność stosowania czujników o zmodyfikowanej geometrii (większa powierzchnia elektrod, mniejsza objętość próbki), co zostało uwzględnione w etapie II badań.

5.2. Badania zasadnicze – etap II

W badaniach zasadniczych wykorzystano czujnik CPM, którego zastosowanie było konsekwencją wyników etapu I wskazujących na konieczność poprawy powtarzalności i stabilności sygnału pomiarowego.

5.2.1. Zmiany parametrów jakościowych serów i wyrobów seropodobnych w czasie dojrzewania

Wyniki pomiarów i analiz parametrów fizykochemicznych (składu chemicznego i właściwości fizykochemicznych) w serach typu holenderskiego oraz w wyrobach seropodobnych (Tabela 12) pozwoliły na ocenę zmian zachodzących podczas 28-dniowego dojrzewania oraz jakości produktów końcowych. Parametry te stanowią punkt odniesienia dla dalszej analizy właściwości elektrycznych jako potencjalnych, nieniszczących wskaźników jakości i dojrzałości.

➤ Skład chemiczny

Skład chemiczny serów (S) oraz wyrobów seropodobnych (WS) pozostawał stosunkowo stabilny w czasie 28 dni dojrzewania. Zawartość białka i tłuszczu w WS była nieznacznie

wyższa niż w serach, lecz różnice te nie miały charakteru istotnych zmian dynamicznych. W obu produktach wartości te utrzymywały się na względnie stałym poziomie, co wskazuje na brak intensywnych przemian w zakresie podstawowych składników odżywczych. Odnotowano podobne wartości suchej masy, przy czym najniższe poziomy, zgodnie z założeniami technologicznymi, występowały w świeżo wyprodukowanych próbkach (surowych – przed soleniem).

W przypadku makroelementów (Ca, P) ich zawartość pozostawała względnie stała w całym okresie badawczym. Stosunek wapnia do fosforu już w pierwszym tygodniu dojrzewania kształtował się na poziomie ok. 3:1, co jest zgodne z danymi literaturowymi wskazującymi na stabilność tych składników mineralnych w czasie dojrzewania serów (Tilocca, 2020). Warto podkreślić, że analizowane produkty – niezależnie od wariantu – stanowiły bardzo dobre źródło wapnia, którego zawartość wynosiła powyżej 100 mg/100 g produktu. Jest to wartość istotna żywieniowo, potwierdzająca wysoką gęstość mineralną serów typu holenderskiego. Co istotne, substytucja tłuszczu w wyrobach seropodobnych nie wpłynęła znacząco na poziom Ca i P, co może sugerować, że modyfikacje w składzie tłuszczowym nie zaburzają wiązania i retencji makroelementów w matrycy białkowej. W obu grupach produktów stwierdzono jedynie niewielkie wahania zawartości Ca i P w czasie dojrzewania, co jest typowe dla serów podpuszczkowych i potwierdza wysoką stabilność frakcji mineralnej. Wyroby seropodobne pod kątem zawartości Ca i P były porównywalne do sera tradycyjnego, co dodatkowo potwierdza, że struktura białkowo-mineralna tych produktów pozostaje stosunkowo odporna na modyfikacje związane z obecnością tłuszczów roślinnych.

Zawartość soli w próbkach odzwierciedlała przede wszystkim przebieg procesu solenia prowadzonego w solance w ciągu pierwszej doby po wyprodukowaniu sera, a następnie stopniowe wyrównywanie się stężeń NaCl wewnątrz bloku sera w czasie dojrzewania, co jest zgodne z opisanym w literaturze modelem dyfuzji soli w serach podpuszczkowych (Fox i in., 2017; O’Callaghan, O’Sullivan, 2023). Już w pierwszym oznaczeniu po zakończeniu solenia stwierdzono, że sery charakteryzowały się nieco wyższym poziomem NaCl niż WS, co wskazuje na szybszą penetrację soli w matrycy białkowej serów w porównaniu z produktami o zmodyfikowanej fazie tłuszczowej, co pozostaje spójne z doniesieniami dotyczącymi wpływu zastąpienia tłuszczu mlecznego tłuszczem roślinnym na mikrostrukturę i transport składników małocząsteczkowych w serach analogowych (Giha i in., 2021; Kavak, Karabiyik, 2019). W kolejnych dniach dojrzewania nie obserwowano jednak wyraźnego, jednoznacznego trendu wzrostowego ani spadkowego zawartości soli; rejestrowane różnice miały charakter niewielkich wahań mieszczących się w zakresie zmienności technologicznej i błędu oznaczeń.

Może to świadczyć o tym, że po zakończeniu solenia zachodził głównie proces wewnętrznej redystrybucji NaCl, silnie uwarunkowany lokalnymi różnicami w porowatości i stopniu uwodnienia matrycy białkowej, a nie dalsza, systematyczna akumulacja soli w produkcie (Everard i in., 2015; McSweeney, 2004; ISO 5943:2006).

➤ *Parametry technologiczne*

Wartość aktywności wody (a_w) w serze i w wyrobie seropodobnym utrzymywała się w zakresie 0,95–0,98 i nie wykazywała istotnych wahań w całym okresie badań. Stabilność a_w ma kluczowe znaczenie technologiczne, ponieważ determinuje tempo procesów mikrobiologicznych i biochemicznych zachodzących w czasie dojrzewania oraz wpływa na bezpieczeństwo mikrobiologiczne produktów (Gurtler, 2014). Utrzymanie a_w na względnie stałym poziomie świadczy o prawidłowo dobranych warunkach dojrzewania i ogranicza ryzyko niekontrolowanego rozwoju mikroflory niepożądaney. Brak istotnych zmian należy uznać za korzystny z punktu widzenia technologicznego.

Znaczące różnice zaobserwowano w zakresie kwasowości czynnej (pH). W początkowej fazie dojrzewania (do 3. dnia) wartości pH wynosiły średnio 5,26–5,30 w serach i 5,28–5,36 w wyrobach seropodobnych, a następnie stabilizowały się na tym poziomie do końca okresu badawczego. Utrzymujący się zakres kwasowości świadczy o prawidłowym przebiegu fermentacji mlekowej i zgodny jest z wynikami opisanymi przez Amarita (2001). Dynamika zmian pH w serach dojrzewających pozostaje w ścisłym związku z fermentacją laktozy i aktywnością mikroflory wtórnej. W pierwszych dniach dojrzewania fermentacja prowadzi do obniżenia pH wskutek akumulacji kwasu mlekowego, co inicjuje dalsze przemiany fizykochemiczne – tworzenie skrzepu, synerezę, dyfuzję NaCl, autolizę kultur starterowych oraz rozwój mikroflory wtórnej (Amarita, 2001). Istotnym następstwem zmniejszenia pH jest odpapnienie parakazeinianu wapnia, wynikające z reakcji kwasu mlekowego z jonami wapnia kompleksu kazeinowego. Zjawisko to, opisane przez O'Mahony (2005), prowadzi do modyfikacji struktury sieci białkowej i wpływa na właściwości reologiczne produktów – jędrność skrzepu, elastyczność i kruchość mięszu. Stabilność pH w kolejnych etapach dojrzewania potwierdza prawidłowy przebieg procesu i wskazuje, że produkty osiągnęły odpowiednie parametry technologiczne.

Tabela 12. Skład chemiczny, aktywność wody (a_w) i pH sera typu holenderskiego i wyrobów seropodobnych w czasie 28 dni dojrzewania.

Skład chemiczny / Czas [dni]	Ser dojrzewający																	
	Białko [%]		Tłuszcz [%]		Woda [%]		Sucha masa [%]		Sól [%]		Wapń [mg]		Fosfor [mg]		a_w		pH	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
Przed soleniem	25,80a	0,13	26,55a	0,16	44,86c	0,62	55,27c	0,40	1,03bd	0,02	-	-	-	-	0,98c	0,01	-	-
1	26,04a	0,07	26,79a	0,02	42,87ab	0,27	57,13ab	0,27	1,70bc	0,15	11612,20a	794,96	3555,39b	509,03	0,97bc	0,01	-	-
3	25,90a	0,02	26,52a	0,04	42,80ab	0,11	57,19ab	0,16	1,58a	0,18	11830,70a	563,54	3567,09b	510,27	0,96b	0,19	5,26a	0,01
7	25,99a	0,01	26,60a	0,05	42,54b	0,27	57,47b	0,19	1,58a	0,41	11189,36a	610,60	4171,42a	806,71	0,97b	0,41	5,29b	0,01
14	25,34b	0,24	26,08b	0,36	43,22a	0,25	56,78a	0,25	1,80c	0,11	10999,83b	601,12	3636,05b	389,28	0,95a	0,00	5,29b	0,01
28	25,08b	0,51	26,09b	0,03	43,27	0,51	56,89a	0,23	1,61a	0,07	9717,46b	838,33	3496,42b	481,54	0,95a	0,00	5,30c	0,00
Przed soleniem	Wyrób seropodobny																	
	Białko [%]		Tłuszcz [%]		Woda [%]		Sucha masa [%]		Sól [%]		Wapń [mg]		Fosfor [mg]		a_w		pH	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
Przed soleniem	26,35ac	0,12	27,90b	0,36	44,75c	0,44	55,25b	0,44	0,98d	0,01	-	-	-	-	0,98d	0,00	-	-
1	26,72d	0,12	27,77ab	0,12	43,06a	0,49	56,94a	0,49	1,29e	0,08	11539,89a	780,75	3282,93a	60,03	0,97b	0,00	-	-
3	26,48a	0,01	27,58ad	0,13	42,35b	0,20	57,55c	0,08	1,63ab	0,71	11530,17a	780,09	3281,83a	41,02	0,96c	0,85	5,28a	0,00
7	26,10b	0,14	27,13c	0,30	43,44a	0,24	56,56a	0,24	1,73c	0,06	10217,54b	477,62	3588,76b	264,83	0,96ab	0,00	5,29b	0,01
14	26,52a	0,26	27,76ab	0,15	43,07a	0,37	56,94a	0,35	1,54a	0,09	10826,05bc	186,56	3287,32a	65,32	0,96a	0,00	5,28a	0,01
28	26,24bc	0,09	27,44cd	0,37	43,18a	0,31	56,82a	0,31	1,68bc	0,04	11233,04ac	459,97	3253,29a	35,20	0,97ab	0,01	5,36c	0,00

Tabela 13. Istotność różnic między S-WS w czasie 28 dni dojrzewania

	Białko	Tłuszcz	Woda	SM	Sól	Wapń	Fosfor	a_w	pH
Przed soleniem	**	**	NS	NS	**	-	-	**	-
1	**	**	NS	NS	**	NS	NS	NS	-
3	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	**	**
7	NS	**	**	**	**	**	NS	NS	NS
14	**	**	NS	NS	**	NS	NS	**	**
28	**	**	NS	NS	NS	**	NS	**	**

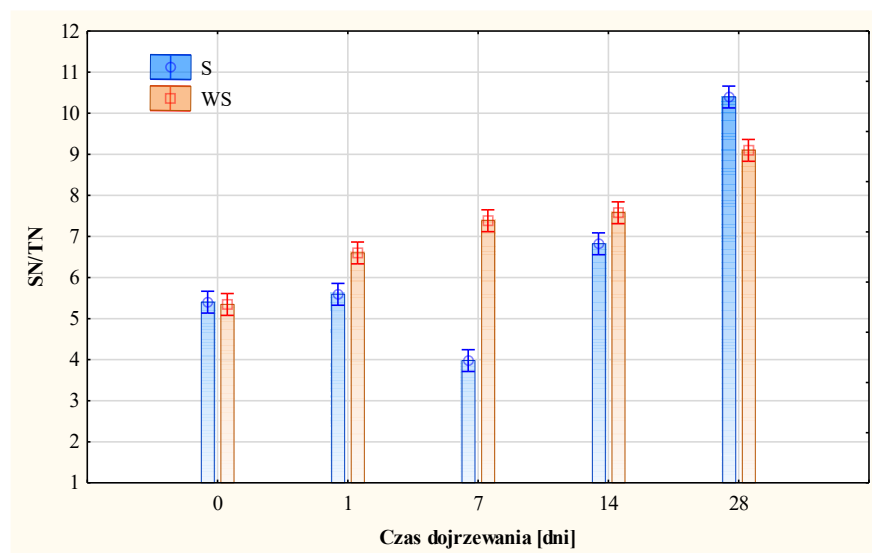
** - $p < 0.01$, * - $p < 0,05$, NS – brak istotnych różnic

Podsumowując, w okresie 28 dni dojrzewania kluczowe znaczenie dla jakości serów i wyrobów seropodobnych miały: wyrównywanie stężenia soli po zakończonym procesie solenia oraz dynamika zmian kwasowości czynnej, powiązane z aktywnością mikroflory fermentacyjnej (Amarita, 2001; McSweeney, Sousa, 2000). Nie obserwowano dalszego, istotnego „tempa zasolenia” w trakcie dojrzewania, ponieważ zasadnicza absorpcja NaCl zachodziła w pierwszej dobie solenia, a późniejsze zmiany dotyczyły przede wszystkim wewnętrznej dyfuzji i redystrybucji soli w głąb struktury sera, zgodnie z mechanizmem opisanym dla serów półtwardych (McSweeney, Sousa, 2000). Parametry składu chemicznego, takie jak zawartość białka, tłuszczu, suchej masy i makroelementów, pozostawały natomiast stabilne, co potwierdza ograniczoną przydatność wyłącznie składu chemicznego jako kryterium jednoznacznej identyfikacji i oceny stopnia dojrzałości produktów (Tilocca, 2020). W perspektywie zarządzania jakością uzasadnia to potrzebę wykorzystania dodatkowych, bardziej czułych wskaźników – w tym parametrów elektrycznych – do różnicowania serów i wyrobów seropodobnych o zbliżonym składzie deklarowanym.

➤ *Związki azotowe (rozpuszczalne i nie rozpuszczalne)*

Monitorowanie przemian białkowych umożliwia ocenę jakości serów oraz określenie stopnia proteolizy – od degradacji parakazeiny do uwalniania peptydów i wolnych aminokwasów (Treszczyńska i Żulewska, 2016). Dlatego w badaniach oznaczono zawartość różnych frakcji związków azotowych i ich udział w azocie ogółem.

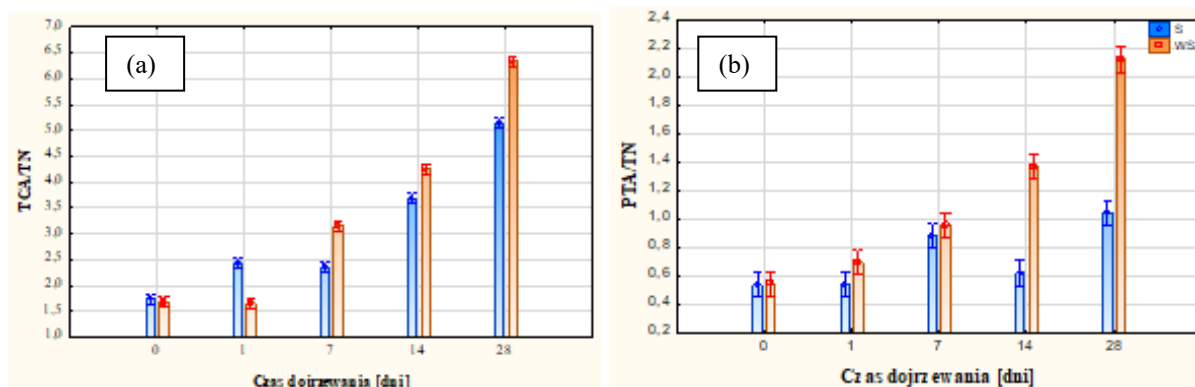
Stosunek azotu rozpuszczalnego do azotu ogólnego (SN/TN) jest uznawany za podstawowy wskaźnik dojrzałości sera i służy porównaniu intensywności proteolizy (Pereira, 2008). W przeprowadzonych badaniach wartości SN/TN systematycznie wzrastały zarówno w serze (S), jak i w wyrobie seropodobnym (WS), co jednoznacznie potwierdza postęp proteolizy w ciągu 28 dni dojrzewania (Rysunek 25). W pierwszych punktach pomiarowych produkty wykazywały zbliżony poziom SN/TN, w kolejnych dniach dojrzewania produktów wartości SN/TN były wyższe w wyrobie seropodobnym. Oznacza to, że początkowo szybsza degradacja białek zachodziła w WS, co mogło wynikać z aktywności enzymów endogennych i wtórnej autolizy kultur starterowych. Po 28 dniach dojrzewania ser osiągnął znacznie wyższy poziom SN/TN niż WS (ok. 10,8 vs 9,0), co potwierdza bardziej zaawansowaną proteolizę w późniejszej fazie dojrzewania produktu mlecznego. Podwyższone wartości SN na starcie mogą być związane z aktywnością endogennych enzymów mleka, resztkowym działaniem koagulantu lub aktywnością mikroflory (Priyashantha i Lundh, 2021).



Rysunek 25. Zmiany proporcji SN/TN w serze (S) i wyrobach seropodobnych (WS) w czasie ich dojrzewania.

Wysokie wartości SN/TN wskazują na długi lub intensywny proces dojrzewania, jednak zależność między poziomem SN/TN a pH nie została jednoznacznie potwierdzona. W przypadku sera niższe wartości pH nie korelowały z wyższymi wartościami SN/TN, choć teoretycznie sprzyjają one aktywności chymozyny wobec kazeiny αS_1 (Hayaloglu, 2013).

Drugim wskaźnikiem była zawartość azotu rozpuszczalnego w 12% trichlorooctanie (%TCA-SN/TN). W dniu 0 wartości TCA-SN/TN były niemal identyczne w S i WS (ok. 1,3–1,4%), co potwierdza, że produkty nie różniły się w tym zakresie na starcie dojrzewania (Rysunek 26a,b). Już w 7. dniu wartości TCA-SN/TN w WS zaczęły rosnąć szybciej niż w serze, a przewaga ta utrzymywała się również w 14. i 28. dniu dojrzewania. Wynik ten wskazuje na większą aktywność bakteryjnych proteinaz i peptydaz w wyrobie seropodobnym, które odpowiadają za powstawanie niskocząsteczkowych peptydów wytrączanych przez TCA (McSweeney, 2004).



Rysunek 26. Zmiany stosunku TCA/TN (a) i PTA/TN (b) w serze i wyrobach seropodobnych w czasie ich dojrzewania

Analiza udziału azotu aminokwasowego (%PTA/TN, rozpuszczalnego w 5% kwasie fosforowolframowym) dostarczyła dodatkowych informacji o zaawansowaniu proteolizy wtórnej. W całym okresie dojrzewania wartości PTA/TN były istotnie wyższe w WS niż w serze (Rysunek 26). Różnice te były niewielkie w pierwszych dniach, jednak od 14. dnia stawały się wyraźne, a w 28. dniu osiągnęły maksimum (ok. 2,1% dla WS wobec ok. 1,3% dla sera). Wyniki wskazują, że wyrób seropodobny szybciej gromadzi wolne aminokwasy, co odzwierciedla intensywne działanie peptydaz i odmienną strukturę matrycy białkowej, sprzyjającą hydrolizie białek. Treszczyńska i Żulewska (2016) uzyskali wartości TCA-SN/TN w przedziale 5,83–19,52% oraz PTA/TN 0,15–1,34%, nie wykazując bezpośredniej zależności od zawartości tłuszczu. Caboni (2019) wskazuje, że chromatografia GC-MS dostarcza bardziej precyzyjnych informacji o proteolizie niż wskaźniki SN/TN czy TCA-SN/TN, szczególnie przy analizie mleka poddanego termizacji.

Należy podkreślić, że tempo proteolizy zależy od wielu czynników, m.in. składu kultur starterowych, aktywności enzymów koagulujących, enzymów endogennych mleka oraz obecności enzymów egzogennych (Cichosz, Konopka i Zalecka, 2005; Barac, 2019).

Analiza statystyczna potwierdziła istotne różnice ($p < 0,01$) między serami a wyrobami seropodobnymi w zakresie SN/TN i TCA-SN/TN w większości punktów czasowych. W przypadku PTA/TN różnice istotne pojawiły się od 14. dnia dojrzewania, osiągając największą skalę w 28. dniu.

➤ *Parametry tekstury*

Otrzymane wyniki pomiarów tekstury serów typu holenderskiego i wyrobów seropodobnych w trakcie 28 dni dojrzewania wykazały podobne ogólne tendencje zmian, jednak wartości bezwzględne oraz tempo zmian były istotnie różne między badanymi grupami (Tabela 14).

Twardość serów wzrastała z poziomu 103 N (dzień 0) do 160 N w 7. dniu, po czym obniżyła się do ok. 110 N po 28 dniach. W wyrobach seropodobnych wartości były istotnie wyższe – od 142 N (dzień 0) do 217 N w 1. dniu, a następnie stabilizowały się w zakresie 149–164 N. Wyższa twardość WS wynika z odmiennej struktury białkowo-tłuszczowej oraz ograniczonej intensywności proteolizy, co jest zgodne z wcześniejszymi obserwacjami dotyczącymi produktów z dodatkiem tłuszczów roślinnych. Analiza statystyczna (Tabela 16) potwierdziła istotne różnice ($p < 0,01$) między produktami w większości dni dojrzewania, z wyjątkiem 7. dnia, kiedy wartości czasowo się zbliżyły (Tabela 14).

Tabela 14. Zmiany wartości ($\bar{x} \pm SD$) parametrów tekstury serów w czasie 28 dni dojrzewania

SER	Twardość [N]		Przyczepność [mJ]		Sprężystość [-]		Spójność [-]		Gumowatość [N]		Żujność [N]		Elastyczność [-]	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
Przed soleniem	103a	11	-50d	33	0,910a	0,018	0,821a	0,029	84a	9	77a	8	0,387b	0,014
1	143b	25	-221bc	206	0,910a	0,019	0,804a	0,007	115b	20	104b	17	0,377ab	0,014
3	114a	13	-82cd	70	0,903a	0,015	0,806a	0,007	92a	10	83a	9	0,378ab	0,012
7	160c	20	-316ab	303	0,930b	0,021	0,813a	0,046	130c	19	121c	19	0,346a	0,018
14	113a	16	-414a	362	0,901a	0,025	0,771b	0,025	87a	12	79a	11	0,328d	0,028
28	110a	10	-470a	450	0,902a	0,016	0,766b	0,023	84a	7	76a	7	0,305c	0,016

Tabela 15. Zmiany wartości ($\bar{x} \pm SD$) parametrów tekstury wyrobów seropodobnych w czasie 28 dni dojrzewania

WYRÓB	Twardość [N]		Przyczepność		Sprężystość [-]		Spójność [-]		Gumowatość [N]		Żujność [N]		Elastyczność [-]	
	Śr.	SD	Śr.	SD	Śr.	SD	Śr.	SD	Śr.	SD	Śr.	SD	Śr.	SD
Przed soleniem	142b	31	-256a	230	0,918a	0,027	0,838d	0,014	119ab	25	109ab	24	0,396e	0,022
1	217c	42	-302a	202	0,945a	0,030	0,789ab	0,050	170c	28	155c	24	0,368b	0,036
3	163a	21	-224a	215	0,922a	0,008	0,798b	0,023	130b	17	120b	15	0,359ab	0,019
7	149ab	34	-622ab	939	0,921a	0,018	0,787ab	0,023	117a	22	108ab	21	0,346a	0,018
14	164a	24	-908b	1375	0,915a	0,018	0,770ac	0,050	126ab	17	115a	16	0,328d	0,028
28	157ab	19	-925b	1012	0,915a	0,015	0,762c	0,019	119ab	13	109ab	12	0,305c	0,016

Tabela 16. Istotność różnic (p) między parametrami tekstury sera i wyrobu seropodobnego w czasie dojrzewania

Dzień	Twardość	Przyczepność	Sprężystość	Spójność	Gumowatość	Żujność	Elastyczność
Przed soleniem	**	**	NS	NS	**	**	NS
1	**	NS	NS	NS	**	**	NS
3	**	**	**	NS	**	**	**
7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**
14	**	NS	**	NS	**	**	NS
28	**	**	**	NS	**	**	NS

*- istotne różnice, $p < 0,05$; **- istotne różnice, $p < 0,01$; NS - brak istotnych różnic

Sery charakteryzowały się wyraźnym wzrostem adhezji próbek w trakcie dojrzewania. Wartość przyczepności obniżała się od –50 g w dniu 0 do –470 g w dniu 28. W wyrobach seropodobnych zmiany były jednak znacznie większe — od –256 g do –925 g — przy czym minimalną wartość odnotowano już w 14. dniu. Wyniki te wskazują, że WS były bardziej podatne na zmiany lepkości powierzchniowej, co może wynikać z odmiennych właściwości fazy tłuszczowej. Istotne różnice statystyczne między produktami stwierdzono w dniach 0, 3 i 28. Spójność w serach zmniejszała się stopniowo z 0,821 do 0,766, jak i w WS z 0,838 do 0,762. Spadek ten odzwierciedla degradację kazeiny i wzrost frakcji azotowych rozpuszczalnych, uznawanych za wskaźniki dojrzałości sera (McSweeney i Sousa, 2000). Analiza statystyczna nie wykazała istotnych różnic między grupami w całym okresie badań. Sprężystość obniżała się nieznacznie – w serach z 0,910 do 0,902, a w WS z 0,918 do 0,915. Choć zmiany te były niewielkie, ich kierunek potwierdza stopniowe rozluźnianie struktury białkowej. Różnice między grupami były istotne statystycznie w dniach 3, 14 i 28 ($p < 0,01$). W zakresie gumowatości i żujności w obu grupach produktów odnotowano podobny trend: wyraźny wzrost w pierwszym tygodniu dojrzewania, a następnie spadek. W serach gumowatość zwiększyła się z 84 (dzień 0) do 130 (dzień 7), a następnie spadła do 84 (dzień 28). Żujność zmieniała się analogicznie – od 77 (dzień 0) do 121 (dzień 7), a po 28 dniach wynosiła 76. W wyrobach seropodobnych wartości były istotnie wyższe – gumowatość osiągnęła 170 w 1. dniu, stabilizując się później na poziomie 117–130, podczas gdy żujność wahała się od 109 do 155. Różnice między S i WS były statystycznie istotne w większości punktów czasowych ($p < 0,01$). Elastyczność różnicowała produkty od 7. dnia dojrzewania ($p < 0,01$), kiedy wartości były wyraźnie wyższe w serze. Wynik ten wskazuje, że naturalny tłuszcz mleczny oraz postępująca proteoliza sprzyjały utrzymaniu bardziej elastycznej struktury. Zaobserwowane przejściowe zwiększenie gumowatości i żujności w początkowych dniach dojrzewania można wiązać z reorganizacją sieci kazeinowej po soleniu, natomiast ich późniejszy spadek – z intensyfikacją proteolizy i stopniowym osłabieniem struktury (Sousa, Ardö i McSweeney, 2001). Elastyczność obu produktów ulegała stopniowej redukcji. W serach obniżyła się z 0,387 (dzień 0) do 0,305 (dzień 28), natomiast w wyrobach seropodobnych z 0,396 do 0,305. Spadek elastyczności świadczy o zmniejszonej zdolności próbek do odkształceń odwracalnych, wynikającej z degradacji wiązań białkowych i osłabienia spójności sieci kazeinowej (Tabela 14).

Podsumowując, analiza zmian parametrów tekstury potwierdza, że kluczową rolę w kształtowaniu właściwości mechanicznych serów i ich analogów odgrywa proteoliza białek oraz sposób substytucji tłuszczu. Zarówno sery, jak i wyroby seropodobne wykazywały spadek spójności, elastyczności i sprężystości w miarę dojrzewania, co jest konsekwencją

narastającej proteolizy kazeiny i rozluźnienia sieci białkowej (Sousa, Ardö, McSweeney, 2001; McSweeney, Sousa, 2000). Równocześnie stwierdzono, że gumowatość i żujność osiągały maksima we wczesnej fazie dojrzewania (1.–7. dzień), a następnie malały, co można wiązać z przejściową reorganizacją sieci białkowej po soleniu, a w dalszym okresie – z intensyfikacją proteolizy. Wyroby seropodobne konsekwentnie charakteryzowały się większą twardością niż sery, co jest zgodne z doniesieniami wskazującymi, że ograniczenie udziału tłuszczu mlecznego oraz zastosowanie tłuszczów roślinnych o odmiennej krystaliczności i profilu topnienia sprzyja tworzeniu sztywniejszej, mniej plastycznej matrycy białkowej (Cunha, Dias, Viotto, 2010; Arslan, 2014; El-Wahed, Hassanien, 2019; Leong, 2020). Jednocześnie wyniki innych autorów pokazują, że kierunek zmian twardości zależy od rodzaju zastosowanego tłuszczu roślinnego, jego właściwości fizykochemicznych oraz sposobu interakcji z micelami kazeinowymi (El-Salam, 2015; Hanáková, 2013; Kavak, Karabiyik, 2019).

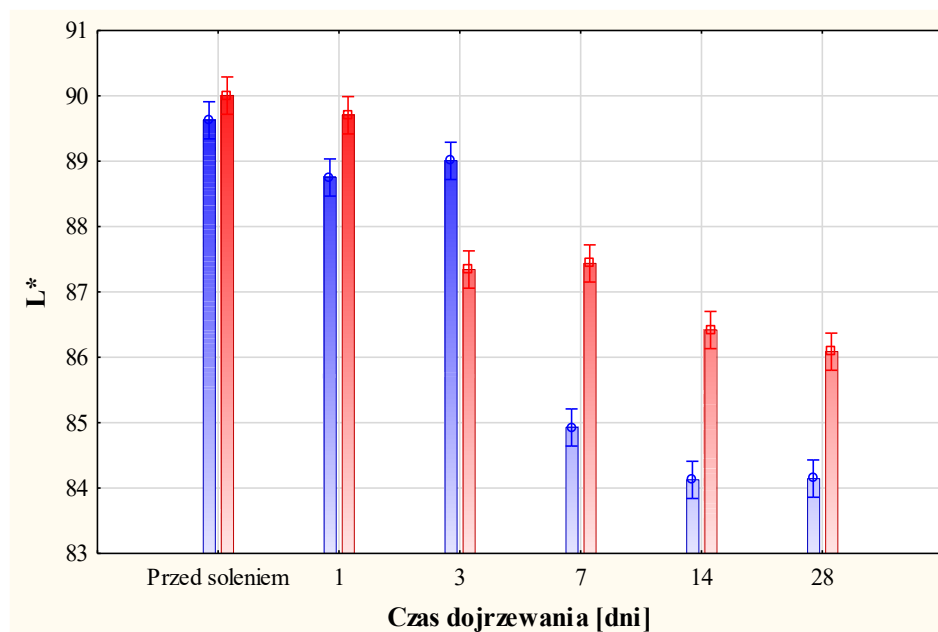
Z punktu widzenia praktyki technologicznej uzyskane rezultaty potwierdzają, że w serach dojrzewających tekstura jest determinowana głównie przez intensywność proteolizy, natomiast w wyrobach seropodobnych – przez właściwości użytych tłuszczów roślinnych i mniejszą podatność matrycy białkowej na rozkład enzymatyczny. Sery wykazywały większą dynamikę zmian prowadzących do rozluźnienia struktury, podczas gdy analogi utrzymywały wyższą twardość i żujność, co może wpływać na ich akceptację sensoryczną i zgodność z oczekiwaniami rynku. Jednocześnie wyniki te potwierdzają zasadność wykorzystania parametrów elektrycznych jako uzupełniających wskaźników zmian tekstury: silne powiązanie zmian mechanicznych z przebiegiem proteolizy i uwalnianiem frakcji jonowych wskazuje, że metoda impedancyjna może umożliwiać wcześniejsze wykrywanie zmian strukturalnych niż klasyczne testy TPA. W ujęciu zarządzania jakością oznacza to potencjał włączenia pomiarów impedancyjnych do zestawu nieniszczących narzędzi monitorowania dojrzewania, wspierających decyzje dotyczące oceny i klasyfikacji serów dojrzewających oraz wyrobów seropodobnych.

➤ *Parametry barwy*

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono wyraźne różnice w przebiegu zmian parametrów barwy (L^* , a^* , b^*) sera dojrzewającego (S) oraz wyrobu seropodobnego (WS) w czasie przechowywania (Rysunek 27-28).

Analiza instrumentalna wykazała, że sery naturalne podlegające procesowi dojrzewania charakteryzowały się stopniowym zmniejszaniem się wartości wskaźnika jasności L^* . W produkcji surowym wartości L^* wynosiły ok. 89–90, natomiast po 28 dniach dojrzewania

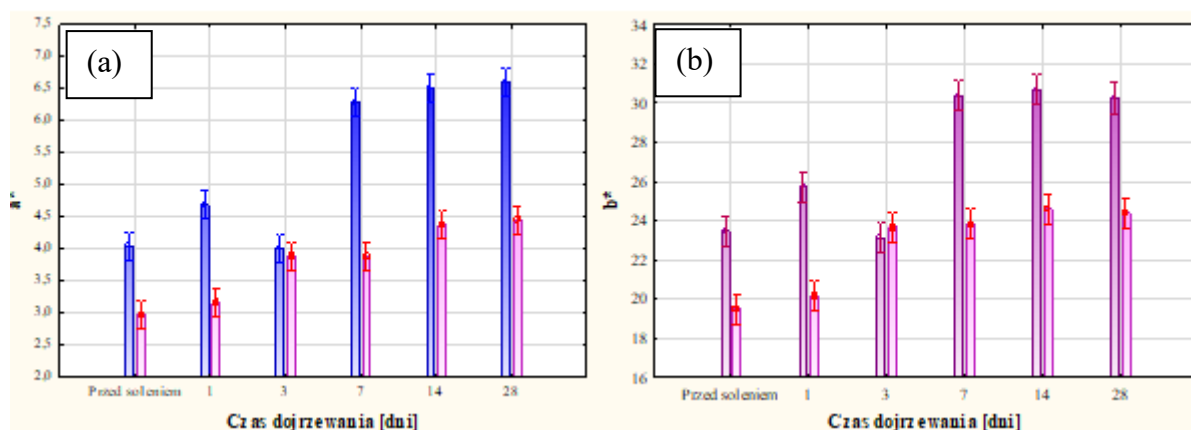
spadały do ok. 84, co świadczy o wyraźnym ściemnieniu masy serowej w czasie dojrzewania. W wyrobach seropodobnych również zaobserwowano spadek L^* , jednak zmiany były mniejsze – z ok. 90–91 w próbkach surowych do ok. 86–87 po 28 dniach. Potwierdza to, że ser ciemnieje szybciej niż wyrób seropodobny, a w całym okresie dojrzewania WS pozostawał jaśniejszy od sera. Zjawisko to może wynikać z obecności tłuszczów roślinnych, które cechują się większą stabilnością oksydacyjną (rysunek 27).



Rysunek 27. Zmiany parametru barwy L^* sera i wyrobu seropodobnego w czasie 28 dni dojrzewania.

Parametr a^* , odzwierciedlający udział barwy czerwonej, w obu produktach wzrastał w czasie dojrzewania, jednak wartości a^* były wyraźnie wyższe w serach niż w wyrobach seropodobnych (Rysunek 28a). W serach a^* zwiększało się od ok. 3,5 w próbkach surowych do ok. 7,0 po 28 dniach, natomiast w analogach od ok. 2,3 do ok. 4,2. Oznacza to narastanie odcieni czerwonych, silniej zaznaczone w serze, co można wiązać z intensywniejszymi przemianami białek i tłuszczu oraz większą aktywnością mikroflory odpowiedzialnej za dojrzewanie.

Podobny przebieg zmian zaobserwowano dla parametru b^* , określającego udział barwy żółtej (Rysunek 28b). W serach b^* rosło z ok. 25 w próbkach surowych do ok. 31 po 28 dniach, co potwierdza wyraźne nasilenie żółtego odcienia w miarę dojrzewania. W wyrobach seropodobnych również obserwowano wzrost b^* (z ok. 19–20 do ok. 24–25), lecz przyrost ten był mniejszy niż w serach, a wartości b^* w całym okresie pozostawały niższe niż w produktach mlecznych. Ograniczona zmiana barwy w WS potwierdza, że produkty te w mniejszym stopniu odtwarzają charakterystyczny profil barwy serów naturalnych.



Rysunek 28. Zmiany parametrów barwy a^* (a) i b^* (b) sera i wyrobu seropodobnego w czasie 28 dni dojrzewania.

Opisane wyniki są zgodne z literaturą, która wskazuje, że zmiany barwy serów dojrzewających mają związek z procesami proteolizy i lipolizy oraz właściwościami oksydacyjnymi tłuszczu mlecznego (McSweeney i Sousa, 2000; O’Callaghan i Guinee, 2004). Produkty zawierające tłuszcze roślinne wykazują zwykle większą stabilność barwy, co potwierdzają wyniki Everard i wsp. (2015) oraz Weng i wsp. (2020). Landaud (2017) zwraca uwagę, że naturalny proces dojrzewania serów prowadzi do charakterystycznego profilu barwy, którego trudno w pełni odtworzyć w produktach seropodobnych.

W praktyce przemysłowej pomiary barwy mogą uzupełniać ocenę wizualną, ułatwiając śledzenie zmian barwy produktu w czasie dojrzewania. Różnice jasności L^* między S i WS po 28 dniach dojrzewania sięgające około 2–3 jednostek mogą stanowić praktyczne kryterium oceny stopnia dojrzałości produktu oraz sygnał potencjalnych zafałszowań. Włączenie parametrów barwy do procedur kontroli jakości pozwala monitorować przebieg dojrzewania i sprawdzać zgodność cech produktu z deklaracją producenta.

5.2.2. Zmiany parametrów elektrycznych serów i wyrobów seropodobnych w czasie dojrzewania

➤ Przed soleniem

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów właściwości elektrycznych serów (S) oraz wyrobów seropodobnych (WS) przy częstotliwościach 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz zaobserwowano istotne różnice w parametrach przewodnościowych (Z, G) i pojemności (C_p, C_s), przy względnie stabilnych wartościach impedancji (Tabela 17).

Impedancja (Z) utrzymywała się na zbliżonym poziomie w obu grupach produktów. Wartości mieściły się w zakresie od 28,95 Ω (S, 1 kHz) do 27,47 Ω (WS, 100 kHz) i nie

wykazywały różnic istotnych statystycznie. Świadczy to, że całkowita odpowiedź badanych próbek na przyłożone pole elektryczne w zakresie niskich i średnich częstotliwości była podobna, co jest spójne z porównywalną zawartością wody i składników mineralnych opisanych w rozdziale 6.2.1 – czynników najsilniej kształtujących opór elektryczny żywności (Nelson, 2006; Jha i in., 2011).

Tabela 17. Wartości parametrów elektrycznych serów (S) i wyrobów seropodobnych (WS) przed soleniem, zmierzonych przy $f=1\text{kHz}$, 10kHz , 100kHz

Parametry elektryczne	S	WS	S	WS	S	WS
	$f = 1\text{kHz}$		$f = 10\text{kHz}$		$f = 100\text{kHz}$	
Z [Ω]	28,95a	28,15a	28,48a	27,61a	28,23a	27,47a
G [S]	$3,46 \cdot 10^{-2}\text{a}$	$3,66 \cdot 10^{-2}\text{b}$	$3,52 \cdot 10^{-2}\text{a}$	$3,72 \cdot 10^{-2}\text{b}$	$3,55 \cdot 10^{-2}\text{a}$	$3,75 \cdot 10^{-2}\text{b}$
Cp [F]	$1,85 \cdot 10^{-7}\text{a}$	$1,90 \cdot 10^{-7}\text{b}$	$4,62 \cdot 10^{-9}\text{a}$	$4,64 \cdot 10^{-9}\text{a}$	$6,02 \cdot 10^{-10}\text{a}$	$6,33 \cdot 10^{-9}\text{b}$
Cs [F]	$1,65 \cdot 10^{-4}\text{a}$	$1,79 \cdot 10^{-4}\text{b}$	$6,81 \cdot 10^{-5}\text{a}$	$7,56 \cdot 10^{-5}\text{b}$	$5,30 \cdot 10^{-6}\text{a}$	$5,64 \cdot 10^{-6}\text{b}$

a-b – wartości oznaczone różnymi literami istotnie różnią się między S-WS, $p < 0,01$

a-a – wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się statystycznie

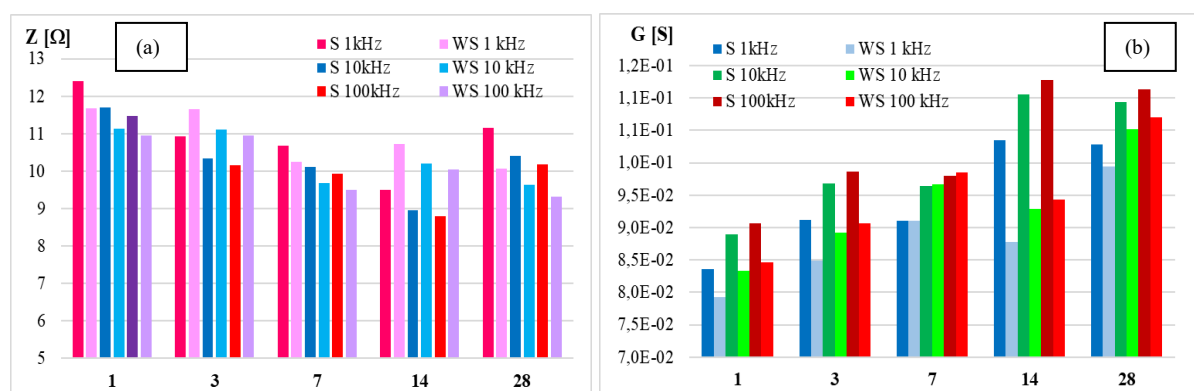
Przewodność (G) różnicowała S i WS w sposób statystycznie istotny ($p < 0,01$). W serach wartości wahały się od $3,46 \cdot 10^{-2}$ S (1 kHz) do $3,55 \cdot 10^{-2}$ S (100 kHz), natomiast w WS od $3,66 \cdot 10^{-2}$ S do $3,75 \cdot 10^{-2}$ S. Wyższe wartości G w wyrobach seropodobnych mogą wynikać z odmiennego składu fazy wodnej, w tym dodatku soli emulgujących i różnic w wiązaniu wody przez białka i tłuszcz roślinny, co sprzyja większej ruchliwości jonów. Podobne wyniki uzyskali autorzy badań nad produktami wieloskładnikowymi i emulsjami spożywczymi (Wang i in., 2003; Weng i in., 2020). Jeszcze wyraźniejsze różnice dotyczyły pojemności – zarówno Cp, jak i Cs były istotnie wyższe w wyrobach seropodobnych w całym zakresie częstotliwości, co wskazuje na bardziej złożoną strukturę koloidalną i większą zdolność układu do polaryzacji dielektrycznej (Vrba, Vrba, 2013).

Podsumowując, przed soleniem sery charakteryzowały się niższymi wartościami G, Cp i Cs, co sugeruje bardziej zwartą i uporządkowaną sieć kazeinowo-tłuszczową, natomiast wyroby seropodobne – z uwagi na udział tłuszczów roślinnych i dodatków emulgujących – wykazywały wyższe przewodnictwo i większą podatność na polaryzację. Parametry te stanowią punkt wyjścia do oceny wpływu procesu dojrzewania na właściwości elektryczne badanych produktów.

➤ *Zmiany parametrów przewodnościowych*

Analiza zmian impedancji (Z) i przewodnictwa (G) serów (S) i wyrobów seropodobnych (WS) w czasie dojrzewania pozwoliła ocenić reakcję matrycy produktów serowarskich na przyłożone pole elektryczne. Parametry te odzwierciedlają skład chemiczny, zawartość wody oraz organizację fazy koloidalnej, dlatego stanowią podstawowe narzędzie w badaniach jakości żywności (Nelson, 2006; Weng i in., 2020).

W serach dojrzewających odnotowano wyraźny spadek Z i równoczesny wzrost G w pierwszych dwóch tygodniach dojrzewania, po czym następowała faza stabilizacji z częściowym odwróceniem trendu (nieznaczny wzrost Z i spadek G w 28. Dniu (Rysunek 29a,b). Świadczy to o intensywnym charakterze przemian enzymatycznych i biochemicznych w początkowym okresie oraz bardziej wyrównanym przebiegu procesów w końcowej fazie dojrzewania. W wyrobach seropodobnych wartości Z były początkowo nieco niższe niż w serach i obniżały się w sposób bardziej jednostajny przez cały okres dojrzewania, natomiast wzrost G był łagodniejszy i nie obserwowano wtórnej fazy stabilizacji. Taki, bardziej monotoniczny charakter zmian można wiązać z ograniczoną aktywnością mikroflory i niższą intensywnością proteolizy w analogach.



Rysunek 29. Zmiany wartości impedancji (Z , a) i konduktancji (G , b) sera i wyrobów seropodobnych w czasie 28 dni dojrzewania, zmierzone przy $f = 1$ kHz – 100 kHz.

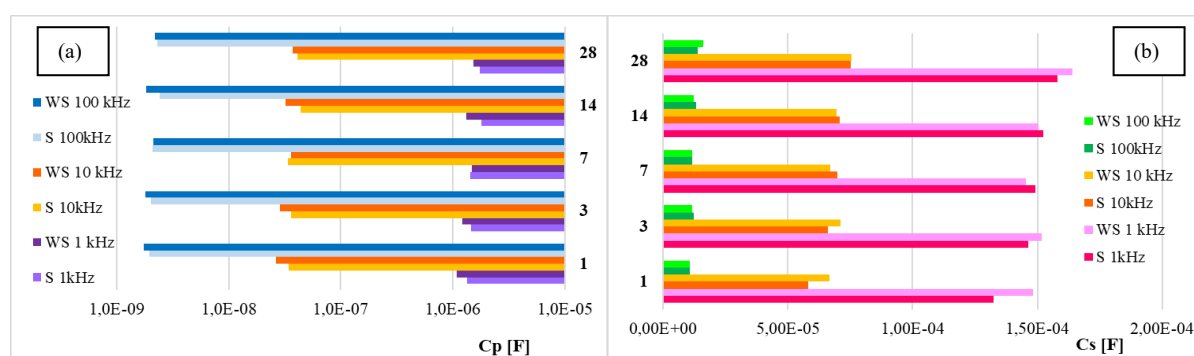
Porównanie obu grup produktów wskazuje, że sery dojrzewające odznaczają się dwufazowym, bardziej złożonym przebiegiem zmian przewodnościowych, wynikającym z postępującej proteolizy, uwalniania związków jonowych oraz wtórnych zmian uwodnienia matrycy białkowej (Wang i in., 2003; Jha i in., 2011). W wyrobach seropodobnych dynamika i zakres zmian Z i G są wyraźnie mniejsze, co jest spójne z wynikami badań dotyczących właściwości dielektrycznych emulsji tłuszczowo-białkowych z udziałem tłuszczów roślinnych (Vrba, Vrba, 2013).

Z praktycznego punktu widzenia uzyskane wyniki sugerują, że sery posiadają charakterystyczny „profil przewodnościowy” procesu dojrzewania, który może być traktowany jako swoisty odcisk palca produktu, podczas gdy wyroby seropodobne wykazują bardziej przewidywalny, uproszczony przebieg. Analiza parametrów Z i G może zatem stanowić użyteczne narzędzie wspierające identyfikację autentyczności oraz kontrolę jakości serów dojrzewających i ich analogów.

➤ *Zmiany parametrów pojemnościowych (dielektrycznych)*

Parametry dielektryczne, takie jak pojemność równoległa (C_p) i szeregową (C_s), opisują zdolność materiału biologicznego do gromadzenia ładunku i polaryzacji w polu elektrycznym. W produktach mleczarskich odzwierciedlają one zmiany w układzie koloidalnym białek, rozmieszczeniu fazy wodnej i tłuszczowej oraz ruchliwości jonów, dlatego mogą być pomocne w opisie przebiegu procesu dojrzewania.

W serach wartości C_p wykazywały wyraźny wzrost w pierwszych dwóch tygodniach (o ok. 30–35% w zależności od częstotliwości), a następnie stabilizację lub niewielki spadek do końca okresu dojrzewania. Analogiczny przebieg zaobserwowano w C_s , gdzie przy niskich częstotliwościach wartości zwiększały się o ok. 15–20% w ciągu 28 dni (Rysunek 30). Takie zmiany wskazują na reorganizację miceli kazeinowych i wzrost zdolności matrycy białkowej do polaryzacji, a następnie na stabilizację układu.



Rysunek 30. Zmiany wartości pojemności równoległej (C_p , a) i szeregową (C_s , b) sera (S) i wyrobów seropodobnych (WS) czasie 28 dni dojrzewania, zmierzone przy $f = 1 \text{ kHz} - 100 \text{ kHz}$

W wyrobach seropodobnych wartości C_p i C_s również rosły, jednak zmiany miały charakter monotoniczny i mniej dynamiczny (wzrost o ok. 20% w ciągu całego okresu) (Rysunek 30). Brak fazy stabilizacji, typowej dla serów, świadczy o ograniczonej skali przemian biochemicznych. Zjawisko to można wiązać z obecnością tłuszczów roślinnych i emulgatorów, które stabilizują układ koloidalny, ale ograniczają naturalne procesy proteolizy i przebudowy sieci białkowej.

Porównanie obu grup produktów wykazało, że sery charakteryzowały się bardziej złożonym, dwufazowym przebiegiem zmian dielektrycznych, natomiast wyroby seropodobne – prostszym i przewidywalnym. Wartości końcowe C_p i C_s były zbliżone, jednak tempo ich osiągnięcia było inne: w serach intensywny wzrost następował w pierwszych dwóch tygodniach, a w analogach zmiany rozkładały się równomiernie na cały okres dojrzewania.

Otrzymane wyniki wskazują, że parametry dielektryczne stanowią użyteczne narzędzie różnicowania produktów mlecznych i seropodobnych. W serach zmiany C_p i C_s miały bardziej złożony, dwufazowy charakter, związany z przebudową miceli kazeinowych oraz polaryzacją wynikającą z uwalniania jonów i zmieniającego się uwodnienia białek. Zjawiska te są zgodne z obserwacjami Wang i in. (2003), którzy podkreślają, że właściwości dielektryczne produktów wysokobiałkowych są silnie uzależnione od procesów enzymatycznych i składu mineralnego.

W wyrobach seropodobnych przebieg zmian C_p i C_s był odmienny – bardziej monotoniczny, co można wiązać z obecnością tłuszczów roślinnych i emulgatorów o innej charakterystyce dielektrycznej (Vrba i Vrba, 2013). Stabilizują one układ koloidalny, ale ograniczają zmiany typowe dla naturalnego dojrzewania serów.

W konsekwencji analiza parametrów dielektrycznych może być stosowana jako narzędzie wspierające identyfikację produktów mleczarskich oraz monitorowanie procesów dojrzewania w warunkach przemysłowych. Aby jednak w pełni potwierdzić ich użyteczność, niezbędne jest zastosowanie metod statystycznych – zarówno korelacji, jak i analizy głównych składowych (PCA). Pozwoli to określić zależności między właściwościami fizykochemicznymi (np. zawartością wody, tłuszczu, parametrami barwy) a elektrycznymi (Z , G , C_p , C_s) oraz wskazać zmienne kluczowe najbardziej różnicujące sery i wyroby seropodobne. Takie podejście umożliwi nie tylko ocenę ich przydatności jako markerów jakości i autentyczności, ale także stworzy podstawę do budowy modeli prognostycznych. Zagadnienia te zostały rozwinięte w kolejnym rozdziale (5.2.3).

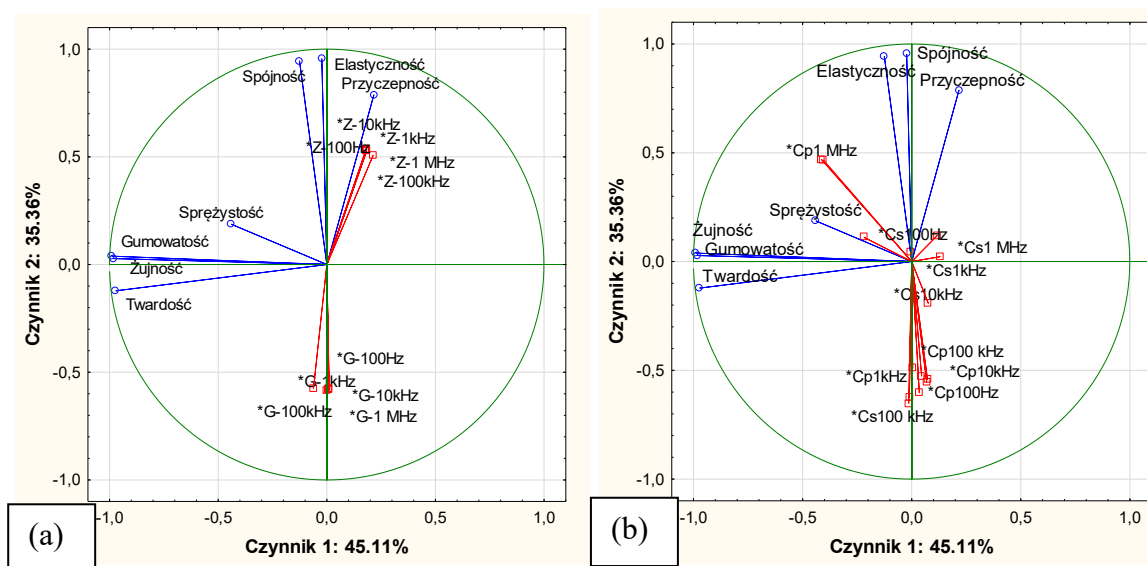
5.2.3. Korelacje między parametrami jakościowymi i elektrycznymi w czasie dojrzewania

➤ Sery dojrzewające (S)

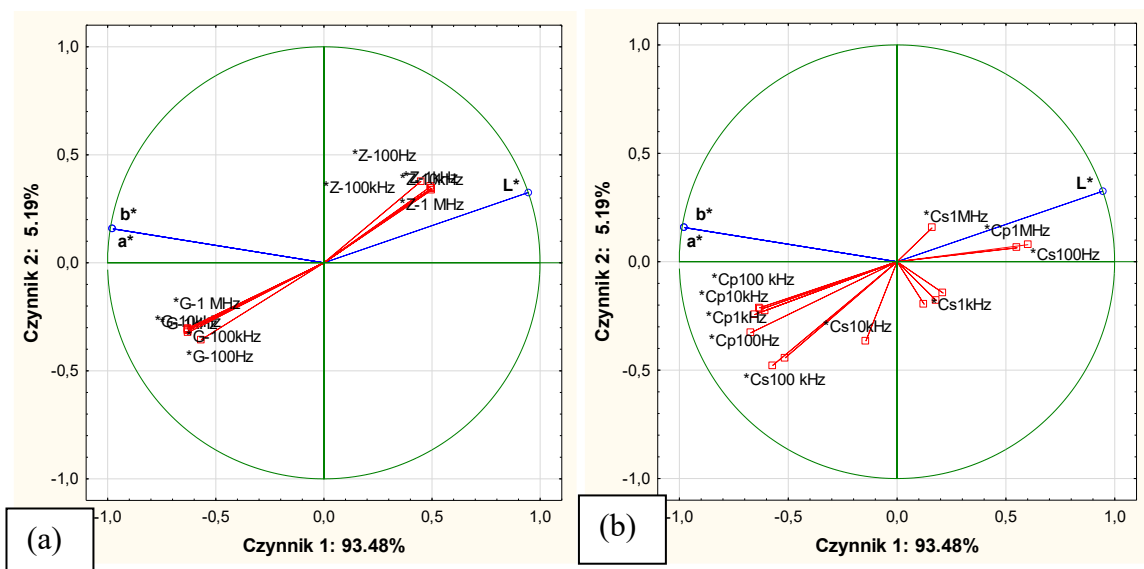
W pierwszym etapie przeprowadzono odrębne analizy głównych składowych (PCA) dla wybranych grup zmiennych jakościowych i elektrycznych, co pozwoliło zobrazować przestrzenną strukturę zależności między parametrami jakościowymi sera dojrzewającego a jego właściwościami elektrycznymi w czasie 28 dni dojrzewania (Rysunek 31). Pierwsze dwa czynniki główne (PC1 i PC2) wyjaśniały łącznie od 75 do 100% wariancji, w zależności

od analizowanej grupy zmiennych, co potwierdza trafność i stabilność uzyskanych modeli. PC1 porządkował przede wszystkim zmienność parametrów elektrycznych (Z, G, Cp, Cs) oraz składu chemicznego (sucha masa, białko, tłuszcz), natomiast PC2 różnicował próbki pod względem parametrów tekstury (twardość, spójność, elastyczność) oraz zmiennych takich jak aktywność wody (a_w) i pH. W przypadku mikroelementów (Ca, P) dwa czynniki główne wyjaśniały całość wariancji (100%). Wapń wykazywał silniejsze zależności z przewodnictwem (G) i pojemnością równoległą (Cp) (Rysunek 35), co wskazuje na jego istotną rolę w sieciowaniu kazeiny i stabilizacji matrycy białkowej, a tym samym na ograniczanie udziału jonów swobodnych w strukturze sera. Fosfor natomiast tworzył bardziej rozproszone relacje, lokując się bliżej przewodności (G) i pojemności szeregowej - Cs, co można wiązać z jego rolą w procesach buforowania i utrzymywania równowagi jonowej (Rysunek 35). Kierunki i długości wektorów jednoznacznie wskazywały na przeciwstawne zależności między impedancją (Z) a parametrami tekstury (Rysunek 31 a), oraz bliskie powiązania przewodnictwa i pojemności z frakcjami azotowymi (Rysunek 33) i barwą a^* , b^* (Rysunek 32), co jest spójne z wynikami Nelsona (2006) i Jha i in. (2011).

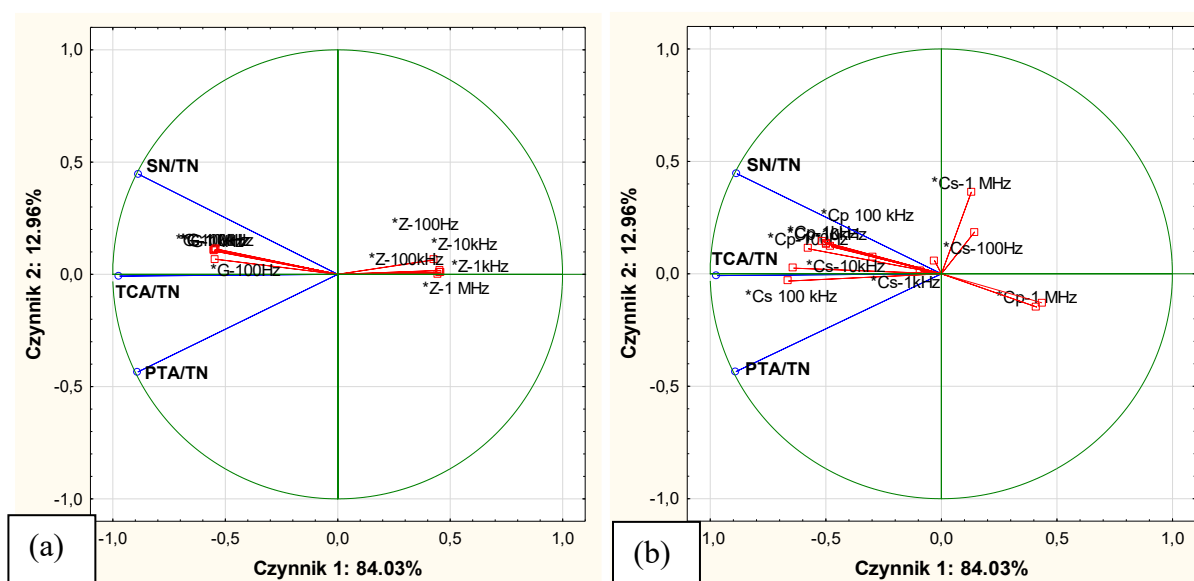
Kolejna faza obejmowała analizę korelacji liniowej, która ilościowo potwierdziła obserwacje z PCA (Tabela 18, 19). Część współczynników była umiarkowana ($r \approx 0,5$), co w badaniach nad materiałem biologicznym należy uznać za poznawczo istotne z uwagi na naturalną zmienność surowca (Nelson, 2006; Everard i in., 2015).



Rysunek 31. Okręgi korelacji między parametrami tekstury i elektrycznymi: Z, G (a) i Cp, Cs (b) sera dojrzewającego



Rysunek 32. Okręgi korelacji między parametrami barwy i elektrycznymi: Z , G (a) i C_p , C_s (b) sera dojrzewającego



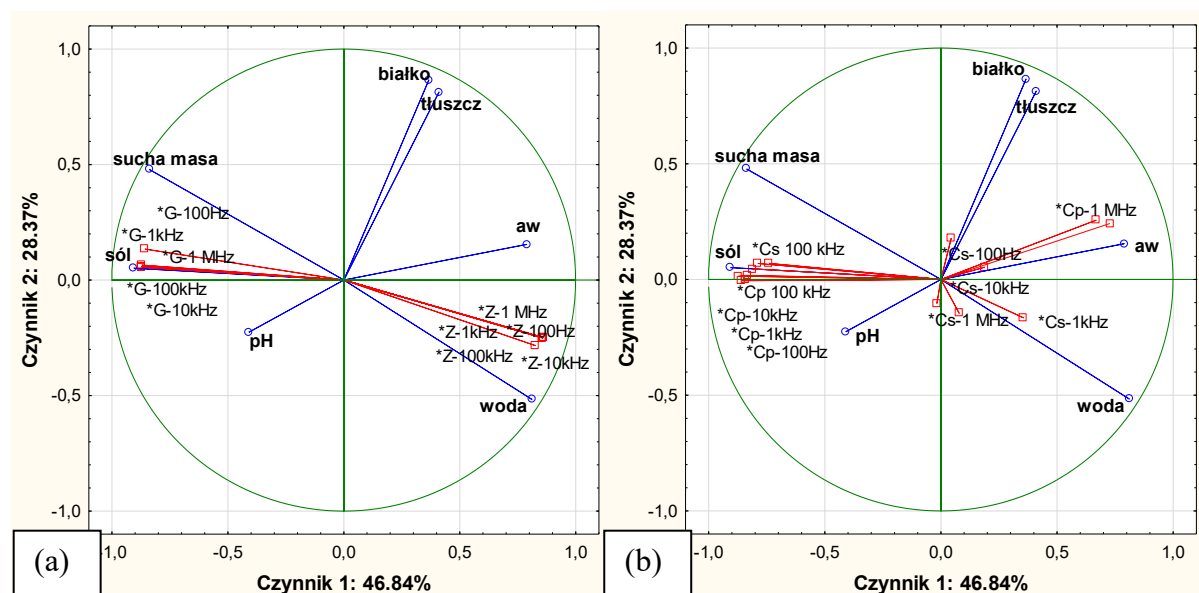
Rysunek 33. Okręgi korelacji między zawartością związków azotowych a parametrami elektrycznymi: Z , G (a) i C_p , C_s (b) sera dojrzewającego

Impedancja (Z) wykazywała istotne ujemne korelacje z wybranymi wskaźnikami tekstury (twardość) oraz dodatnie z elastycznością i spójnością, co oznacza, że niższe wartości Z odpowiadają strukturze bardziej podatnej mechanicznie, związanej z rozluźnieniem matrycy białkowej. Silne, istotne ujemne korelacje Z (Rysunek 33a) z frakcjami azotowymi (SN/TN, TCA/TN, PTA/TN) potwierdzają związek między obniżeniem impedancji

a postępującą proteolizą i wzrostem udziału związków rozpuszczalnych sprzyjających przewodnictwu jonowemu.

Parametry barwy również istotnie wiązały się z właściwościami elektrycznymi (Rysunek 32). Z korelowała dodatnio z jasnością L^* , a ujemnie z a^* i b^* , podczas gdy G i Cp wykazywały dodatnie korelacje z a^* i b^* (często przy $p < 0,01$), co wskazuje na związek między przewodnictwem, pojemnością a intensywnością barwy żółtej i czerwonej. Wyniki te są zgodne z obserwacjami Everard i in. (2015), którzy powiązali zmiany barwy serów dojrzewających z proteolizą i modyfikacją układu koloidalnego.

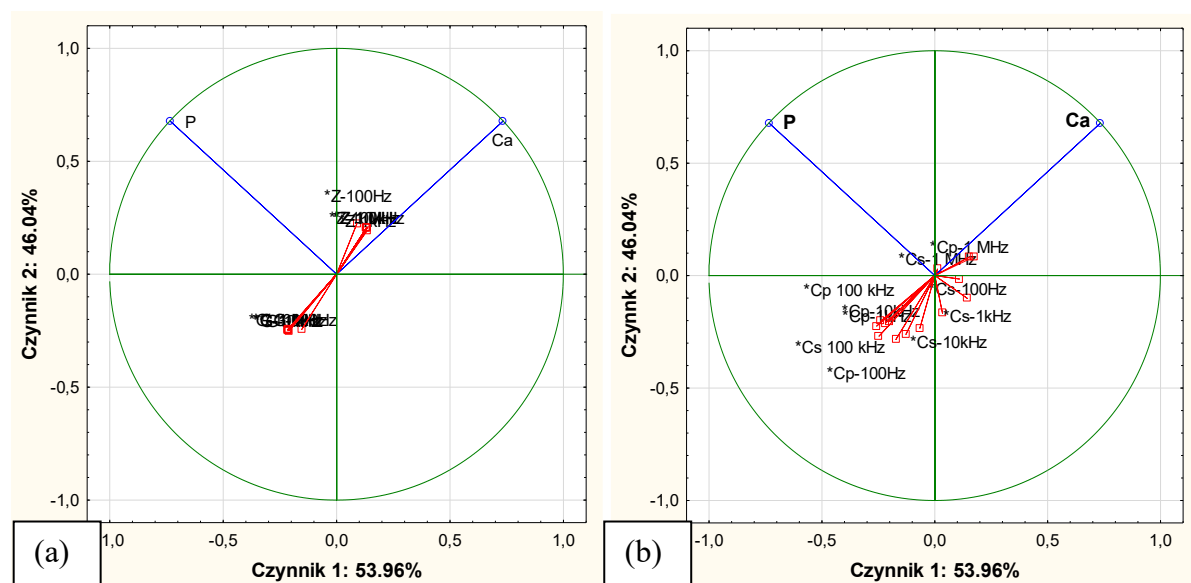
Silne zależności odnotowano między parametrami elektrycznymi a składem chemicznym (Rysunek 34, Tabela 19). Impedancja (Z) korelowała istotnie ujemnie z zawartością suchej masy i soli oraz dodatnio z zawartością wody, co jednoznacznie wskazuje na dominujący wpływ frakcji wodnej i elektrolitów na przewodnictwo sera. Z kolei przewodnictwo (G) wykazywało dodatnie korelacje z białkiem i suchą masą oraz ujemne z tłuszczem i aktywnością wody, a PCA lokowała wektor G w pobliżu białka i suchej masy, przeciwnie do aw i tłuszczu. Parametry pojemnościowe, szczególnie Cp, korelowały istotnie z białkiem, suchą masą, aktywnością wody oraz frakcjami azotowymi, co potwierdza ich przydatność jako wskaźników zmian mikrostrukturalnych i stopnia proteolizy. Cs, zwłaszcza przy wyższych częstotliwościach, wykazywała korelacje z suchą masą i pH, odzwierciedlając wrażliwość na zmiany środowiska jonowego.



Rysunek 34. Okręgi korelacji między składem chemicznym a parametrami elektrycznymi: Z, G (a) i Cp, Cs (b) sera dojrzewającego

Przewodnictwo (G) wykazywało istotne dodatnie korelacje z zawartością białka i suchej masy oraz ujemne z tłuszczem i aktywnością wody (wartości r sięgały ok. 0,6–0,8 dla białka i suchej masy oraz ok. –0,6 dla a_w i tłuszczu). W analizie PCA wektor G lokował się blisko wektorów białka i suchej masy, przeciwnie do aktywności wody i tłuszczu (Rysunek 34 a). Potwierdza to, że wzrost udziału frakcji stałych przy jednoczesnym obniżeniu zawartości fazy lipidowej sprzyja lepszemu przewodnictwu elektrycznemu sera.

Parametry dielektryczne, szczególnie C_p , wykazywały podobny wzorzec (Rysunek 34 b) – dodatnie korelacje z białkiem, suchą masą i wybranymi frakcjami azotowymi ($r = 0,55$ – 0,65), co potwierdza ich przydatność jako wskaźników zmian mikrostrukturalnych i stopnia proteolizy. C_s natomiast, zwłaszcza przy wyższych częstotliwościach (10–100 kHz), wiązała się istotnie z suchą masą oraz pH, odzwierciedlając wrażliwość na zmiany środowiska jonowego i właściwości koloidalnych matrycy białkowej.



Rysunek 35. Okręgi korelacji między zawartością mikroskładników a parametrami elektrycznymi: Z , G (a) i C_p , C_s (b) sera dojrzewającego

Korelacje G i C_p z wapniem miały charakter ujemny (Rysunek 35), co wskazuje, że wyższa zawartość Ca ogranicza mobilność jonów w matrycy białkowej i prowadzi do obniżenia przewodnictwa oraz zdolności pojemnościowych. W PCA wektor Ca był skierowany przeciwnie do wektorów G i C_p , zbliżając się do wektora impedancji (Z), co odzwierciedla jego rolę w usztywnianiu sieci kazeinowej i zmniejszaniu podatności sera na polaryzację elektryczną (Żywica, 2010).

Fosfor nie tworzył jednoznacznych, silnych korelacji z parametrami elektrycznymi (Rysunek 35); jego wektor w PCA zajmował pozycję bardziej centralną, co sugeruje raczej pośredni, buforujący wpływ na układ jonowy niż bezpośrednie kształtowanie sygnału

elektrycznego. Jest to zgodne z doniesieniami Wang i in. (2003) oraz Żywicy (2010), według których fosforany stabilizują koloidalną formę kazeiny, jednak w mniejszym stopniu niż wapń wpływają na przewodnictwo.

Podsumowując, uzyskane wyniki potwierdzają silne zależności między parametrami elektrycznymi a kluczowymi cechami jakościowymi serów dojrzewających. Przewodnictwo oraz parametry pojemnościowe są istotnie związane z białkiem, suchą masą, frakcjami azotowymi, barwą i aktywnością wody, natomiast impedancja pozostaje w relacji odwrotnej do stopnia proteolizy i uwodnienia matrycy. Właściwości elektryczne w sposób spójny odwzorowują więc przebieg dojrzewania i mogą być wykorzystane do opisu oraz różnicowania próbek na poszczególnych etapach procesu.

Tabela 18. Relacje między parametrami tekstury, związkami azotowymi i barwy a parametrami elektrycznymi sera w czasie dojrzewania

	Twardość	Przyczepność	Spójność	Elastyczność	SN/TN	TCA/TN	PTA/TN	L*	a*	b*
Z_{100Hz}	-0,282*	0,297*	0,532**	0,519**	-0,323**	-0,469**	-0,380**	0,547**	-0,365**	-0,394**
Z_{1kHz}	-0,259*	0,288**	0,567**	0,552**	-0,364**	-0,496**	-0,379**	0,582**	-0,412**	-0,442**
Z_{10kHz}	-0,261*	0,285*	0,563**	0,550**	-0,368**	-0,497**	-0,375**	0,583**	-0,417**	-0,447**
Z_{100kHz}	-0,260*	0,285*	0,566**	0,553**	-0,371**	-0,501**	-0,378**	0,583**	-0,418**	-0,448**
G_{100Hz}	NS	-0,314**	-0,592**	-0,625**	0,475**	0,605**	0,415**	-0,654**	0,498**	0,501**
G_{1kHz}	NS	-0,295*	-0,601**	-0,644**	0,492**	0,618**	0,399**	-0,698**	0,559**	0,565**
G_{10kHz}	NS	-0,290*	-0,600**	-0,643**	0,490**	0,616**	0,394**	-0,698**	0,563**	0,570**
G_{100kHz}	NS	-0,289*	-0,597**	-0,642**	0,489**	0,614**	0,393**	-0,697**	0,564**	0,570**
Cp_{100Hz}	NS	-0,303**	-0,614**	-0,674**	0,516**	0,647**	0,418**	-0,742**	0,601**	0,609**
Cp_{1kHz}	NS	-0,248*	-0,583**	-0,622**	0,471**	0,587**	0,344**	-0,700**	0,596**	0,610**
Cp_{10kHz}	NS	-0,234*	-0,574**	-0,602**	0,452**	0,570**	0,332**	-0,669**	0,578**	0,594**
Cp_{100kHz}	NS	NS	-0,514**	-0,559**	0,437**	0,539**	0,330**	-0,646**	0,549**	0,564**
CS_{100Hz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0,269**
CS_{1kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CS_{10kHz}	NS	-0,238*	NS	-0,242*	0,289**	0,304**	NS	-0,254**	NS	NS
CS_{100kHz}	NS	-0,367**	-0,611**	-0,677**	0,537**	0,715**	0,566**	-0,630**	0,443**	0,422**

*- poziom istotności $p < 0,05$; **-poziom istotności $p < 0,01$; NS – nie istotne

Tabela 19. Korelacje między składem chemicznym, aktywnością wody, pH i mikroelementami a parametrami elektrycznymi sera dojrzewającego

	Białko	Sucha masa	Sól	Tłuszcz	woda	aw	pH	Ca	P
Z_{100Hz}	NS	-0,699**	-0,726**	NS	0,686**	0,464**	NS	NS	NS
Z_{1kHz}	NS	-0,712**	-0,761**	NS	0,690**	0,492**	NS	NS	NS
Z_{10kHz}	NS	-0,720**	-0,768**	NS	0,695**	0,500**	NS	NS	NS
Z_{100kHz}	NS	-0,719**	-0,769**	NS	0,694**	0,499**	NS	NS	NS
G_{100Hz}	NS	0,634**	0,751**	NS	-0,595**	-0,549**	NS	-0,279*	NS
G_{1kHz}	NS	0,598**	0,777**	NS	-0,553**	-0,584**	0,251**	-0,325**	NS
G_{10kHz}	NS	0,593**	0,779**	NS	-0,548**	-0,584**	0,244**	-0,326**	NS
G_{100kHz}	NS	0,592**	0,780**	NS	-0,546**	-0,583**	NS	-0,325**	NS
Cp_{100Hz}	NS	0,552**	0,776**	NS	-0,506**	-0,601**	0,305**	-0,364**	NS
Cp_{1kHz}	NS	0,535**	0,775**	NS	-0,486**	0,582**	NS	-0,341**	NS
Cp_{10kHz}	NS	0,518**	0,772**	NS	-0,470**	-0,551**	NS	-0,313**	NS
Cp_{100kHz}	NS	0,529**	0,711**	NS	-0,476**	-0,518**	NS	-0,287**	NS
CS_{100Hz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CS_{1kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,456**	NS	NS
CS_{10kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	-0,269**	0,507**	NS	NS
CS_{100kHz}	NS	0,442**	0,617**	NS	-0,422**	-0,451**	0,393**	-0,271**	NS

*- poziom istotności $p < 0,05$; **-poziom istotności $p < 0,01$; NS – nie istotne

➤ **Wyroby seropodobne (WS)**

Analiza głównych składowych (PCA) oraz korelacji dla wyrobów seropodobnych umożliwiła identyfikację kluczowych zależności między właściwościami elektrycznymi a cechami jakościowymi, przy czym dwie pierwsze składowe wyjaśniały od ok. 50 do ponad 90% całkowitej zmienności (Rysunek: 36–41, Tabela: 20-21).

W relacjach między impedancją (Z), przewodnictwem (G) a składem chemicznym pierwsza składowa porządkowała przede wszystkim zróżnicowanie związane z zawartością wody, soli i pH, podczas gdy druga odzwierciedlała udział fazy stałej białkowo-tłuszczowej (Rysunek 36 a). Impedancja wykazywała istotne ujemne korelacje z zawartością soli i pH (r ok. $-0,40$ do $-0,50$; $p < 0,01$), natomiast przewodność – dodatnie korelacje z solą i pH (do $r \approx 0,8$; $p < 0,01$) oraz ujemne z białkiem i tłuszczem ($p < 0,05$ – $0,01$) (Tabela 20). Brak istotnych zależności z aktywnością wody sugeruje, że w badanym zbiorze jej zróżnicowanie było niewielkie. Oznacza to, że w wyrobach seropodobnych odpowiedź elektryczna jest determinowana przede wszystkim przez stężenie jonów w fazie wodnej i zasolenie, a w mniejszym stopniu przez udział fazy białkowo-tłuszczowej. Wyniki te są spójne z badaniami dielektrycznymi emulsji serowych i produktów wieloskładnikowych, w których dominującą rolę odgrywa faza wodno-jonowa (Nelson, 2006; Weng i in., 2020; Vrba, Vrba, 2013).

W odniesieniu do parametrów tekstury (twardość, sprężystość, gumowatość, żujność) PCA wykazała różnicującą rolę Z i G (Rysunek 36 b). Z przy wyższych częstotliwościach dodatnio korelowała z twardością, gumowatością i żujnością ($r \approx 0,43$ – $0,49$; $p < 0,05$ – $0,01$), co odzwierciedla większy opór struktur zwartych wobec przepływu prądu. Z kolei G i Cp pozostawały ujemnie skorelowane z twardością i parametrami „energetycznymi” tekstury oraz dodatnio z elastycznością ($r > 0,6$; $p < 0,01$), wskazując, że wyższe przewodnictwo i pojemność są charakterystyczne dla struktur bardziej uwodnionych i sprężystych (Tabela 20).

Tabela 20. Korelacje między parametrami tekstury, związkami azotowymi i barwy a parametrami elektrycznymi wyrobów seropodobnych

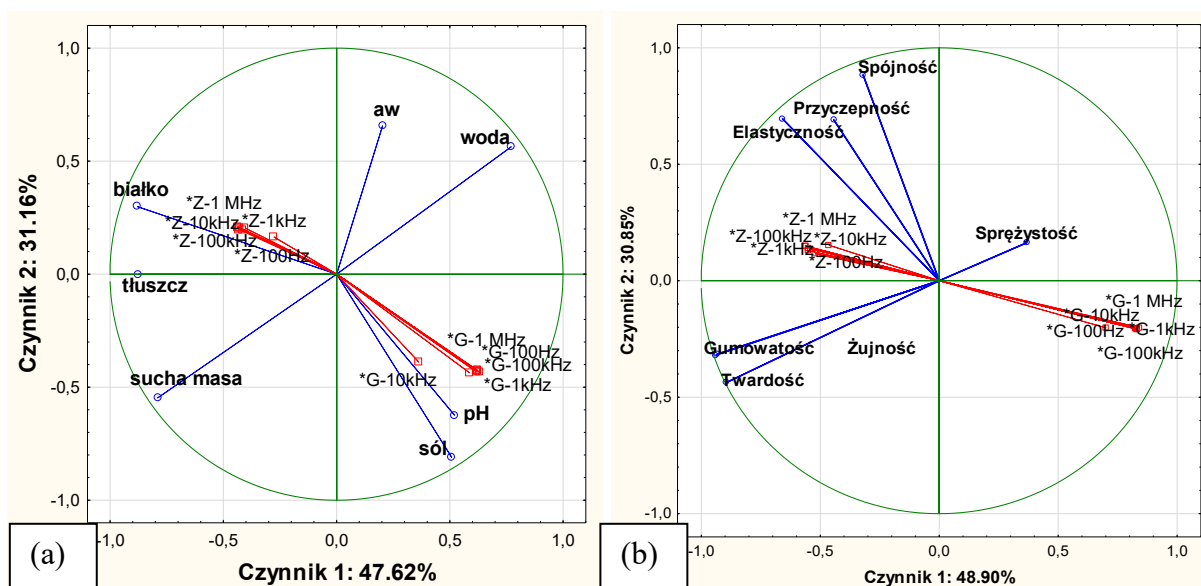
	Twardość	Przyczepność	Sprężystość	Spójność	Gumowatość	Żujność	Elastyczność	SN/TN	TCA/TN	PTA/TN	L*	a*	b*
Z _{100Hz}	NS	NS	NS	NS	0,389*	0,388*	0,450**	-0,375*	-0,372*	NS	NS	NS	NS
Z _{1kHz}	0,431*	NS	NS	NS	0,473**	0,475**	0,476**	-0,428*	-0,421*	NS	0,388*	NS	-0,377*
Z _{10kHz}	0,442*	NS	NS	NS	0,484**	0,486**	0,468**	-0,418*	-0,408*	NS	0,388*	NS	-0,392*
Z _{100kHz}	0,447*	NS	NS	NS	0,491**	0,494**	0,499**	-0,459*	-0,452*	NS	0,418*	-0,367*	-0,404*
G _{100Hz}	-0,554**	NS	NS	-0,376*	-0,605**	-0,617**	-0,716**	0,699**	0,748**	0,683**	-0,636**	0,619**	0,458*
G _{1kHz}	-0,674**	-0,426*	NS	-0,422*	-0,730**	-0,745**	-0,779**	0,795**	0,828**	0,727**	-0,779**	0,770**	0,659**
G _{10kHz}	-0,683**	-0,433*	NS	-0,425*	-0,739**	-0,754**	-0,778**	0,797**	0,828**	0,723**	-0,785**	0,777**	0,675**
G _{100kHz}	-0,682**	-0,435*	NS	-0,427*	-0,738**	-0,754**	-0,779**	0,797**	0,828**	0,724**	-0,784**	0,777**	0,676**
Cp _{100Hz}	-0,691**	-0,449**	NS	-0,439**	-0,746**	-0,761**	-0,786**	0,829**	0,849**	0,740**	-0,834**	0,831**	0,745**
Cp _{1kHz}	-0,696**	-0,434**	NS	-0,380*	-0,745**	-0,762**	-0,674**	0,715**	0,723**	0,592**	-0,766**	0,766**	0,764**
Cp _{10kHz}	-0,645**	-0,445**	NS	-0,405*	-0,699**	-0,717**	-0,668**	0,704**	0,712**	0,596**	-0,716**	0,733**	0,722**
Cp _{100kHz}	-0,633**	-0,464**	NS	-0,402*	-0,691**	-0,694**	-0,674**	0,672**	0,686**	0,599**	-0,652**	0,667**	0,638**
CS _{100Hz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CS _{1kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0,491**	0,458**	0,507**	0,517**	NS	NS	NS
CS _{10kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0,463**	0,452**	0,491**	0,465**	-0,417*	0,375*	NS
CS _{100kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0,552**	0,950*	0,702**	0,685**	-0,541**	0,571**	NS

*- poziom istotności $p < 0,05$; **-poziom istotności $p < 0,01$; NS – nie istotne

Tabela 21. Korelacje między składem chemicznym, aktywnością wody, pH i mikroelementami a parametrami elektrycznymi **WS**

	Białko	Sucha masa	Sól	Tłuszcz	woda	aw	pH	Ca	P
Z_{100Hz}	NS	NS	-0,374**	NS	NS	NS	-0,404**	NS	NS
Z_{1kHz}	NS	NS	-0,478**	NS	NS	NS	-0,474**	NS	NS
Z_{10kHz}	NS	NS	-0,492**	NS	NS	NS	-0,467**	NS	NS
Z_{100kHz}	NS	NS	-0,496**	NS	NS	NS	-0,504**	NS	NS
G_{100Hz}	NS	NS	0,476**	NS	NS	NS	0,759**	NS	NS
G_{1kHz}	-0,529**	NS	0,651**	-0,391*	NS	NS	0,872**	NS	NS
G_{10kHz}	-0,558**	NS	0,665**	-0,413*	NS	NS	0,874**	NS	NS
G_{100kHz}	-0,561**	NS	0,664**	-0,416*	NS	NS	0,873**	NS	NS
Cp_{100Hz}	-0,622**	-0,425**	0,710**	-0,439**	NS	NS	0,903**	NS	NS
Cp_{1kHz}	-0,744**	-0,501**	0,739**	-0,551**	0,404*	NS	0,808**	NS	NS
Cp_{10kHz}	-0,755**	-0,506**	0,679**	-0,559**	0,477*	NS	0,765**	NS	NS
Cp_{100kHz}	-0,745**	-0,436**	0,653**	-0,566**	0,412*	NS	0,738**	NS	NS
CS_{100Hz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CS_{1kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,463**	NS	NS
CS_{10kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,503**	NS	NS
CS_{100kHz}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,646**	NS	NS

*- poziom istotności $p < 0,05$; **-poziom istotności $p < 0,01$; NS – nie istotne

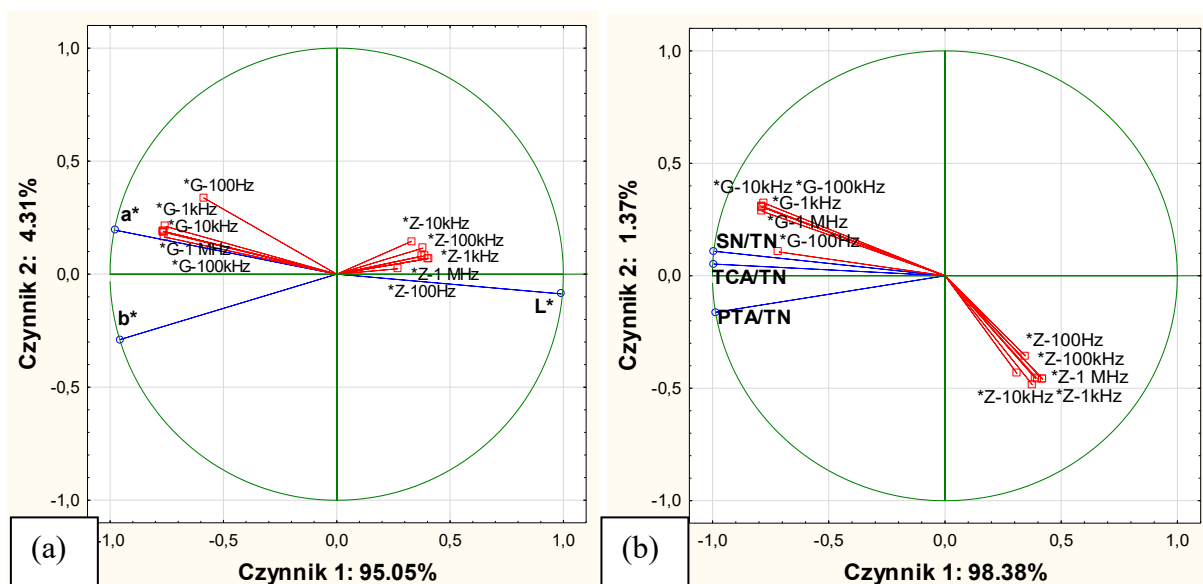


Rysunek 36. Okręgi korelacji między parametrami elektrycznymi (Z, G) wyrobu seropodobnego a ich składem chemicznym (a) i parametrami tekstury (b).

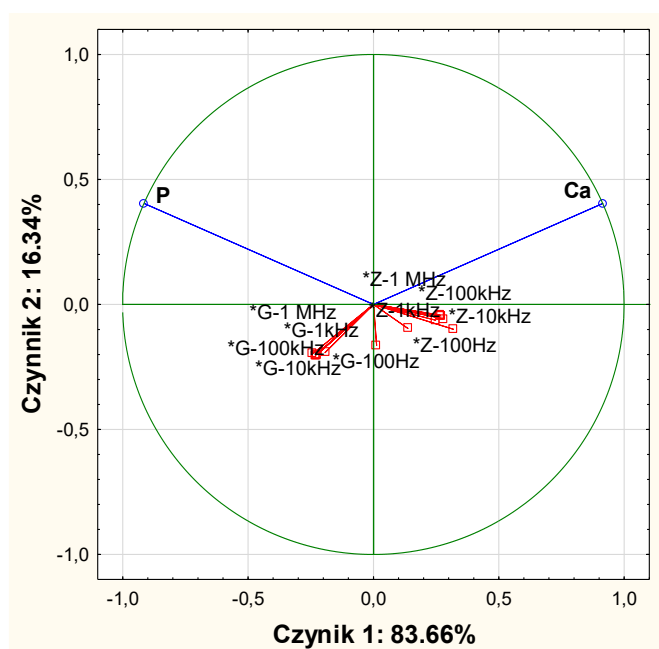
Analiza barwy (L^* , a^* , b^*) wykazała dominację pierwszej składowej ($PC1 > 95\%$), a przewodność i parametry pojemnościowe (szczególnie C_p) były związane z parametrami barwy a^* i b^* , podczas gdy Z korelowało głównie z jasnością L^* (Rysunek 37 a). G i C_p dodatnio korelowały z a^* i b^* oraz ujemnie z L^* , natomiast Z wykazywała tendencje odwrotne. Oznacza to, że wyższe wartości przewodności i pojemności sprzyjają ciemniejszej, bardziej nasyconej barwie, co można powiązać z większą koncentracją składników stałych i pigmentów w fazie wodnej, zgodnie z obserwacjami Everard i in. (2015) dotyczącymi serów dojrzewających.

W zakresie frakcji azotowych (SN/TN, TCA/TN, PTA/TN) PCA wykazała bardzo silne korelacje G oraz C_p ze wzrastającym udziałem azotu rozpuszczalnego, podczas gdy wektor Z był zorientowany przeciwnie (Rysunek 37 b). Korelacje dodatnie G i C_p z frakcjami rozpuszczalnymi ($r > 0,7$; $p < 0,01$) oraz ujemne Z potwierdzają, że w miarę postępu proteolizy struktura analogów staje się bardziej rozluźniona, a faza wodno-jonowa – bogatsza w peptydy i aminokwasy, co zwiększa przewodnictwo i podatność na polaryzację.

Uwzględnienie zawartości Ca i P ujawniło, że ich wpływ na odpowiedź elektryczną miał charakter pośredni (Rysunek 38). Analiza korelacji nie wykazała istotnych liniowych związków między Ca i P a parametrami Z, G, C_p i C_s , natomiast w przestrzeni PCA wapń lokował się bliżej C_s , a fosfor bliżej C_p , co sugeruje rolę Ca jako markera usieciowienia i usztywnienia matrycy białkowej oraz rolę P w utrzymaniu stabilności koloidalnej i uwodnienia układu (Wang i in., 2003; Żywica, 2010).



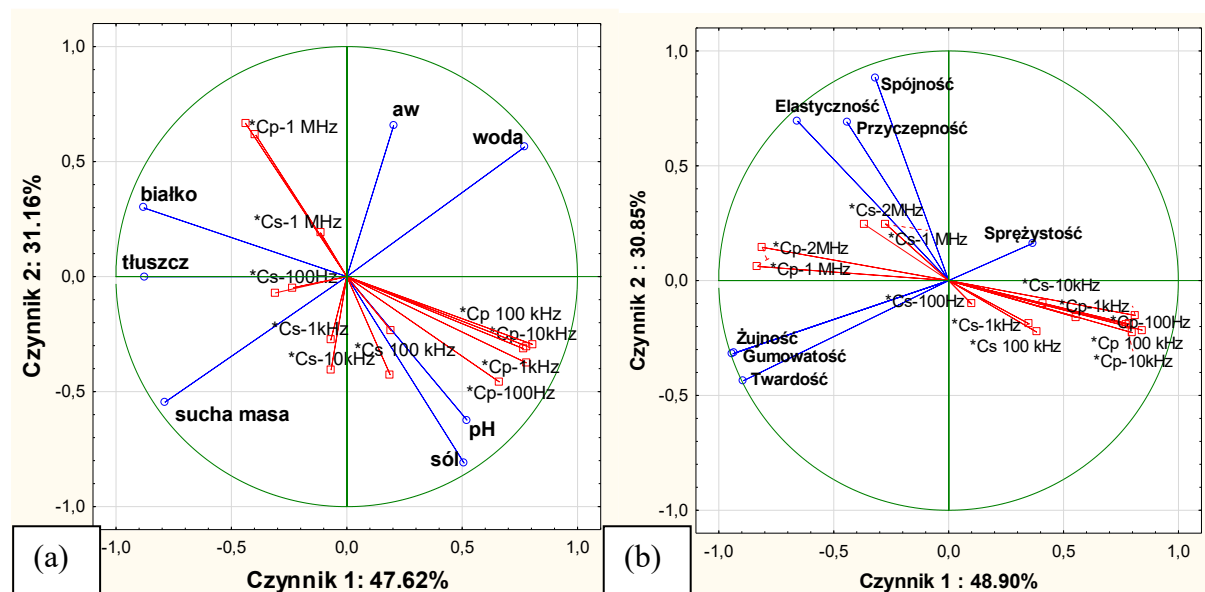
Rysunek 37. Okręgi korelacji między parametrami barwy (a), zawartości związków azotowych (b) a parametrami elektrycznymi (Z , G) wyrobu seropodobnego



Rysunek 38. Okręgi korelacji między wapniem i fosforem a parametrami elektrycznymi: Z , G wyrobu seropodobnego

W przypadku parametrów pojemnościowych układ zależności odzwierciedlał częściowo odmienną wrażliwość C_p i C_s (Rysunek 39). C_p silnie i ujemnie korelowała z białkiem, suchą masą i tłuszczem, a dodatnio z solą, wodą i pH ($p < 0,01$), co wskazuje, że jest szczególnie czuła na zmiany udziału fazy wodno-jonowej i zasolenia. C_s natomiast pozostawała w większości słabiej skorelowana ze składem chemicznym, wykazując istotne dodatnie związki głównie z pH przy wyższych częstotliwościach. W odniesieniu do tekstury

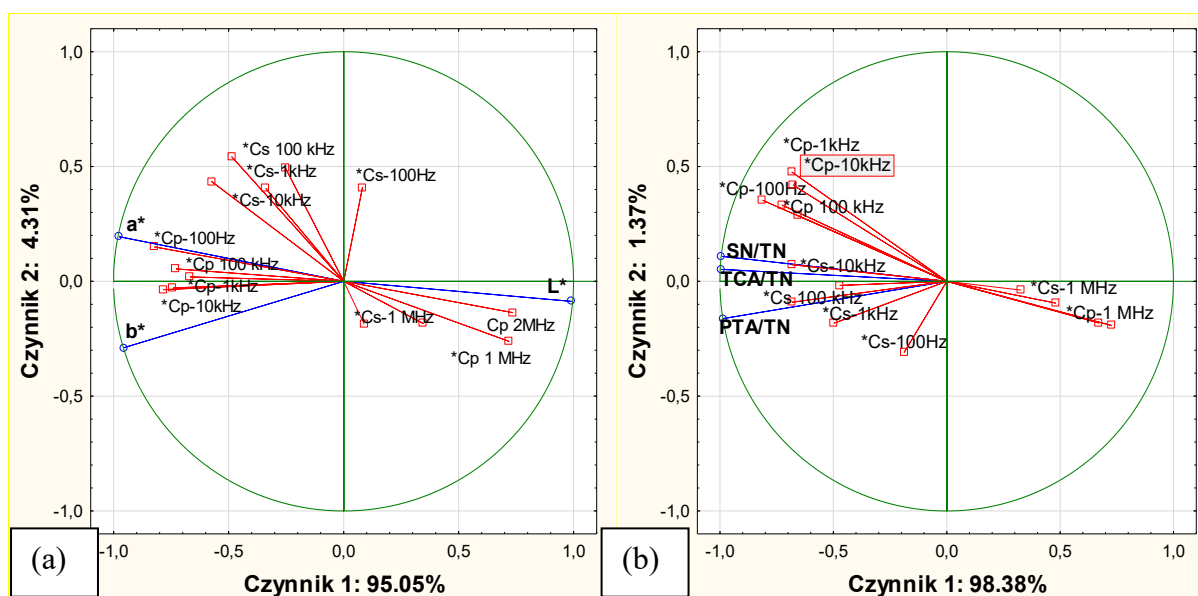
(Rysunek 39 b) C_p wykazywała ujemne korelacje z twardością, gumowatością i żujnością, natomiast C_s – ujemne korelacje z elastycznością, co potwierdza ich komplementarną wrażliwość na różne aspekty struktury mechanicznej.



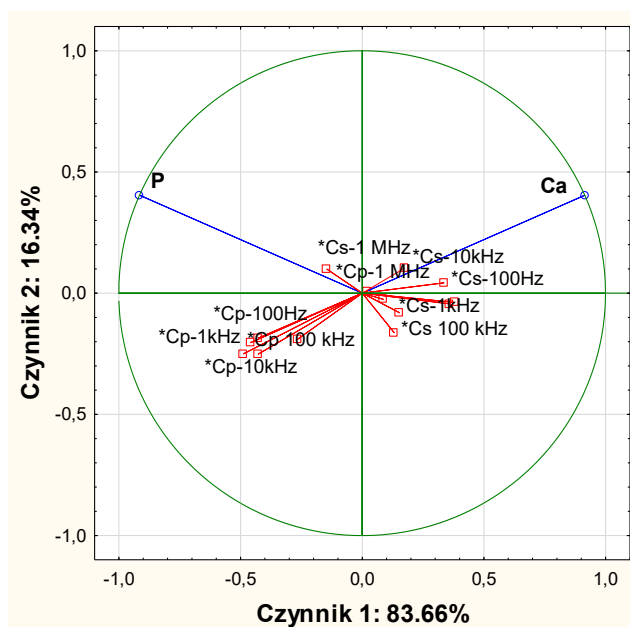
Rysunek 39. Okręgi korelacji między składem chemicznym (a), parametrami tekstury (b) a parametrami elektrycznymi: C_p , C_s wyrobu seropodobnego

W analizie parametrów barwy i frakcji azotowych zauważono (Rysunek 40), że przy wyższych częstotliwościach (10–100 kHz) parametr C_p wykazywał istotne dodatnie korelacje ze wszystkimi składowymi barwy (L^* , a^* , b^*) oraz z udziałem frakcji azotu rozpuszczalnego (SN/TN, TCA/TN, PTA/TN), natomiast C_s cechował się słabszym i bardziej selektywnym profilem – wyraźniej reagował głównie przy wyższych częstotliwościach i w większym stopniu na zmiany L^* oraz wybranych frakcji azotowych (Rysunek 40, Tabela 20). Może to sugerować, że C_p i C_s odzwierciedlają częściowo odmienne mechanizmy polaryzacji matrycy białkowej: C_p jest bardziej wrażliwe na zmiany ogólnej „gęstości” i zabarwienia układu, podczas gdy C_s reaguje głównie na zmiany środowiska jonowego i lokalnej organizacji struktury.

W odniesieniu do zawartości fosforu (P) i wapnia (Ca) analiza PCA wykazała, że C_p lokowało się bliżej fosforu, co wskazuje na jego związek z procesami uwodnienia i polaryzacji matrycy białkowej, natomiast C_s pozostawało w sąsiedztwie wapnia, co sugeruje większą wrażliwość na obecność wiązań jonowych stabilizujących sieć kazeinową i wpływających na sztywność struktury (Rysunek 41).



Rysunek 40. Okręgi korelacji między parametrami barwy (a), związków azotowych (b) a parametrami elektrycznymi (C_p , C_s) wyrobu seropodobnego



Rysunek 41. Okręgi korelacji między zawartością mikrośladników i parametrów elektrycznych: - C_p , C_s wyrobu seropodobnego

Przedstawione wyniki PCA dla wyrobów seropodobnych (WS) potwierdziły ogólną spójność zależności obserwowanych wcześniej w serach dojrzewających, przy czym dla WS dominowała pierwsza składowa główna (PC1), która w wielu przypadkach wyjaśniała ponad 90% całkowitej zmienności (Rysunek 36–41). Wskazuje to, że w tej grupie produktów większe znaczenie w kształtowaniu odpowiedzi elektrycznej miała faza wodno-jonowa niż zróżnicowanie związane z udziałem fazy białkowo-tłuszczowej. Parametry przewodnościowe (Z , G) wyraźnie różnicowały próbki o wyższej zawartości wody i soli od próbek

charakteryzujących się większym udziałem suchej masy, białka i tłuszczu, natomiast parametry pojemnościowe (C_p , C_s) dostarczały informacji uzupełniającej – C_p w większym stopniu odzwierciedlała właściwości związane ze strukturą białkowo-tłuszczową i stopniem proteolizy, podczas gdy C_s pozostawała ściślej powiązana z uwodnieniem matrycy i cechami sprężystości.

Porównując uzyskane wyniki dla serów i wyrobów seropodobnych, można stwierdzić, że kierunki zależności między parametrami elektrycznymi a cechami jakościowymi były zbliżone, lecz różnił je stopień wyrazistości oraz udział poszczególnych czynników w modelu (Rysunek 36–41, Tabela. 20). W serach dojrzewających istotny był zarówno wymiar wodno-jonowy, jak i proteolityczno-strukturalny, natomiast w wyrobach seropodobnych zdecydowanie dominowała oś związana z uwodnieniem i zasoleniem. Oznacza to, że w serach proces dojrzewania prowadził do stopniowego różnicowania matrycy białkowej, podczas gdy w wyrobach seropodobnych głównym czynnikiem zmienności pozostawała zawartość wody, soli oraz składników mineralnych (P, Ca).

W praktyce przemysłowej oznacza to, że pomiary elektryczne mogą stanowić bardziej czułe i jednoznaczne narzędzie do oceny jakości wyrobów seropodobnych, natomiast w serach dojrzewających dostarczają szerszych informacji o stopniu dojrzałości oraz przebiegu złożonych procesów biochemicznych w trakcie przechowywania.

Dlatego kolejnym etapem analizy było opracowanie zależności regresyjnych między parametrami jakościowymi a właściwościami elektrycznymi serów i wyrobów seropodobnych. Zastosowanie prostych modeli liniowych ($y = ax + b$) umożliwiło ilościowe określenie, w jakim stopniu wybrane parametry elektryczne mogą służyć do prognozowania wskaźników jakości po 28 dniach dojrzewania. Wyniki tych analiz przedstawiono w rozdziale 5.2.4, obejmującym równania regresyjne oraz ocenę ich przydatności w kontekście budowy narzędzi prognostycznych dla przemysłu mleczarskiego.

5.2.4. Zależności regresyjne między parametrami elektrycznymi a wskaźnikami jakości produktów serowarskich dojrziałych

Wyniki analiz PCA oraz korelacji potwierdziły, że właściwości elektryczne serów są istotnie korelują z ich cechami jakościowymi, co uzasadnia podjęcie próby ilościowego modelowania tych zależności. W niniejszym podrozdziale przedstawiono liniowe modele regresji ($y = ax + b$) opisujące relacje między parametrami przewodnościowymi (Z , G) i dielektrycznymi (C_p , C_s) a wybranymi wskaźnikami jakości po 28 dniach dojrzewania (Tabela 22). Celem było określenie, w jakim stopniu pomiary elektryczne mogą pełnić

funkcję predyktorów właściwości fizykochemicznych, strukturalnych i proteolitycznych serów dojrziałych.

Z uwagi na biologiczny charakter materiału, dla którego typowa jest wysoka zmienność wewnątrz i międzygrupowa, za poznawczo wartościowe uznano zarówno modele o klasycznych poziomach istotności ($p < 0,05$; $p < 0,01$), jak i regresje o nieco wyższych wartościach p ($\approx 0,06$ – $0,09$), jeśli towarzyszyły im wysokie współczynniki korelacji ($r \geq 0,7$). W badaniach produktów mlecznych zależności tego typu traktuje się jako istotne z praktycznego punktu widzenia, ponieważ odzwierciedlają one realne, biologicznie uwarunkowane procesy dojrzewania, proteolizy i zmian mikrostruktury (Everard i in., 2015; Jha i in., 2011).

➤ *Sery dojrzewające*

Analiza regresji liniowej dla serów dojrzewających wykazała, że wybrane parametry elektryczne mogą w istotnym stopniu wyjaśniać zróżnicowanie cech jakościowych po 28 dniach dojrzewania (Tabela 22). W wielu modelach uzyskano wysokie wartości współczynnika korelacji, co potwierdza silne związki między odpowiedzią elektryczną a właściwościami fizykochemicznymi i strukturalnymi produktu.

W odniesieniu do tekstury wykazano, że spójność była skorelowana z pojemnością C_p mierzoną przy 100 Hz ($r \approx 0,74$; $p \approx 0,09$). Choć istotność statystyczna jest na poziomie granicznym, to wysoka wartość r wskazuje na wyraźny trend: wzrost pojemności, związany z bardziej rozluźnioną i uwodnioną matrycą białkową, towarzyszy obniżeniu spójności struktury.

Istotne i praktycznie użyteczne modele uzyskano dla barwy, zwłaszcza jasności L^* . L^* była dobrze opisywana przez parametry C_s w zakresie kHz–100 kHz ($r \geq 0,82$; $p < 0,05$ – $0,01$) oraz przez $Z_{100\text{Hz}}$ ($r \approx 0,81$; $p < 0,05$). Wzrost C_s wiązał się ze spadkiem L^* , natomiast wyższa Z sprzyjała większej jasności. Oznacza to, że bardziej zwarte układy dielektryczne i wyższy opór elektryczny odpowiadają jaśniejszej powierzchni sera, podczas gdy większa pojemność – ciemniejszym, bardziej „zagęszczonym” optycznie strukturom.

Najsilniejsze i najbardziej jednoznaczne zależności uzyskano dla wskaźnika SN/TN, odzwierciedlającego ogólny stopień proteolizy. Zarówno C_p (szczególnie przy 100 Hz i 1 kHz), jak i G w szerokim zakresie częstotliwości (100 Hz–1 MHz) tworzyły modele o bardzo wysokich wartościach współczynnika korelacji ($r \geq 0,96$, często zbliżone do 1,0; $p < 0,01$). Oznacza to, że wzrost udziału azotu rozpuszczalnego wiązał się z systematycznymi, silnie skorelowanymi zmianami parametrów elektrycznych. Zależności te stanowią najcenniejszą podstawę do dalszych prac nad wykorzystaniem pomiarów

elektrycznych jako wskaźnika stopnia dojrzałości i zaawansowania proteolizy w serach dojrzewających.

Tabela 22. Równania regresji opisujące zależności między parametrami elektrycznymi a wskaźnikami jakości serów dojrzewających.

Parametry	Równania regresji dla SERÓW	r	p
Tekstury	Spójność = $0,808-692 \times C_{p100Hz}$	0,738	0,09
Barwy	$L^* = 83,85 + 127,34 \times E^{06} \times C_{p100kHz}$	0,786	0,06
	$L^* = 84,27 + 479,35 \times E^{06} \times C_{p1MHz}$	0,742	0,09
	$L^* = 91,81 - 48495,94 \times C_{s1kHz}$	0,876	**
	$L^* = 87,27 - 41521,83 \times C_{s10kHz}$	0,821	*
	$L^* = 85,21 - 76033,48 \times C_{s100kHz}$	0,852	*
	$L^* = 84,10 - 25413,55 \times C_{s1MHz}$	0,846	*
	$L^* = 83,83 + 0,02 \times Z_{100Hz}$	0,812	*
Wskaźniki proteolizy	$SN/TN = 5,82 + 76622,37 \times C_{p100Hz}$	0,990	**
	$SN/TN = 6,96 + 1968914,76 \times C_{p1kHz}$	1,000	**
	$SN/TN = 7,21 + 77,8 \times E^{06} \times C_{p1kHz}$	0,997	**
	$SN/TN = 7,83 + 1,1E^{09} \times C_{p1kHz}$	0,962	**
	$SN/TN = -1,99 + 179,66 \times G_{100Hz}$	0,998	**
	$SN/TN = 3,87 + 63,99 \times G_{1kHz}$	0,997	**
	$SN/TN = 4,21 + 56,54 \times G_{10kHz}$	0,998	**
	$SN/TN = 4,33 + 54,47 \times G_{100kHz}$	0,998	**
	$SN/TN = 4,49 + 51,61 \times G_{1MHz}$	0,999	**
	$TCA/TN = 12,79 - 101,61 \times E^{03} \times C_{s10kHz}$	0,793	0,06
	$TCA/TN = 7,71 - 182,72 \times E^{03} \times C_{s10kHz}$	0,809	*
	$PTA/TN = 0,97 + 44740,15 \times C_{p1kHz}$	0,787	0,06
	$PTA/TN = 0,97 + 1,86 \times E^{06} \times C_{p10kHz}$	0,831	*
	$PTA/TN = 0,97 + 28,89 \times E^{06} \times C_{p100kHz}$	0,871	*
	$PTA/TN = 0,76 + 4,12 \times G_{100Hz}$	0,793	0,06
	$PTA/TN = 0,90 + 1,42 \times G_{1kHz}$	0,768	0,07
	$PTA/TN = 0,91 + 1,27 \times G_{10kHz}$	0,776	0,07
	$PTA/TN = 0,91 + 1,23 \times G_{100kHz}$	0,778	0,07
	$PTA/TN = 0,91 + 1,17 \times G_{1MHz}$	0,782	0,07
	$PTA/TN = 1,24 - 14,18 \times E^{03} \times C_{s100kHz}$	0,777	0,07
Aktywność wody	$aw = 0,96 + 11,87 \times E^{06} \times C_{p1MHz}$	0,790	0,06
	$aw = 0,95 + 0,01 \times Z_{100Hz}$	0,877	**
	$aw = 0,942 + 0,01 \times Z_{1kHz}$	0,869	*
	$aw = 0,941 + 0,01 \times Z_{10kHz}$	0,858	*
	$aw = 0,940 + 0,01 \times Z_{100kHz}$	0,853	*
	$aw = 1,02 - 904,85 \times C_{s10kHz}$	0,769	0,07
	$aw = 0,98 - 1548,35 \times C_{s100kHz}$	0,746	0,09
Sucha masa	$SM = 57,45 - 0,04 \times Z_{100Hz}$	0,788	0,06
	$SM = 57,65 - 0,07 \times Z_{1kHz}$	0,777	0,07
	$SM = 57,71 - 0,08 \times Z_{10kHz}$	0,767	0,08
	$SM = 57,72 - 0,08 \times Z_{100kHz}$	0,762	0,08

r – współczynnik korelacji, *p* – poziom istotności, ** - $p < 0,01$, * - $p < 0,05$

Dla frakcji TCA/TN uzyskano zależności z C_s przy 10 kHz ($r \approx 0,79-0,81$; p od $\approx 0,06$ do $< 0,05$), co wskazuje, że frakcje średniocząsteczkowe są wrażliwe na zmiany odpowiedzi

pojemnościowej układu, choć większa zmienność danych powoduje podwyższone wartości p . W przypadku PTA/TN, opisującej frakcję niskocząsteczkową, istotne modele uzyskano zarówno dla C_p ($r \geq 0,83$; $p < 0,05$), jak i dla G oraz C_s ($r \approx 0,77-0,79$; $p \approx 0,06-0,07$). Potwierdza to, że przewodnictwo i pojemność reagują na obecność drobnocząsteczkowych produktów rozkładu białek, choć lokalne zróżnicowanie proteolizy w strukturze sera przekłada się na większy rozrzut wyników.

Istotne zależności regresyjne uzyskano również dla aktywności wody (a_w). Modele z udziałem $Z_{100\text{Hz}}-Z_{100\text{kHz}}$ charakteryzowały się wysokimi wartościami r (powyżej 0,85; $p < 0,05-0,01$), natomiast C_p i C_s tworzyły zależności umiarkowanie silne ($p \approx 0,06-0,09$). Wskazuje to, że impedancja dobrze odzwierciedla zmiany ogólnego uwodnienia matrycy, a parametry dielektryczne rejestrują jednocześnie modyfikacje zarówno uwodnienia, jak i mikrostruktury.

Ostatnia grupa modeli dotyczyła zawartości suchej masy (SM). Zależności SM z impedancją Z w całym badanym zakresie częstotliwości miały charakter ujemny ($r \approx 0,76-0,79$; $p \approx 0,06-0,08$), co wskazuje, że wyższa sucha masa wiązała się z niższymi wartościami Z . Można to interpretować jako efekt większej „ciągłości” fazy stałej i lepszego przewodnictwa jonowego w serach o wyższej koncentracji składników stałych, mimo niższej zawartości wody.

Podsumowując, uzyskane równania regresji potwierdzają, że parametry elektryczne – szczególnie przewodność (G) i pojemność C_p , a w nieco mniejszym stopniu C_s i Z – mogą być wykorzystane do ilościowego opisu wybranych wskaźników jakości serów dojrzewających po 28 dniach dojrzewania. Modele o bardzo wysokich wartościach współczynnika korelacji i istotności ($p < 0,05$; $p < 0,01$), zwłaszcza dla SN/TN, stanowią potencjalną podstawę do opracowania prostych algorytmów szacowania parametrów jakości na podstawie pomiarów elektrycznych. Modele o nieco wyższych poziomach istotności, przy nadal wysokich r , zachowują istotne znaczenie poznawcze i diagnostyczne, lecz wymagają dalszej weryfikacji na większej liczbie próbek i w zróżnicowanych warunkach technologicznych, zanim będzie można rozważać ich wykorzystanie w praktycznych rozwiązaniach wspierających zarządzanie jakością w zakładach serowarskich.

➤ *Wyroby seropodobne*

Analiza równań regresji liniowej dla wyrobów seropodobnych (WS) umożliwiła określenie, w jakim stopniu właściwości elektryczne odzwierciedlają ich cechy jakościowe po 28 dniach dojrzewania, a także porównanie tych zależności z obserwowanymi w serach dojrzewających. Uzyskane modele potwierdziły, że profil zależności w WS ma odmienny

charakter niż w serach, co wynika zarówno z różnic technologicznych, jak i z odmiennych mechanizmów fizykochemicznych rządzących strukturą tych produktów. Szczególnie istotne zależności dotyczyły tekstury i barwy, natomiast związki pomiędzy parametrami elektrycznymi a wskaźnikami proteolizy okazały się wyraźnie słabsze niż w serach, choć nadal poznawczo istotne (Tabela 23).

W przypadku tekstury uzyskano liczne modele istotne statystycznie, opisujące zarówno spójność, jak i elastyczność WS. Dla elastyczności współczynniki korelacji często przekraczały $r = 0,85$ ($p < 0,05$), szczególnie w modelach opartych na impedancji (Z) oraz parametrach pojemnościowych (C_p i C_s). Kierunki zależności były stabilne: wzrost Z wiązał się ze zwiększeniem elastyczności, natomiast wzrost C_p lub C_s z jej obniżeniem. Sugeruje to, że układ o większym oporze elektrycznym zachowuje większą sprężystość, podczas gdy wyższa pojemność – charakterystyczna dla bardziej polaryzowalnych, uwodnionych struktur – jest związana z mniejszą odpornością na odkształcenie. Wyniki te są zgodne z literaturą dotyczącą produktów o strukturze emulsyjnej, w których jednorodna faza tłuszczowa oraz dodatki stabilizujące determinują charakter odpowiedzi elektrycznej oraz przewidywalność zmian mechanicznych (Weng et al., 2020; Wang et al., 2003; Everard et al., 2015). W porównaniu z serami dojrzewającymi, w których dla tekstury uzyskano jedynie pojedyncze modele o umiarkowanej sile zależności, w WS regresje opisujące teksturę wykazują znacznie większą stabilność statystyczną. Wynika to z jednorodnej, mniej złożonej mikromorfologii WS oraz z ograniczonej roli procesów enzymatycznych, które w serach wprowadzają dodatkową zmienność strukturalną.

Istotne modele uzyskano także dla barwy. Dla parametru L^* zależności miały umiarkowaną siłę ($r \approx 0,75$), natomiast dla składowej b^* (barwy żółtej) współczynniki korelacji często przekraczały $r = 0,90$ ($p < 0,01$). Szczególnie silne modele otrzymano dla parametru C_s , zwłaszcza w zakresie częstotliwości 1–100 kHz. Wynik ten sugeruje, że pojemność szeregową jest wrażliwa na zmiany mikrostruktury emulsyjnej, w tym na udział fazy tłuszczowej i stopień jej dyspersji – czynniki silnie wpływające na percepcję barwy żółtej w WS. W świetle literatury tłuszcze roślinne oraz stabilizatory stosowane w analogach serów modyfikują właściwości optyczne układów emulsyjnych, co wpływa jednocześnie na ich sygnał dielektryczny (Balakrishnan i Prakash, 2016). To tłumaczy, dlaczego w WS modele opisujące barwę są silniejsze niż w serach, gdzie większą rolę odgrywają procesy proteolityczne i zmiany mikrostruktury białkowej.

Tabela 23. Równania regresji opisujące zależności między parametrami elektrycznymi a wskaźnikami jakości wyrobów seropodobnych (WS) po 28 dniach dojrzewania.

Parametry	Równania regresji dla WS	r	p
Tekstury	Spójność = $0,056 + 0,055 \times Z_{100\text{kHz}}$	0,815	*
	Spójność * = $0,075 + 0,068 \times Z_{1\text{kHz}}$	0,810	*
	Spójność * = $0,387 + 0,039 \times Z_{10\text{kHz}}$	0,750	0,09
	Spójność * = $0,073 + 0,072 \times Z_{100\text{kHz}}$	0,728	0,09
	Elastyczność = $0,509 - 5497732,57 \times C_{p10\text{kHz}}$	0,777	0,07
	Elastyczność = $0,433 - 58882327 \times C_{p100\text{kHz}}$	0,726	0,09
	Elastyczność = $0,281 - 123700570,64 \times C_{p1\text{MHz}}$	0,771	0,07
	Elastyczność = $-2,306 + 37,42 \times G_{100\text{Hz}}$	0,739	0,09
	Elastyczność = $-0,345 + 3957,78 \times C_{p1\text{kHz}}$	0,877	*
	Elastyczność = $0,012 + 3871,16 \times C_{s10\text{kHz}}$	0,879	*
	Elastyczność = $0,269 + 2225,54 \times C_{s100\text{kHz}}$	0,882	*
	Elastyczność = $-0,214 + 0,04 \times Z_{100\text{Hz}}$	0,850	*
	Elastyczność = $-0,206 + 0,051 \times Z_{1\text{kHz}}$	0,854	*
	Elastyczność = $-0,007 + 0,032 \times Z_{10\text{kHz}}$	0,884	*
	Elastyczność = $-0,287 + 0,064 \times Z_{100\text{kHz}}$	0,887	*
	Elastyczność = $-0,263 + 0,063 \times Z_{1\text{MHz}}$	0,887	*
Barwy	$L^* = 95,29 - 164582,61 \times C_{p100\text{Hz}}$	0,752	0,09
	$L^* = 111,18 - 252,51 \times G_{1\text{kHz}}$	0,754	0,08
	$L^* = 67,78 + 66292,87 \times C_{s100\text{Hz}}$	0,755	0,08
	$b^* = 10,52 + 9009770,80 \times C_{p1\text{kHz}}$	0,755	0,08
	$b^* = 13,45 + 293759325,59 \times C_{p10\text{kHz}}$	0,851	*
	$b^* = 17,40 + 3194792987,33 \times C_{p100\text{kHz}}$	0,808	*
	$b^* = 25,63 + 6621746843,46 \times C_{p1\text{MHz}}$	0,846	*
	$b^* = 165,43 - 2022,13 \times G_{100\text{Hz}}$	0,820	*
	$b^* = 57,66 - 202922,81 \times C_{s1\text{kHz}}$	0,922	**
	$b^* = 39,37 - 198164,23 \times C_{s10\text{kHz}}$	0,923	**
	$b^* = 26,21 - 113599,16 \times C_{s100\text{kHz}}$	0,923	**
	$b^* = 49,646 - 1,967 \times Z_{100\text{Hz}}$	0,849	*
	$b^* = 49,311 - 2,477 \times Z_{1\text{kHz}}$	0,856	*
	$b^* = 39,938 - 1,618 \times Z_{10\text{kHz}}$	0,905	**
	$b^* = 54,059 - 3,190 \times Z_{100\text{kHz}}$	0,913	**
	$b^* = 53,114 - 3,168 \times Z_{1\text{MHz}}$	0,922	**
Wskaźniki proteolizy	$SN/TN = 19,65 - 58248,93 \times C_{s1\text{kHz}}$	0,767	0,08
	$SN/TN = 13,44 - 57393,34 \times C_{s10\text{kHz}}$	0,775	0,07
	$SN/TN = 9,64 - 33429,79 \times C_{s100\text{kHz}}$	0,788	0,06
	$SN/TN = 18,50 - 0,73 \times Z_{100\text{Hz}}$	0,916	**
	$SN/TN = 18,28 - 0,91 \times Z_{1\text{kHz}}$	0,913	**
	$SN/TN = 14,27 - 0,54 \times Z_{10\text{kHz}}$	0,872	*
	$SN/TN = 18,69 - 1,03 \times Z_{100\text{kHz}}$	0,855	*
	$SN/TN = 17,90 - 0,97 \times Z_{10\text{kHz}}$	0,819	*
	$TCA/TN = 14,94 - 153778,45 \times C_{p100\text{Hz}}$	0,772	0,07
	$TCA/TN = 29,84 - 236,44 \times G_{1\text{kHz}}$	0,776	0,07
	$TCA/TN = -10,89 + 62405,01 \times C_{s100\text{Hz}}$	0,782	0,07

r – współczynnik korelacji, *p* – poziom istotności, ** - $p < 0,01$, * - $p < 0,05$

W przypadku wskaźników proteolizy uzyskano istotne zależności, jednak ich siła była wyraźnie niższa niż w serach dojrzewających. Najsilniejsze modele dotyczyły SN/TN, dla których impedancja Z wykazywała współczynniki rzędu 0,87–0,92 ($p < 0,01$). Zależności oparte na C_s oraz C_p miały umiarkowaną siłę ($r \approx 0,76$ – $0,79$; $p \approx 0,06$ – $0,08$). Wyniki te różnią się istotnie od modeli dla serów, gdzie C_p i G osiągały prawie idealne korelacje ($r \rightarrow 1$). Potwierdza to, że w WS odpowiedź elektryczna w znacznie mniejszym stopniu odzwierciedla przebieg proteolizy, co wynika zarówno z odmiennej kompozycji białek, jak i ograniczonej aktywności enzymatycznej w tych produktach. Zjawisko to zostało opisane w literaturze, gdzie wykazano, że w analogach serów mechanizmy zmian reologicznych i mikrostrukturalnych są w większym stopniu kontrolowane przez właściwości emulsji, a nie przez intensywną proteolizę charakterystyczną dla serów dojrzewających (Cheng et al., 2020).

Podsumowując, wyniki regresji ujawniają odmienny profil użyteczności narzędzia elektrycznego w zależności od rodzaju produktu serowarskiego. W serach parametry elektryczne najściślej odwzorowują wskaźniki proteolizy i uwodnienia, stanowiąc czuły miernik zaawansowania dojrzewania. W wyrobach seropodobnych natomiast pomiary elektryczne najdokładniej opisują teksturę oraz barwę, a także zmienność związaną z tymi elementami struktury układu emulsyjnego. Sugeruje to możliwość zastosowania narzędzia w sposób komplementarny: w WS – jako szybkie i nieniszczące narzędzie kontroli tekstury, barwy i stabilności emulsji, natomiast w serach – jako wskaźnik stopnia proteolizy i parametrów związanych z dojrzewaniem technologicznym. Z punktu widzenia zarządzania jakością oznacza to możliwość wykorzystania pomiarów elektrycznych zarówno do bieżącej kontroli produkcji, jak i do oceny zgodności produktu z wymaganiami technologicznymi i recepturowymi, co stanowi logiczne wprowadzenie do kolejnego podrozdziału dotyczącego praktycznych zastosowań narzędzia w systemach nadzoru jakości.

5.2.5. Interpretacja wyników w perspektywie zastosowań w nadzorze jakości produktów serowarskich

Uzyskane wyniki badań pozwalają rozważyć **potencjalną przydatność opracowanego narzędzia elektrycznego, opartego na pomiarach impedancyjnych, jako elementu wspomagającego proces nadzoru jakości produktów serowarskich**. Cel szczegółowy E2.4 zakładał ocenę, w jakim stopniu opracowana metoda może być traktowana jako potencjalne narzędzie diagnostyczne wspierające proces zarządzania jakością serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych. Analiza dotyczyła zarówno możliwości różnicowania badanych wyrobów pod względem składu i dojrzałości, jak i ogólnego odniesienia wyników do wymagań systemów zapewnienia jakości i bezpieczeństwa żywności, tj. HACCP, ISO 9001

oraz zakładowej kontroli produkcji (ZKP – wewnętrzny system nadzoru nad zgodnością wyrobów z wymaganiami prawnymi, normatywnymi i specyfikacją producenta).

W przeprowadzonej analizie wykazano, że właściwości elektryczne produktów serowarskich zmieniają się w czasie dojrzewania, co potwierdzono zarówno metodami wielowymiarowymi (PCA), jak i klasycznymi analizami korelacji oraz modelami regresji liniowej. Szczególnie istotne były zależności między przewodnością (G) i pojemnością równoległą (Cp) a wskaźnikami proteolizy (SN/TN, TCA/TN, PTA/TN), uwodnienia (aw) oraz zawartości suchej masy. W serach dojrzewających zależności te były bardzo silne, co wskazuje na duży potencjał wykorzystania parametrów elektrycznych do oceny zaawansowania dojrzewania i związanych z nim przemian biochemicznych. W wyrobach seropodobnych istotne okazały się natomiast przede wszystkim związki między parametrami elektrycznymi a teksturą oraz barwą (zwłaszcza składową b*), co wiąże się z odmienną, bardziej emulsyjną i recepturowo kształtowaną strukturą tych produktów. Silne korelacje oraz wysokie współczynniki dopasowania regresji wskazywały, że parametry elektryczne są wrażliwe na mikrostrukturalne i biochemiczne zmiany towarzyszące dojrzewaniu sera i wyrobów seropodobnych, takie jak rozpad białek, zmiany stopnia uwodnienia oraz modyfikacje właściwości powierzchniowych i barwy. Oznacza to, że opracowana metoda może dostarczać dodatkowych, obiektywnych informacji o stanie produktu, przy czym w przypadku serów dojrzewających szczególnie istotne są wskaźniki proteolizy i aktywności wody, a w przypadku wyrobów seropodobnych – cechy tekstury i barwy.

W systemach takich jak HACCP, ISO 9001 czy zakładowa kontrola produkcji (ZKP) istotne znaczenie ma możliwość bieżącej oceny stabilności procesu oraz identyfikacji partii, które mogą odbiegać od przyjętych kryteriów jakości. Wyniki uzyskane w niniejszej pracy wskazują, że pomiary parametrów elektrycznych – ze względu na nieniszczący charakter, stosunkowo krótki czas trwania pojedynczego pomiaru oraz możliwość stosowania ujednoliconej procedury – mogą w przyszłości pełnić funkcję uzupełniającego narzędzia wspierającego nadzór jakości. W odniesieniu do serów dojrzewających szczególnie obiecujące są zastosowania związane z monitorowaniem przebiegu dojrzewania (kontrola zmian proteolitycznych i aktywności wody), natomiast w przypadku wyrobów seropodobnych – z oceną powtarzalności tekstury i barwy oraz zgodności z profilem jakości deklarowanym przez producenta. Szczególnie wartościowe z tego punktu widzenia wydają się zależności między parametrami elektrycznymi a udziałem frakcji azotu rozpuszczalnego oraz aktywnością wody, które są ściśle związane ze zmianami strukturalnymi zachodzącymi w produktach podczas dojrzewania.

Należy jednak wyraźnie podkreślić, że przedstawiona ocena odnosi się wyłącznie do warunków laboratoryjnych. Badania przeprowadzono na ściśle zdefiniowanym materiale i w kontrolowanych warunkach pomiaru. Zastosowanie metody elektrycznej w rzeczywistym środowisku produkcyjnym wymagałoby dalszych prac, obejmujących m.in. walidację modeli na większej liczbie partii, uwzględnienie zmienności surowca, zróżnicowania receptur oraz wpływu czynników procesowych typowych dla skali przemysłowej. Dopiero takie badania pozwoliłyby ocenić powtarzalność uzyskanych zależności oraz ich odporność na zakłócenia wynikające z normalnych wahań procesu technologicznego. Dotyczy to zarówno potencjalnego wykorzystania metody jako wskaźnika dojrzałości serów, jak i jako narzędzia kontroli jednorodności oraz cech użytkowych wyrobów seropodobnych.

Z perspektywy nauk o zarządzaniu i jakości **uzyskane wyniki można traktować jako etap kształtowania koncepcji innowacyjnego narzędzia diagnostycznego**, opracowanego na pomiarach elektrycznych, a nie jako gotowe rozwiązanie wdrożeniowe. Metoda ta może w przyszłości wspierać ocenę jednorodności partii, porównywanie wyrobów różniących się składem oraz orientacyjną ocenę stopnia zaawansowania zmian jakościowych, jednak wymaga to dalszych badań ukierunkowanych na integrację pomiarów z praktyką przemysłową i istniejącymi systemami nadzoru jakości. W świetle uzyskanych wyników należy przy tym uwzględnić zróżnicowany profil użyteczności narzędzia: w serach dojrzewających – głównie w kontekście kontroli procesów dojrzewania, w wyrobach seropodobnych – przede wszystkim jako wsparcie oceny cech fizykochemicznych istotnych dla percepcji konsumenta.

Podsumowując, wyniki uzyskane w etapie II wskazują na potencjał wykorzystania opracowanej metody elektrycznej jako elementu wspomagającego nadzór jakości tam, gdzie pożądana jest szybka, nieniszcząca informacja o wybranych cechach strukturalnych i składzie serów dojrzewających oraz wyrobów seropodobnych. Ocena ta ma jednak charakter wstępny i odnosi się do poziomu badań laboratoryjnych; pełne rozpoznanie możliwości zastosowań w praktyce wymaga kontynuacji prac w warunkach przemysłowych.

6. Znaczenie teoretyczne i praktyczne badań dla Nauk o Zarządzaniu i Jakości

Przeprowadzone badania wpisują się w obszar nauk o zarządzaniu i jakości, odpowiadając na aktualne wyzwania współczesnego przemysłu spożywczego, w szczególności sektora mleczarskiego. W niniejszej pracy zarządzanie jakością rozumiane jest szerzej niż formalne systemy zarządzania jakością (np. ISO 9001), obejmując projektowanie i nadzorowanie procesów produkcyjnych, dobór narzędzi diagnostycznych oraz podejmowanie decyzji technologicznych opartych na danych pomiarowych. Takie ujęcie jest uzasadnione dynamicznymi zmianami rynkowymi oraz rosnącymi oczekiwaniami konsumentów wobec jakości i bezpieczeństwa wyrobów serowarskich, które skłaniają przedsiębiorstwa do poszukiwania nowych metod monitorowania kluczowych parametrów produktów. Na tym tle praca ma zarówno wymiar teoretyczny – poprzez rozwijanie koncepcji wykorzystania metod elektrycznych jako źródła informacji zarządczej o jakości – jak i wymiar praktyczny, związany z opracowaniem koncepcji innowacyjnego narzędzia oceny jakości bazującego na nieniszczącej metodzie elektrycznej, wstępnie zweryfikowanej w warunkach laboratoryjnych i w dalszej perspektywie mogącej stanowić podstawę rozwiązań wspierających monitorowanie procesów na liniach produkcyjnych.

Z perspektywy teoretycznej jednym z kluczowych aspektów badań jest zastosowanie metod elektrycznych, które umożliwiają szybkie wykrywanie zmian w strukturze oraz składzie produktów serowarskich podczas ich dojrzewania. W pracy przyjęto elektryczny model zastępczy RCC oraz zastosowano analizę regresji do opisu zależności między parametrami elektrycznymi a właściwościami technologicznymi serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych, co przyczynia się do rozwoju metod ilościowego opisu jakości produktów serowarskich w ramach nauk o zarządzaniu i jakości. Oszacowane zależności mogą w przyszłości stanowić podstawę projektowania narzędzi diagnostycznych opartych na pomiarach parametrów elektrycznych, służących do oceny jakości i stopnia dojrzałości wyrobów. Z punktu widzenia teorii zarządzania jakością istotne jest również wskazanie, że dane z metod nieniszczących mogą zasilać systemy monitorowania procesów technologicznych oraz procedury wspomagania decyzji technologicznych i jakościowych. W wymiarze praktycznym wykorzystanie takich narzędzi może ułatwiać bieżącą kontrolę jakości, ograniczanie strat produkcyjnych i ryzyka pojawienia się wadliwych partii, wspierając realizację strategii ukierunkowanych na doskonalenie procesów, takich jak Lean Management czy Total Quality Management (TQM).

W wymiarze praktycznym, z punktu widzenia przedsiębiorstw oraz instytucji odpowiedzialnych za nadzór nad rynkiem, zarządzanie jakością w przemyśle mleczarskim wiąże się również z koniecznością ochrony interesów konsumentów przed praktykami nieuczciwymi, takimi jak fałszowanie produktów, w tym zastępowanie tłuszczu mlekowego tłuszczami roślinnymi. Substytucja tłuszczu mlekowego olejem roślinnym, np. palmowym, może prowadzić do obniżenia walorów jakościowych produktu, co ma istotne konsekwencje zarówno dla konsumenta, jak i przedsiębiorstwa. Fałszowanie produktów wpływa na postrzeganie marki i obniża zaufanie do producenta. W tym kontekście szybkie i czułe narzędzia diagnostyczne opracowane na podstawie pomiarów elektrycznych mogą istotnie wspierać zarządzanie jakością produktu i przeciwdziałanie zafałszowaniom, przyczyniając się do ochrony uczciwej konkurencji oraz bezpieczeństwa żywności. Metody elektryczne, jako alternatywne narzędzia względem klasycznych analiz fizykochemicznych, redukują zapotrzebowanie na odczynniki chemiczne oraz minimalizują konieczność prowadzenia pracochłonnych i czasochłonnych badań laboratoryjnych. Dzięki temu przyczyniają się do zwiększenia efektywności środowiskowej procesów produkcyjnych, co jest zgodne z celami zrównoważonego rozwoju.

Badania nad możliwością szybkiego monitorowania kluczowych parametrów jakości serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych przy użyciu metod elektrycznych mogą znacząco wpłynąć na rozwój narzędzi zarządzania jakością produktu, lepiej dostosowanych do zmieniających się potrzeb rynku. Jednocześnie umożliwiają one przedsiębiorstwom bardziej precyzyjne dostosowanie parametrów jakościowych produktów do preferencji konsumentów oraz szybkie reagowanie na zmiany w popycie czy wymaganiach regulacyjnych. Wymiar praktyczny badań przejawia się zatem w potencjalnej poprawie skuteczności działań operacyjnych, zwiększeniu stabilności jakościowej wyrobów oraz redukcji kosztów związanych z reklamacjami i zwrotami

Znaczenie pracy dysercyjnej dla nauk o zarządzaniu i jakości przejawia się również w rozwijaniu podejść systemowych, które integrują technologie monitorowania jakości z procesami zarządzania strategicznego i operacyjnego w przedsiębiorstwach sektora mleczarskiego. W ujęciu teoretycznym oznacza to rozszerzenie istniejących modeli zarządzania jakością o komponent wykorzystujący dane pomiarowe z metod elektrycznych, natomiast w ujęciu praktycznym – wskazanie, w jaki sposób takie dane mogą zasilać systemy wspomagania decyzji w przedsiębiorstwie. Nowoczesne narzędzia kontroli jakości, w tym analizowane w niniejszej pracy rozwiązania opracowane na podstawie pomiarów parametrów elektrycznych, mogą wspierać rozwój przedsiębiorstw poprzez zwiększenie ich elastyczności

produkcyjnej, poprawę zdolności do szybkiego wdrażania innowacji oraz podniesienie standardów odpowiedzialności społecznej przedsiębiorstw.

Podsumowując, w wymiarze teoretycznym niniejsza praca rozwija wiedzę na temat możliwości wykorzystania właściwości elektrycznych produktów serowarskich jako nośnika informacji o jakości oraz stopniu dojrzałości wyrobów, a także przedstawia wyniki modelowania relacji między parametrami elektrycznymi a cechami technologicznymi i jakościowymi. W wymiarze praktycznym praca oferuje koncepcję innowacyjnego narzędzia diagnostycznego, które – po dalszej weryfikacji i adaptacji – może wspierać przedsiębiorstwa w doskonaleniu systemów nadzoru nad procesem dojrzewania, w ograniczaniu ryzyka zafałszowań oraz w bardziej efektywnym wykorzystaniu zasobów. Wnioski wynikające z badań stanowią wkład w rozwój zarządzania jakością, oferując praktyczne rozwiązania wspierające skuteczne funkcjonowanie przedsiębiorstw w warunkach współczesnej konkurencji rynkowej. Poprawa procesów kontroli jakości, redukcja kosztów operacyjnych oraz minimalizacja ryzyka wystąpienia wad produktów są kluczowymi celami, które – dzięki zastosowaniu nowatorskich metod i narzędzi elektrycznych – mogą zostać osiągnięte z większą efektywnością i precyzją.

7. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na realizację celu głównego rozprawy, polegającego na określeniu możliwości zastosowania innowacyjnego narzędzia pomiarowego do oceny jakości produktów serowarskich – serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych – wykorzystującego pomiar wybranych parametrów elektrycznych, oraz na rozpoznaniu jego przydatności i ograniczeń względem metod referencyjnych. Analiza wyników uzyskanych z wykorzystaniem czujników CPD i CPM umożliwiła ocenę czułości i powtarzalności pomiarów oraz identyfikację kluczowych obszarów potencjalnego zastosowania narzędzia w monitorowaniu procesu dojrzewania.

Wykazano, że przebieg zmian jakościowych w serach typu holenderskiego i wyrobach seropodobnych znacząco się różni. W serach dojrzewających obserwowano intensywną proteolizę, spadek twardości, obniżenie sprężystości i zmiany barwy, natomiast w wyrobach seropodobnych procesy te zachodziły wolniej i w mniejszej skali, co wynikało z odmiennego składu surowcowego (brak tłuszczu mlecznego, obecność tłuszczów roślinnych i emulgatorów). Odpowiedź elektryczna odzwierciedlała te różnice: w serach parametry elektryczne były najsilniej powiązane ze wskaźnikami proteolizy i aktywnością wody, a w wyrobach seropodobnych – z teksturą (zwłaszcza elastycznością) oraz barwą.

Czujnik CPM zapewnił stabilniejsze i bardziej powtarzalne pomiary niż CPD, umożliwiając wiarygodną rejestrację zmian elektrycznych w szerokim zakresie częstotliwości oraz budowę modeli regresyjnych dla próbek dojrzałych. Uzasadnia to traktowanie zastosowanego narzędzia pomiarowego, wykorzystującego parametry elektryczne, jako uzupełnienia klasycznych metod referencyjnych, przy czym profil jego zastosowań jest zróżnicowany w zależności od rodzaju produktu serowarskiego. Jednocześnie należy podkreślić, że badania miały charakter laboratoryjny, a pełna ocena możliwości wdrożeniowych wymaga dalszych prac w skali przemysłowej, z uwzględnieniem zmienności surowca, zróżnicowania receptur oraz specyfiki serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych.

Przeprowadzone badania pozwoliły na realizację celu głównego rozprawy oraz wszystkich celów szczegółowych Etapu I (E1.1–E1.3) i Etapu II (E2.1–E2.4), co odzwierciedla zarówno aspekt poznawczy, jak i aplikacyjny pracy.

Na podstawie uzyskanych wyników oraz zrealizowanych etapów badań sformułowano poniższe wnioski, odnoszące się bezpośrednio do przyjętych hipotez badawczych oraz do realizacji celów szczegółowych w etapie I i II.

1. Całkowita substytucja tłuszczu mlecznego olejem palmowym istotnie modyfikowała właściwości wyrobów seropodobnych. Produkty te charakteryzowały się większą twardością, stabilniejszą strukturą oraz mniejszą dynamiką zmian tekstury i barwy, a także wyższymi wartościami przewodnictwa i pojemności elektrycznej, co wskazuje na odmienny mechanizm polaryzacji i mniej intensywny przebieg dojrzewania. **Hipoteza H1 została potwierdzona.**
2. Czujnik CPM zapewnił stabilniejsze, mniej podatne na zakłócenia i bardziej powtarzalne wyniki niż czujnik CPD, umożliwiając wiarygodne pomiary w szerokim zakresie częstotliwości oraz bardziej użyteczne modelowanie zależności między parametrami elektrycznymi a technologicznymi. Wyniki badań pilotażowych wskazały na ograniczenia czujnika CPD, co uzasadniło zastosowanie czujnika CPM w etapie II. **Hipoteza H2 została potwierdzona.**
3. Zmiany parametrów elektrycznych odzwierciedlały przebieg kluczowych zmian jakościowych, przy czym w serach dojrzewających najsilniejsze zależności dotyczyły wskaźników proteolizy i aktywności wody, a w wyrobach seropodobnych – cech tekstury i barwy. Uzyskane wyniki w znacznej mierze potwierdzają hipotezę H3, wskazując jednocześnie na potrzebę dalszych badań w rozszerzonych warunkach doświadczalnych.
4. Zastosowane w pracy innowacyjne narzędzie pomiarowe, obejmujące czujnik CPM oraz procedurę analizy parametrów elektrycznych (Z, G, Cp, Cs), wykazało wysoką przydatność jako rozwiązanie wspomagające ocenę jakości i przebiegu dojrzewania serów, uzupełniając klasyczne metody referencyjne jako element systemu monitorowania jakości. Uzyskane wyniki analizy regresji dla produktów dojrzałych wykazały, że w serach szczególnie duży potencjał mają modele opisujące zależności między parametrami elektrycznymi a wskaźnikami proteolizy i aktywności wody, natomiast w wyrobach seropodobnych – modele odnoszące się do tekstury oraz barwy. Wyniki badań **częściowo potwierdziły hipotezę H4**, co uzasadnia potrzebę dalszej weryfikacji modeli w rozszerzonych warunkach doświadczalnych.
5. Uzyskane wyniki potwierdzają potencjał zastosowania innowacyjnego narzędzia pomiarowego, wykorzystującego parametry elektryczne, jako narzędzia wspierającego nadzór jakości w systemach takich jak HACCP, ISO 9001 i ZKP, szczególnie w zakresie szybkiej, nieniszczącej oceny zmian strukturalnych podczas dojrzewania. Ocena ta dotyczy jednak warunków laboratoryjnych, a pełne rozpoznanie możliwości wdrożeniowych wymaga dalszych badań prowadzonych w skali przemysłowej, z uwzględnieniem specyfiki poszczególnych grup produktów (serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych).

Podsumowując, przeprowadzone badania potwierdzają przydatność metod elektrycznych, opracowanych na podstawie pomiarów parametrów elektrycznych – przewodnościowych (Z , G) i pojemnościowych (C_p , C_s), jako elementu wspierającego ocenę jakości serów dojrzewających i wyrobów seropodobnych. Metoda ta, dzięki swojej szybkości, nieniszczącemu charakterowi oraz wrażliwości na zmiany strukturalne, może stanowić wartościowe uzupełnienie klasycznych metod oceny jakości. Jej zastosowanie sprzyja lepszemu monitorowaniu stabilności procesów technologicznych oraz kontroli przebiegu dojrzewania w warunkach przemysłowych. W połączeniu z analizami statystycznymi stanowi ona podstawę do opracowania innowacyjnego, zintegrowanego narzędzia oceny jakości i dojrzałości produktów serowarskich, które w przyszłości może wspierać procesy decyzyjne w zarządzaniu jakością w przemyśle mleczarskim.

Bibliografia:

- Adetunji, C. O., Olaniyan, O. T., Ukhurebor, K. E., Oloke, J. K., Olaleye, O. O., Ubi, B. E., & Hefft, D. I. (2022). Recent Advances in Dairy Industries: Monitoring, Standard, Quality, and Process. *Fermentation and Algal Biotechnologies for the Food, Beverage and Other Bioproduct Industries*, 69-86. eBook ISBN 9781003178378
- Ahmed J., Ramaswamy H.S., Raghavan V.G.S. (2007). Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature. *Journal of Food Engineering*, **82**(3), 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.049>
- Aizaki, H., & Takeshita, H. (2023). Comparing consumer preferences for sustainable dairy activities among countries. *Behaviormetrika*, **50**(2), 653-677.
- Aljewicz, M., Cichosz, G., & Kowalska, M. (2011). Produkty seropodobne, analogi serów topionych i dojrzewających. *Żywność Nauka Technologia Jakość* **18**(5).
- Aljewicz, M., Cichosz, G., Nalepa, B., & Bielecka, M. (2016). The effect of milk fat substitution with palm fat on lactic acid bacteria counts in cheese-like products. *LWT-Food Science and Technology*, **66**, 348-354 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.042>
- Alonso, M. E., González-Montaña, J. R., & Lomillos, J. M. (2020). Consumers' concerns and perceptions of farm animal welfare. *Animals*, **10**(3), 385. <https://doi.org/10.3390/ani10030385>
- Amarita, F., Requena, T., Taborda, G., Amigo, L., & Pelaez, C. (2001). Lactobacillus casei and Lactobacillus plantarum initiate catabolism of methionine by transamination. *Journal of Applied Microbiology*, **90**(6), 971-978.
- Amer, D. A., Albadri, A. A., El-Hamshary, H. A., Nehela, Y., Makhoulf, A. H., El-Hawary, M. Y., & Awad, S. A. (2023). Changes in sensory properties, physico-chemical characteristics, and aromas of Ras cheese under different coating techniques. *Foods*, **12**(10), 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12102023>
- Arslan, N. (2014). Obesity, fatty liver disease and intestinal microbiota. *World Journal of Gastroenterology: WJG*, **20**(44), 16452. doi: <https://doi.org/10.3748/wjg.v20.i44.16452>
- Azarmipour, M., Elfaham, H., Gries, C., Kleinert, T., & Epple, U. (2020, July). A service-based architecture for the interaction of control and MES systems in industry 4.0 environment. In *2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (Vol. 1, pp. 217-222). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INDIN45582.2020.9442083>
- Bach, A., Terré, M., & Vidal, M. (2020). Symposium review: Decomposing efficiency of milk production and maximizing profit. *Journal of Dairy Science*, **103**(6), 5709-5725.
- Balakrishnan, S., & Prakash, J. (2016). Influence of fat type on physical and microstructural characteristics of processed cheese analogues. *Journal of Food Quality*, **39**(3), 210–219.
- Balon, U., Dziadkowiec, J. M., & Dobrowolska, M. N. (2024). Key performance indicators (kpis) in the Quality Management System. *International Journal for Quality Research*, **18**(2). <https://doi.org/10.24874/IJQR18.02-10>
- Banach, J. K., Kielczewska, K., Pietrzak-Fiećko, R., Smoczyński, M., & Grzywińska-Rapca, M. (2024). Applicability of electrical parameters for controlling the quality of skim milk with various dry matter contents. *International Dairy Journal*, **153**, 105905. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.105905>
- Banach, J. K., Żywica, R., & Grzywińska-Rapca, M. (2024). Possibilities of quality management of chicken meat produced in polish industrial conditions using an own-construction device for poultry electric stunning in a water bath. *Applied Sciences*, **14**(13), 5700. <https://doi.org/10.3390/app14135700>
- Banach, J. K., Żywica, R., Nieradko, I., & Staniewski, B. (2012). Studies on determination of mathematical relationships between rapeseed oil content and electrical properties of butter and fat mixes. *Journal of Food Engineering*, **112**(4), 346-351. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.04.010>

- Banach, J. K., Żywica, R., Szpendowski, J., & Kielczewska, K. (2012). Possibilities of using electrical parameters of milk for assessing its adulteration with water. *International Journal of Food Properties*, 15(2), 274-280. <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.483614>
- Banach, J. K., Żywica, R., Zadroga, I. U., & Staniewska, K. (2014). Predicting sunflower oil content in mixed fat spreads based on electrical properties. *Towaroznawcze Problemy Jakości*, (1), 73-83.
- Banach, J.K., Żywica, R., & Kielczewska, K. (2008). Effect of homogenization on milk conductance properties. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 58(1).
- Bannikova, N. V., Kostyuchenko, T. N., Telnova, N. N., & Vaytsekhovskaya, S. S. (2019). Evaluation of the perspective of the dairy business development based on quality management. *International Journal for Quality Research*, 13(3), 625. <https://doi.org/10.24874/IJQR13.03-08>
- Barać, M., Vučić, T., Barać, N., Sredović Ignjatović, I., Hasanbašić, N., Dizdarević, T., ... & Sarić, Z. (2024). Quality and healthy aspects of Lider cheese at different stages of ripening. *Mljekarstvo: časopis za unapređenje proizvodnje i prerade mlijeka*, 74(3), 195-207. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2024.0303>
- Baran, J., Kowalczyk, K., & Tereskiewicz, K. (2024). Determinants of changes in perception of the quality of dairy products by polish consumers. *Journal of Entrepreneurship & Sustainability Issues*, 12(1). [https://doi.org/10.9770/jesi.2024.12.1\(20\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2024.12.1(20))
- Barsoukov, E. & Macdonald, J.R. (eds.), 2005. *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. <https://doi:10.1002/0471716243>.
- Baryłko-Pikielna, N. I. N. A. (1995). Konsument a jakość żywności. *Żywność. Technologia. Jakość*, 4(5), 3-10.
- Baryłko-Pikielna, N., & Matuszewska, I. (2009). *Sensoryczne badania żywności: podstawy, metody, zastosowania*. Wydawnictwo Naukowe PTTŻ. ISBN: 9788392464693
- Beresford, T., & Williams, A. (2004). The microbiology of cheese ripening. In *Cheese: chemistry, physics and microbiology* (Vol. 1, pp. 287-317). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S1874-558X\(04\)80071-X](https://doi.org/10.1016/S1874-558X(04)80071-X)
- Bernat, S., Aydogan, C., & Yilmaz, M. T. (2020). Plant-based cheese analogues: an overview of compositional, sensorial, and functional aspects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(19), 3297–3310
- Bielecka, M., & Cichosz, G. (2020). The effect of milk fat replacement and the addition of *Lactobacillus paracasei* LPC-37 on the sensory properties of cheeses. *Mljekarstvo: časopis za unapređenje proizvodnje i prerade mlijeka*, 70(1), 28-39. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2020.0103>
- Biuro Analiz i Strategii Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa (KOWR), Rośnie eksport serów i twarogów z Polski, Raport z dn. 29.09.2021 <https://www.gov.pl/attachment/1164c077-2506-4a17-95a6-6fff3555913f> (data dostępu 03.08.2025)
- Biuro Analiz i Strategii Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa, Nr 46/2024, Rynek Produktów Mlecznych, <https://www.gov.pl/attachment/92d07458-c6a9-4ef2-9a5a-26473c6791f7> (data dostępu 03.08.2025)
- Bomba, M. Y., & Susol, N. Y. (2020). Main requirements for food safety management systems under international standards: BRC, IFS, FSSC 22000, ISO 22000, Global GAP, SQF. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. Series: Food Technologies, 22(93), 18-25. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9304>
- Bouzemrak, Y., & Marvin, H. J. (2016). Prediction of food fraud type using data from Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) and Bayesian network modelling. *Food Control*, 61, 180-187 <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.026>
- Bronakowski, H., Hościłowicz, E., & Widelska, U. (Eds.). (2007). Zarządzanie marketingowe we współczesnym handlu i usługach. *Wydawnictwo Wyższej Szkoły Finansów i Zarządzania*.
- Burmistrov, D. E., Pavkin, D. Y., Khakimov, A. R., Ignatenko, D. N., Nikitin, E. A., Lednev, V. N., ... & Zvyagin, A. V. (2021, December). Application of optical quality control technologies in the dairy industry: An overview. In *Photonics* (Vol. 8, No. 12, p. 551). MDPI. <https://doi.org/10.3390/photonics8120551>

- Caboni, P., Maxia, D., Scano, P., Addis, M., Dedola, A., Pes, M., ... & Pirisi, A. (2019). A gas chromatography-mass spectrometry untargeted metabolomics approach to discriminate Fiore Sardo cheese produced from raw or thermized ovine milk. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 5005-5018. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15885>
- Caicedo-Eraso, J. C., Díaz-Arango, F. O., & Osorio-Alturo, A. (2020). Espectroscopia de impedancia eléctrica aplicada al control de la calidad en la industria alimentaria. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(1), 100-119. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num1_art:951
- Carneiro, F., Rodrigues, G., Carvalho, A. M., & Moreira, B. (2025). Improving cheese production capacity in a dairy company: a Lean Six Sigma approach for enhanced efficiency and performance. *International Journal of Lean Six Sigma*.
- Chadha, M., Singh, K., Choudhary, S., & Shukla, R. (2023). Food Safety Forensics: Investigating Food Fraud, Foreign Substances, and Contaminants. *International Journal of Medical Toxicology & Legal Medicine*, 26(3and4), 121-129. <https://doi.org/10.5958/0974-4614.2023.00059.1>
- Cheng, C.-W., Weng, Y.-K., Chen, J. et al. (2021). Dielectric properties and regression modeling in multi-component foods. *Foods*, 9, 1472
- Choudhary, A., Gupta, N., Hameed, F., & Choton, S. (2020). An overview of food adulteration: Concept, sources, impact, challenges and detection. *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 2564-2573. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.967834>
- Chu, R., Tang, T., & Hetherington, M. M. (2024). The impact of packaging attributes on portion decisions: Consumer values are important. *Nutrition Bulletin*, 49(3), 314-326. <https://doi.org/10.1111/nbu.12688>
- Cichosz, G., & Czeczot, H. (2010). Sery dojrzewające–żywność funkcjonalna. *Przegląd Mleczarski*, 4.
- Cichosz, G., Konopka, A., & Zalecka, A. (2005). Dojrzewanie sera Gouda-monitoring z zastosowaniem metody odwolawczej i metod alternatywnych. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 12(4), 52-61.
- Codex General Standard for Cheese CXS 283-1978 („Ogólny standard – ser”), Codex Group Standard for Unripened Cheese CXS 221-2001 („Standard dla serów niedojrzewających”), Codex Standard for Cheese in Brine CXS 208-1999 („Standard dla serów w solance”) oraz Codex Standard for Cottage Cheese CXS 273-1968
- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Colombo, A. W., Mendes, J. M., Leitão, P., & Karnouskos, S. (2012, October). Service-oriented SCADA and MES supporting petri nets based orchestrated automation systems. In *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 6144-6150). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6389076>
- cost of loss of image with customer complaints. *Total Quality Management & Business Excellence*, 29(13-14), 1633-1647. <https://doi.org/10.1080/14783363.2017.1289815>
- Croissant, A. E., Watson, D. M., & Drake, D. M. (2011). Application of sensory and instrumental volatile analyses to dairy products. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2(1), 395-421. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022510-133653>
- Crosby P.B. 1980. *Quality is Free: The Art of Making Quality Certain*. Free Press, New York.
- Cruz, A. G., Balthazar, C. F., Rodrigues, B. L., Carvalho, C., Gänzle, M., & Jeon, I. J. (2019). Cheese processing: Technological, microbiological and nutritional aspects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(13), 2386–2399
- Cunha, C. R., Dias, A. I., & Viotto, W. H. (2010). Microstructure, texture, colour and sensory evaluation of a spreadable processed cheese analogue made with vegetable fat. *Food Research International*, 43(3), 723-729. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.11.009>
- Dabbou, S., Maatallah, S., Castagna, A., Guizani, M., Sghaeir, W., Hajlaoui, H., & Ranieri, A. (2017). Carotenoids, phenolic profile, mineral content and antioxidant properties in flesh and peel of *Prunus persica* fruits during two maturation stages. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72(1), 103-110. <https://doi.org/10.1021/jf102807t>

- Damez, J. L., Clerjon, S., Abouelkaram, S., & Lepetit, J. (2007). Dielectric behavior of beef meat in the 1–1500 kHz range: *Simulation with the Fricke/Cole–Cole model*. *Meat Science*, 77(4), 512-519. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.028>
- Değirmenci, Ö. C. (2025). Consumption of Cheese by Vegetarians and Vegans: Production, Ethics, and Market Trends. In *Global Perspectives on Cheese Tourism* (pp. 161-178). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3490-4.ch010>
- Delgado, C., Guinard, J. X. (2011). How do consumer hedonic ratings for extra virgin olive oil relate to quality ratings by experts and descriptive analysis ratings?. *Food Quality and Preference*, 22(2), 213-225. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2010.10.004>
- Djekic, I., Tomic, N., Smigic, N., Tomasevic, I., Radovanovic, R., & Rajkovic, A. (2014). Quality management effects in certified Serbian companies producing food of animal origin. *Total Quality Management & Business Excellence*, 25(3-4), 383-396.
- Djekić, I., Smigic, N., Miloradovic, Z., Aleksic, B., Maslovarić, M., Jovanović, R., ... & Miocinovic, J. (2024). Level of Adoption of Hygiene Practices in Small-Scale Dairy Plants in Serbia. *Foods*, 13(15), 2470. <https://doi.org/10.3390/foods13152470>
- Dora, M., Kumar, M., Van Goubergen, D., Molnar, A. i Gellynck, X. (2013). System
- Durante, G., Becari, W., Lima, F. A., & Peres, H. E. (2015). Electrical impedance sensor for real-time detection of bovine milk adulteration. *IEEE Sensors Journal*, 16(4), 861-865. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2494624>
- Dz. U. 2022 poz.1220, <https://dziennikustaw.gov.pl/DU/2022/1220> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R1169> (data dostępu 03.08.2025)
- El-Nabawy, M., Awad, S., & Ibrahim, A. (2023). Validation of the methods for the non-milk fat detection in artificially adulterated milk with palm oil. *Food Analytical Methods*, 16(4), 798-807. <https://doi.org/10.1007/s12161-023-02465-w>
- El-Salam, B. A. A. (2015). Effect of milk fat replacement with vegetable oil and/or whey protein concentrate on microstructure, texture and sensory characteristics of fresh soft cheese.
- El-Wahed, E. M. A., & Hassanien, M. F. (2019). CHEMICAL, RHEOLOGICAL AND SENSORY CHARACTERISTICS OF PROCESSED CHEESE SPREAD ANALOGUES. *Carpathian Journal of Food Science & Technology*, 11(1).
- European Commission. (2021). EU Common Agricultural Policy — Modernization of dairy infrastructure. Commission Staff Working Document, Brussels. https://commission.europa.eu/system/files/2020-06/db_2021_programme_statement_common_agricultural_policy_cap_eagf_eafrd.pdf(data dostępu 03.08.2025) europejskich małych i średnich przedsiębiorstw spożywczych. *Kontrola żywności*, 31 (2),
- Everard, C. D., O’Callaghan, D. J., O’Donnell, C. P., & Sheehan, J. J. (2015). Cheese matrix development during maturation: Physical, chemical and microbial changes. *International Dairy Journal*, 43, 15–2
- Feigenbaum, A. V. (1999). The new quality for the twenty-first century. The TQM magazine, 11(6), 376-383. <https://doi.org/10.1108/09544789910287656>
- Fernandes, A. C., Sampaio, P., Sameiro, M., & Truong, H. Q. (2017). Supply chain management and quality management integration: A conceptual model proposal. *International Journal of quality & reliability management*, 34(1), 53-67. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-03-2015-0041>
- Food and Drug Administration (FDA) <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents>
- Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. (2017). Fundamentals of cheese science (Vol. 1, p. 271). Boston, MA, USA: Springer.
- Gandhi, K., Sharma, R., Gautam, P. B., & Mann, B. (2020). Chemical quality assurance of milk and milk products (p. 202). Singapore: Springer.
- Gaworski, M. (2021). Implementation of technical and technological progress in dairy production. *Processes*, 9(12), 2103. <https://doi.org/10.3390/pr9122103>

- Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghatreh-Samani, N., Naderi-Boldaji, M., Forina, M., & Bonyadian, M. (2017). Development of two dielectric sensors coupled with computational techniques for detecting milk adulteration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 266-278. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.005>
- Ghoshinde, K., & Chaskar, U. (2024). Detection and classification of urea adulteration in milk with deep neural networks. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(3), 14319-14326. <https://doi.org/10.48084/etasr.7091>
- Giannakourou, M., & Taoukis, P. (2020). Holistic approach to the uncertainty in shelf life prediction of frozen foods at dynamic cold chain conditions. *Foods*, 9(6), 714. <https://doi.org/10.3390/foods9060714>
- Giha, V., Ordoñez, M. J., & Villamil, R. A. (2021). How does milk fat replacement influence cheese analogue microstructure, rheology, and texture profile?. *Journal of food science*, 86(7), 2802-2815. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15799>
- Goetsch, D. L., & Davis, S. B. (2014). Quality management for organizational excellence (Vol. 427). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Goyal, M., Kumar, V., & Verma, A. (2022). Food adulteration: A review of challenges and regulatory frameworks. *Food Control*, 133, 108573.
- Grossi, M., Riccò, B. (2017). Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: A review. *Journal of sensors and sensor systems*, 6(2), 303-325. <https://doi.org/10.5194/jsss-6-303-2017>
- Grunert, K. G. (2005). Food quality and safety: consumer perception and demand. European review of agricultural economics, 32(3), 369-391. <https://doi.org/10.1093/eurrag/jbi011>
- Grzybowska-Brzezińska, M. (2008). Marketingowe aspekty jakości produktów spożywczych. *Problemy Jakości*, (7), 43-48. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2062-4_1
- Grzybowska-Brzezińska, M., Rudzewicz, A. (2013). Wpływ marketingu sensorycznego na decyzje konsumentów (znaczenie zmysłów). *Handel wewnętrzny*, (6 (347), 68-79
- Guerrero, L., Claret, A., Verbeke, W., Enderli, G., Zakowska-Biemans, S., Vanhonacker, F., Hersleth, M. (2010). Perception of traditional food products in six European regions using free word association. *Food quality and preference*, 21(2), 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2009.06.003>
- Gurtler, J. B., Doyle, M. P., & Kornacki, J. L. (2014). The microbiological safety of spices and low-water activity foods: Correcting historic misassumptions. In *The microbiological safety of low water activity foods and spices* (pp. 3-13). New York, NY: Springer New York.
- GUS (2023). Rocznik statystyczny rolnictwa https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5515/6/17/1/rocznik_statystyczny_rolnictwa_2023_2_2.pdf (data dostępu 03.08.2025)
- Habliza, R., Abd Elhamid, A., Shamsia, S., Salama, W., & Awad, S. (2022). Production of Ras Cheese Analogue by Partially or Totally Substitution of Milk Fat with Palm Oil. *Alexandria Science Exchange Journal*, 43(2), 343-352. <https://doi.org/10.3390/foods12102023>
- Haider, A., Iqbal, S.Z., Bhatti, I.A., Alim, M.B., Waseem, M., Iqbal, M., & Mousavi Khaneghah, A. (2024). Food authentication, current issues, analytical techniques, and future challenges: A comprehensive review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 23(3), e13360. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13360>
- Hamrol, A. (2023). Zarządzanie i inżynieria jakości: ze spojrzeniem w rzeczywistość 4.0.
- Hanáková, Z., Buňka, F., Pavlínek, V., Hudečková, L., & Janiš, R. (2013). The effect of selected hydrocolloids on the rheological properties of processed cheese analogues made with vegetable fats during the cooling phase. *International Journal of Dairy Technology*, 66(4), 484-489. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12066>
- Hayaloglu, A. A., & Karabulut, I. (2013). Primary and secondary proteolysis in eleven Turkish cheese varieties. *International journal of food properties*, 16(8), 1663-1675.
- Hickey, C. D., Auty, M. A. E., Wilkinson, M. G., & Sheehan, J. J. (2015). The influence of cheese manufacture parameters on cheese microstructure, microbial localisation and their interactions

- during ripening: A review. *Trends in food science & technology*, 41(2), 135-148. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.10.006>
- Huang, Y. M., Chen, C. K., & Hsu, C. L. (2020). Non-thermal atmospheric gas plasma for decontamination of sliced cheese and changes in quality. *Food Science and Technology International*, 26(8), 715-726 <https://doi.org/10.1177/1082013220925931>
- Hrubá, R., & Sudzina, F. (2017). The impact of gender on control behavior when purchasing a new type of cheese. *Ekonomia. Wrocław Economic Review*, 23(4), 207-215. <https://doi.org/10.19195/2084-4093.23.4.16>
- IERiGŻ, Rocznik statystyczny sektora mleczarskiego 2022. https://ierigz.waw.pl/download/25038-mleko_63_22-net.pdf (data dostępu 03.08.2025)
- International Dairy Federation (IDF). (2024). Global dairy market trends 2023–2024. Brussels: IDF.
- Islam, T., Salamat, A., Singh, S. K., & Rehman, M. (2022). A direct AC cross conductive sensor for milk quality measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-8. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3147313>
- ISO 16649-2:2001 „Mikrobiologia żywności i pasz — Oznaczanie bakterii β -glukuronidazo-dodatnich *Escherichia coli* — Metoda liczby kolonii”,
- ISO 21527-1/2:2008 „Mikrobiologia żywności i pasz — Oznaczanie liczby drożdży i pleśni”
- ISO 21543:2006 „Sery — Oznaczanie aktywności wody”
- ISO 22935-2:2009 „Mleko i przetwory mleczne — Analiza sensoryczna — Część 2: Zalecane metody oceny sensorycznej”
- ISO 23319:2022 (IDF 250:2022) „Sery i sery topione, kazeiny i kazeiniany — Oznaczanie zawartości tłuszczu — Metoda grawimetryczna”,
- ISO 5943:2006 „Sery i sery topione — Oznaczanie zawartości chlorków — Metoda miareczkowania potencjometrycznego”, wykorzystywana do oznaczania zawartości soli; ISO 1735:2004 „Sery i sery topione — Oznaczanie zawartości tłuszczu — Metoda van Gulika”
- ISO/TS 17996:2023 (IDF/RM 205:2023) „Sery — Oznaczanie właściwości reologicznych metodą jednoosiowego ściskania” oraz ISO 5534:2004 „Sery i sery topione — Oznaczanie zawartości suchej masy — Metoda referencyjna”.
- Iwanicka, A. (2009). Postrzeganie jakości produktów mleczarskich przez nabywców finalnych. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 11(3).
- Janczewska, D., & Janczewski, J. (2022). System zarządzania jakością jako element logistyki produkcji w branży spożywczej. *Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie*, 32(1), 183-195. https://doi.org/10.25312/2391-5129.32/2021_13djjj
- Jesiak, Z. F., Zuraw, J., & Chojnowski, W. (1997). Wydatek sera w zależności od rodzaju stosowanego zakwasu i pory roku. *Przemysł Spożywczy*, 51(08), 36-39.
- Jeznach, M. (2008). Uwarunkowania ekonomiczno-organizacyjne jakości i bezpieczeństwa żywności. *Rozprawy Naukowe i Monografie. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*, (331), 1-174.
- Jha, S. N., Narsaiah, K., Basediya, A. L., Sharma, R., Jaiswal, P., Kumar, R., & Bhardwaj, R. (2011). Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods—a review. *Journal of Food Science and Technology*, 48(4), 387–411. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x>
- Johnson, M. E., Kapoor, R., McMahon, D. J., McCoy, D. R., & Narasimmon, R. G. (2019). Reduction of sodium and fat levels in natural and processed cheeses: Scientific and technological aspects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(2), 715–737. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00080.x>
- Jolliffe, I. T., Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kamath, R., Basak, S., & Gokhale, J. (2022). Recent trends in the development of healthy and functional cheese analogues - a review. *LWT*, 155, 112991. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112991>

- Karoui, R., & De Baerdemaeker, J. (2007). A review of the analytical methods coupled with chemometric tools for the determination of the quality and identity of dairy products. *Food Chemistry*, 102(3), 621–640. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.042>
- Kavak, D. D., & Karabiyik, H. (2019). Quality evaluation of kashar cheese: influence of palm oil and ripening period. *Food Science and Technology*, 40(2), 354-360. <https://doi.org/10.1590/fst.39618>
- Kijowski, J., & Sikora, T. (2003). Ustawodawstwo żywnościowe dotyczące bezpieczeństwa zdrowotnego i systemów jego zapewnienia.[W:] *Zarządzanie jakością i bezpieczeństwem żywności. Integracja i informatyzacja systemów*, Kijowski J., Sikora T,(red.). Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 9
- Kilcast, D. (Ed.). (2013). *Instrumental assessment of food sensory quality: A practical guide*. Elsevier.
- Koca, N., Erbay, Z., & Öztürk, M. U. (2022). Regulations and legislations on processed cheese. In *Processed Cheese Science and Technology* (pp. 449-490). *Woodhead Publishing*.
- Konovalenko, I., Radchenko, O., & Babenko, O. (2019). Palm oil usage in the modern food industry: A review. *Food Science and Technology*, 13(2), 123–135.
- Krishnan, A., & Devarajan, Y. (2025). Comprehensive assessment of food safety risks in agriculture and dairy processing. *Nutrire*, 50(1), 43. <https://doi.org/10.1186/s41110-025-00344-4>
- Kumari, K., Chakraborty, S. K., Kishore, A., & Chitranayak. (2024). Development of a parallel plate capacitive sensor-based system for assessing the quality of Paneer (Indian cottage cheese). *Journal of Food Process Engineering*, 47(1), e14515. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14515>
- Ladwein, R., & Romero, A. M. S. (2021). The role of trust in the relationship between consumers, producers and retailers of organic food: A sector-based approach. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 60, 102508. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2021.102508>
- La Gioia, A., Porter, E., Merunka, I., Shahzad, A., Salahuddin, S., Jones, M., & O'Halloran, M. (2018). Open-ended coaxial probe technique for dielectric measurement of biological tissues: challenges and common practices. *Diagnostics*, 8(2), 40. <https://doi.org/10.3390/diagnostics8020040>
- Landaud, S., & Spinnler, H. E. (2017). Fermentations generating the cheese diversity. In *Fermented Foods, Part II* (pp. 451-464). CRC Press.
- Lassoued, R., & Hobbs, J. E. (2015). Consumer confidence in credence attributes: *The role of brand trust*. *Food Policy*, 52, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.12.003>
- Lau, S. K., Dag, D., Ozturk, S., Kong, F., & Subbiah, J. (2020). A comparison between the open-ended coaxial probe method and the parallel plate method for measuring the dielectric properties of low-moisture foods. *Lwt*, 130, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109719>
- Leonga, E. (2020). Perceptions of student preparedness for first year university chemistry studies: A summary for chemistry educators. *Lab Talk*, 64(4), 50-56
- Levak, S., Kos, I., Kalit, S., Dolenčić Špehar, I., Bendelja Ljoljić, D., Rako, A., & Tudor Kalit, M. (2023). Sensory profile of semi-hard goat cheese preserved in oil for different lengths of time. *Sustainability*, 15(20), 14797. <https://doi.org/10.3390/su152014797>
- Luning, P. A., Marcelis, W. J., & Jongen, W. M. F. (2005). Zarządzanie jakością żywności: ujęcie technologiczno-menedżerskie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- Luning, P. A., Marcelis, W. J., & Rovira, J. (2019). Food quality management: technological and managerial principles and practices (2nd ed.). *Wageningen Academic Publishers*. ISBN 9789086863488
- Luning, P., & Marcelis, W. (2025). Food quality management: technological and managerial principles and practices. In *Food quality management*. Wageningen Academic. ISBN:
- Luo, H., Akkermans, S., Verheyen, D., Wang, J., Polanska, M., & Van Impe, J. F. (2024). Tuning and modeling cheese flavor. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(5), e13420. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13420>
- Maaz, M. A. M., & Ahmad, R. (2022). Impact of supply chain performance on organizational performance mediated by customer satisfaction: a study of dairy industry. *Business process management journal*, 28(1), 1-22.

- Mabrook, M. F., Petty, M. C. (2003). Effect of composition on the electrical conductance of milk. *Journal of food engineering*, 60(3), 321-325. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00054-2)
- Malak-Rawlikowska, A., Majewski, E., Arfini, F., & Bellassen, V. (2024). Food Labelling as a Way to Address Trust and Information Asymmetry Issues in Premium Cheese Supply Chains. In *Trust and Supply Chains* (pp. 129-145). Routledge. eBook ISBN 9781032633725
- Malik, M., Gahlawat, V. K., Mor, R. S., Dahiya, V., & Yadav, M. (2022). Application of optimization techniques in the dairy supply chain: a systematic review. *Logistics*, 6(4), 74. <https://doi.org/10.3390/logistics6040074>
- Manning, L., & Soon, J. M. (2014). Developing systems to control food adulteration. *Food Policy*, 49, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.06.005>
- Martínez-Ruiz, M. P., et al. (2021). Food quality labels and consumer trust: The role of food transparency and certification systems. *British Food Journal*, 123(3), 1017–1031. <https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2020-0731>
- Mba, O. I., Dumont, M. J., & Ngadi, M. (2015). Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry—A review. *Food bioscience*, 10, 26-41. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.01.003>
- McSweeney, P. L. (2004). Biochemistry of cheese ripening. *International journal of dairy technology*, 57(2-3), 127-144. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2004.00147.x>
- McSweeney, P. L., & Sousa, M. J. (2000). Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening: A review. *Le Lait*, 80(3), 293-324. <https://doi.org/10.1051/lait:2000127>
- Menozzi, D., Yeh, C. H., Cozzi, E., & Arfini, F. (2022). Consumer preferences for cheese products with quality labels: The case of Parmigiano Reggiano and Comté. *Animals*, 12(10), 1299. <https://doi.org/10.3390/ani12101299>
- Michalczyk, J. (2019). Bezpieczeństwo żywnościowe z perspektywy państw Unii Europejskiej. *Ekonomia Międzynarodowa*, (25), 18-45.
- Mohd Shukri, A., Alias, A. K., Murad, M., Yen, K. S., & Cheng, L. H. (2022). A review of natural cheese and imitation cheese. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(1), e16112. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16112>
- Montgomery, D. C. (2010). A modern framework for achieving enterprise excellence. *International Journal of Lean Six Sigma*, 1(1), 56-65. <https://doi.org/10.1108/20401461011033167>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.
- Mucha, L., & Vinogradov, S. (2025). The impact of national quality labels and protected designations of origin on Hungarian cheese consumers' preferences. *British Food Journal*, 127(13), 338-358. <https://doi.org/10.1108/BFJ-10-2024-1112>
- Munir, M. T., Yu, W., Young, B. R., Wilson, D. I., Information, I., & Centre, C. (2015). The current status of process analytical technologies in the dairy industry. *Trends in Food Science & Technology*, 43(2), 205-218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.010>
- Nelson, S. O. (2006). Dielectric properties of agricultural materials and their applications. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 41(1), 31–47.
- O'Callaghan, T. F., & O'Sullivan, M. G. (2023). Approaches to reduce salt in cheese: Balancing consumer acceptance and safety. *International Journal of Dairy Technology*, 76(1), 12–26
- O'Mahony, J. A., Lucey, J. A., & McSweeney, P. L. H. (2005). Chymosin-mediated proteolysis, calcium solubilization, and texture development during the ripening of Cheddar cheese. *Journal of Dairy Science*, 88(9), 3101-3114. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72992-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72992-1)
- Oakland, J. S. (2012). *Oakland on quality management*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080479781>
- O'Callaghan, D. J., & Guinee, T. P. (2004). Rheology and texture of cheese. *Cheese: Chemistry, physics and microbiology*, 511-540. [https://doi.org/10.1016/s1874-558x\(04\)80080-0](https://doi.org/10.1016/s1874-558x(04)80080-0)
- Ożóg, J. (2010). Danuta Kołożyn-Krajewska, Tadeusz Sikora, Zarządzanie bezpieczeństwem żywności. *Teoria i Praktyka*, (3-4), 225-227.

- Pagkaliwangan, M., Hummel, J., Gjoka, X., Bisschops, M., & Schofield, M. (2019). Optimized continuous multicolumn chromatography enables increased productivities and cost savings by employing more columns. *Biotechnology Journal*, 14(2), 1800179. <https://doi.org/10.1002/biot.201800179>
- Patil, K., Ojha, D., Struckell, E. M., & Patel, P. C. (2023). Behavioral drivers of blockchain assimilation in supply chains—A social network theory perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 192, 122578. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122578>
- Pereira, C. I., Gomes, E. O., Gomes, A. M., & Malcata, F. X. (2008). Proteolysis in model Portuguese cheeses: Effects of rennet and starter culture. *Food Chemistry*, 108(3), 862-868. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.050>
- Pieczonka, W. (2009). Konsumencka struktura jakości produktów mlecznych. *Przegląd Mleczarski*, (02).
- Pliquett, U. (2010). Bioimpedance: a review for food processing. *Food engineering reviews*, 2(2), 74-94. <https://doi.org/10.1007/s12393-010-9019-z>
- Prasanna, S., Verma, P., & Bodh, S. (2024). The role of food industries in sustainability transition: A review. *Environment, Development and Sustainability*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04642-1>
- Priyashantha, H., & Lundh, Å. (2021). Graduate Student Literature Review: Current understanding of the influence of on-farm factors on bovine raw milk and its suitability for cheesemaking. *Journal of Dairy Science*, 104(11), 12173-12183 <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20146>
- Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2003). A complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels. ISBN: 978-0-07-162337-7
- Ranadheera, C. S., Naumovski, N., & Ajlouni, S. (2018). Non-bovine milk products as emerging probiotic carriers: Recent developments and innovations. *Current Opinion in Food Science*, 22, 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.02.010>
- Reps, A., Jankowska, A., & Wiśniewska, K. (2008, July). The effect of high pressures on the yoghurt from milk with the stabilizer. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 121, No. 14, p. 142007). IOP Publishing. <https://doi.org/10.2478/v10020-008-0037-8>
- Rialti, R., Filieri, R., Zollo, L., Bazi, S., & Ciappei, C. (2022). Assessing the relationship between gamified advertising and in-app purchases: a consumers' benefits-based perspective. *International Journal of Advertising*, 41(5), 868-891. <https://doi.org/10.1080/02650487.2022.2025735>
- Rozporządzenie (EWG) 1898/87, <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzienniki-UE/rozporzadzenie-1898-87-w-sprawie-ochrony-oznaczen-stosowanych-w-obrocie-67447366> (data dostępu 03.08.2025)
- Rozporządzenie (UE) 1169/2011, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R1169> (data dostępu 03.08.2025)
- Rozporządzenie (WE) 178/2002, <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzienniki-UE/rozporzadzenie-178-2002-ustanawiajace-ogolne-zasady-i-wymagania-prawa-67427790> (data dostępu 03.08.2025)
- Ruales Guzmán, B. V., & Castellanos Domínguez, O. F. (2023). Benefits on productivity indicators after quality management implementation: evidence in the dairy industry. *International journal of productivity and performance management*, 72(8), 2349-2375. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-04-2021-0219>
- Ruales Guzmán, B. V., & Castellanos Domínguez, O. F. (2023). Benefits on productivity indicators after quality management implementation: evidence in the dairy industry. *International journal of productivity and performance management*, 72(8), 2349-2375.
- Rubio, N., Oubiña, J., & Villaseñor, N. (2014). Brand awareness—Brand quality inference and consumer's risk perception in store brands of food products. *Food quality and preference*, 32, 289-298. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.09.006>
- Rune, C. J. B., Clausen, M. P., & Giacalone, D. (2025). Sensory evaluation of plant-based cheese: a systematic review with a focus on texture and mouthfeel. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-26. <https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2531220>

- Sadat, A., Mustajab, P., & Khan, I. A. (2006). Determining the adulteration of natural milk with synthetic milk using ac conductance measurement. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 472-477. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.062>
- Sambanthamurthi, R., Sundram, K., & Tan, Y. A. (2000). Chemistry and biochemistry of palm oil. *Progress in lipid research*, 39(6), 507-558. [https://doi.org/10.1016/S0163-7827\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0163-7827(00)00015-1)
- Sansalvador, M. E., & Brotons, J. M. (2018). Development of a quantification model for the
- Santolini, E., Bovo, M., Barbaresi, A., Al-Rikabi, S. H. F., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2021, November). CFD modelling of gaseous emissions and dispersion from pig barn to surrounding areas. In 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor) (pp. 320-324). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628541>
- Savaidis, A., Govaris, A., & Tzanetakis, N. (2011). Electrical properties and microbial load of milk treated by conventional pasteurisation and high hydrostatic pressure. *International Dairy Journal*, 21(5), 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.12.003>
- Schieber, A. (2018). Reactions of quinones—Mechanisms, structures, and prospects for food research. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(50), 13051-13055. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05215>
- Scandurra G., Cardillo E., Ciofi C., Ferro L. (2022). UHT milk characterization by electrical impedance spectroscopy. *Applied Sciences*, 12(15), 7559. <https://doi.org/10.3390/app12157559>
- Sensor-Roberts, A., Quint, A., & Chaiprasart, P. (2021). Novel plant-based cheese formulations: The effect of lipid source and structure on texture and acceptance. *Food Hydrocolloids*, 114, 106552
- Shears, P. (2010). Food fraud—a current issue but an old problem. *British Food Journal*, 112(2), 198-213. <https://doi.org/10.1108/00070701011018879>
- Shiota, S., Singh, S., Anshasi, A., & El-Serag, H. B. (2015). Prevalence of Barrett's esophagus in Asian countries: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 13(11), 1907-1918. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2015.07.050>
- Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N., & Najjaran, H. (2022). Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 503-522. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.004>
- Sousa, M. J., Ardö, Y., & McSweeney, P. L. H. (2001). Advances in the study of proteolysis during cheese ripening. *International Dairy Journal*, 11(4-7), 327-345. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(01\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00062-0)
- Spink, J., & Moyer, D. C. (2013). Understanding and combating food fraud. *Journal of Food Science*, 78(9), R1575–R1580.
- Srivastava, A., Sharma, S., & Sahu, J. K. (2025). Quality Assurance and Control in Food and Dairy Products. In *Engineering Solutions for Sustainable Food and Dairy Production: Innovations and Techniques in Food Processing and Dairy Engineering* (pp. 67-95). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75834-8_3
- Stasiuk, E., & Przybyłowski, P. (2008). Wpływ zmodyfikowanego sposobu stosowania KNO₃ na przemiany azotanów [V] i [III] podczas dojrzewania sera tykocinskiego. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 15(2), 74-85.
- Szczepańska K. 2009. Koszty jakości. Rozdz. 3. Koszty jakości w przedsiębiorstwie. 134-
- Sznajder, M., & Tarant, S. (2003). Marka produktów mleczarskich a ich jakość w ocenie konsumentów. *Przegląd Mleczarski*, (06), 214-216.
- Śmiechowska, M., & Filip Kłobukowski, F. (2017). Bezpieczeństwo informacyjne—nowe kryterium jakości żywności w komunikacji rynkowej z konsumentem. *Handel Wewnętrzny*, (1 (366)), 329-339.
- Śmietana, Z., & Soral-Śmietana, M. (2006). Milk components in whey preparations—characteristics and utilisation. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 56(1s), 237-241.
- Świąder, K., Banach, R., & Tan, F. J. (2022). Dairy product consumption and preferences of polish and Taiwanese students—Npd case study. *Applied Sciences*, 12(19), 10138. <https://doi.org/10.3390/app121910138>

- Tambare, P., Meshram, C., Lee, C. C., Ramteke, R. J., & Imoize, A. L. (2021). Performance measurement system and quality management in data-driven Industry 4.0: A review. *Sensors*, 22(1), 224. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2021-0364>
- Tang, Y., Dong, W., Wan, K., Zhang, L., Li, C., Zhang, L., & Liu, N. (2015). Exopolysaccharide produced by *Lactobacillus plantarum* induces maturation of dendritic cells in BALB/c mice. *PLoS One*, 10(11), e0143743. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143743>
- Teece, D. J. (2018). Business models and dynamic capabilities. *Long range planning*, 51(1), 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2017.06.007>
- Teseme, W. B., & Weldeeslassie, H. W. (2020). Review on the study of dielectric properties of food materials. *Am. J. Eng. Technol. Manag*, 5, 76-83. doi: 10.11648/j.ajetm.20200505.11
- Tilocca, B., Costanzo, N., Morittu, V. M., Spina, A. A., Soggiu, A., Britti, D., ... & Piras, C. (2020). Milk microbiota: Characterization methods and role in cheese production. *Journal of Proteomics*, 210, 103534. <https://doi.org/10.1016/j.prot.2019.103534>
- Treszczyńska, b., & zulewska, j. (2016). Przebieg proteolizy w serach o obniżonej zawartości tłuszczu. *Rola procesów technologicznych w kształtowaniu jakości żywności*, 60.
- Upadhyay, N., Kumar, C. M., Sharma, H., Borad, S., & Singh, A. K. (2019). Pulse electric field processing of milk and milk products. *Non-Thermal Processing of Foods*.
- Van Ruth, S. M., Huisman, W., & Luning, P. A. (2017). Food fraud vulnerability and its key factors. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.017>
- Verma, R., Yadav, S. K., Singh, K. R., Verma, R., Kumar, D., & Singh, J. (2023). Laccase-conjugated nanostructured ZnFe2O4/rGO-modified electrode-based interfaces for electrochemical impedance monitoring of adrenaline: a promising biosensor for management of neurodegenerative disorders. *ACS Applied Bio Materials*, 6(12), 5842-5853. <https://doi.org/10.1021/acsabm.3c00968>
- Visciano, P., & Schirone, M. (2021). Food frauds: Global incidents and misleading situations. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 424-442. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.010>
- Vrba, J., & Vrba, D. (2013). Temperature and frequency dependent empirical models of dielectric properties of sunflower and olive oil. *Radioengineering*, 22(4), 1281-1290. <https://doi.org/10.13164/re.2013.1281>
- Wang, H., & Yang, L. (2023). Dielectric constant, dielectric loss, conductivity, capacitance and model analysis of electronic electroactive polymers. *Polymer Testing*, 120, 107965. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107965>
- Wang, Y., Wig, T. D., Tang, J., & Hallberg, L. M. (2003). Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization. *Journal of Food Engineering*, 57(3), 257-268. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00306-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00306-0)
- Weng, Y.-K., Chen, J., Cheng, C.-W. & Chen, C., 2020. Use of modern regression analysis in the dielectric properties of foods. *Foods*, 9(10), 1472. <https://doi.org/10.3390/foods9101472>
- Wiza, P. L. (2022). Consumption of milk and milk products in Poland in the years 2004-2020®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, (2), 5-10.
- Wu, S., Jin, Y., Yang, N., Xu, X., & Xie, Z. (2019). Determination of fat content in UHT milk by electroanalytical method. *Food chemistry*, 270, 538-545. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.119>
- Yao, D., Ranadheera, C. S., Shen, C., Wei, W., & Cheong, L. Z. (2024). Milk fat globule membrane: Composition, production and its potential as encapsulant for bioactives and probiotics. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(33), 12336-12351. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2249992>
- Yener, G., Secer, A., & Ghazalian, P. L. (2023). What factors influence consumers to buy green products? An analysis through the motivation-opportunity-ability framework and consumer awareness. *Sustainability*, 15(18), 13872. <https://doi.org/10.3390/su151813872>
- zarządzania jakością żywności: przegląd strategii oceny i studium wykonalności dla
- Zhang, D., Jiang, K., Luo, H., Zhao, X., Yu, P., & Gan, Y. (2024). Replacing animal proteins with plant proteins: Is this a way to improve quality and functional properties of hybrid cheeses and cheese

- analogs?. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 23(1), e13262.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13262>
- Zhao, H., Wang, Y., & Yang, Y. (2021). Application of spectroscopy and chemometrics in cheese quality analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 246, 118975
- Zhi, R., Zhao, L., Xie, N., Wang, H., Shi, B., & Shi, J. (2016). A framework for establishing standard reference scale of texture by multivariate statistical analysis based on instrumental measurement and sensory evaluation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(1), 286-294.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b03152>
- Zuliani, A., Esbjerg, L., Grunert, K. G., & Bovolenta, S. (2018). Animal welfare and mountain products from traditional dairy farms: How do consumers perceive complexity?. *Animals*, 8(11), 207. <https://doi.org/10.3390/ani8110207>
- Żywica, R. (2010). Zjawiska elektryczne w produkcji i towaroznawczej ocenie jakości mięsa. Olsztyn: Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego. ISBN: 978-83-7299-675-6
- Żywica, R., Banach, J. K., & Kiełczewska, K. (2012). An attempt of applying the electrical properties for the evaluation of milk fat content of raw milk. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 420-424.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.025>

Źródła internetowe

- <https://doi.org/10.14746/rrpr.2021.57.06>
- <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7681-9>
- <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4167-4>
- <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01331.x>
- <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.604890>
- https://wydawnictwo.pttz.org/wp-content/uploads/2018/01/01_Barylko.pdf

Zestawienie tabel

Tabela 1. Przykładowe klasyfikacje serów

Tabela 2. Charakterystyka produkcji i cech głównych typów serów dojrzewających

Tabela 3. Główne grupy czynników kształtujących jakość

Tabela 4. Parametry opisujące jakość handlową serów dojrzewających

Tabela 5. Możliwe relacje między wskaźnikami kosztów jakości w przedsiębiorstwie

Tabela 6. Wybrane analityczne metody sensoryczne stosowane w ocenie jakości serów dojrzewających

Tabela 7. Wpływ składu mleka na zmiany parametrów elektrycznych

Tabela 8. Kierunki wykorzystania metod elektrycznych do kontroli jakości produktów mleczarskich.

Tabela 9. Powiązanie celów badawczych, hipotez oraz zadań badawczych w rozprawie

Tabela 10. Charakterystyka surowca i wyrobów gotowych

Tabela 11. Parametry tekstury sera (S) i wyrobu seropodobnego (WS) przed soleniem.

Tabela 12. Skład chemiczny, aktywność wody (aw) i pH sera typu holenderskiego i wyrobów seropodobnych w czasie 28 dni dojrzewania.

Tabela 13. Istotność różnic między S-WS w czasie 28 dni dojrzewania

Tabela 24. Zmiany wartości ($\bar{x} + SD$) parametrów tekstury serów w czasie 28 dni dojrzewania

Tabela 15. Zmiany wartości ($\bar{x} + SD$) parametrów tekstury wyrobów seropodobnych w czasie 28 dni dojrzewania

Tabela 16. Istotność różnic (p) między parametrami tekstury sera i wyrobu seropodobnego w czasie dojrzewania

Tabela 17. Wartości parametrów elektrycznych serów (S) i wyrobów seropodobnych (WS) przed soleniem, zmierzonych przy $f=1\text{kHz}$, 10kHz , 100kHz

Tabela 18. Relacje między parametrami tekstury, związkami azotowymi i barwy a parametrami elektrycznymi sera w czasie dojrzewania

Tabela 19. Korelacje między składem chemicznym, aktywnością wody, pH i mikroelementami a parametrami elektrycznymi sera dojrzewającego

Tabela 20. Korelacje między parametrami tekstury, związkami azotowymi i barwy a parametrami elektrycznymi wyrobów seropodobnych

Tabela 21. Korelacje między składem chemicznym, aktywnością wody, pH i mikroelementami a parametrami elektrycznymi WS

Tabela 22. Równania regresji opisujące zależności między parametrami elektrycznymi a wskaźnikami jakości serów dojrzewających

Tabela 23. Równania regresji opisujące zależności między parametrami elektrycznymi a wskaźnikami jakości wyrobów seropodobnych (WS) po 28 dniach dojrzewania.

Zestawienie rysunków

Rysunek 1. Najwięksi producenci serów w UE – dane 2023 r.

Rysunek 2. Produkcja serów podpuszczkowych dojrzewających w Polsce

Rysunek 3. Podział percepcji jakości konsumenta

Rysunek 4. Postrzeganie jakości żywności przez konsumentów i producentów

Rysunek 5. Etapy i elementy systemu kontroli jakości w przemyśle mleczarskim

Rysunek 6. Krzywa kosztów jakości

Rysunek 7. Zmiany impedancji rzeczywistej i urojonej względem częstotliwości oraz modułu i kąta fazowego względem częstotliwości i impedancji urojonej względem części rzeczywistej

Rysunek 8. Wykorzystanie metod elektrycznych w kontroli jakości produktów mleczarskich

Rysunek 9. Modele właściwości elektrycznych produktów mleczarskich – (a) RC i (b) R-CPE

Rysunek 10. Schemat produkcyjny z zakresem prowadzonych badań w etapie I i II

Rysunek 11. Zestaw pomiarowy (a) oraz schemat układu pomiarowego (b) do badania ich właściwości elektrycznych (1 - płaszcz wodny; 2 - badana próbka; 3 - pojemnik szklany z elektrodami, w etapie II), wykorzystany do innowacyjnej metody oceny jakości serów i wyrobów seropodobnych.

Rysunek 12. Schemat zastępczego modelu elektrycznego (RCC) surowców i produktów żywnościowych: Z – impedancja, R – rezystancja, C_p – równoważna równoległa pojemność elektryczna, C_s – równoważna szeregową pojemność elektryczna, M – urządzenie pomiarowe

Rysunek 13. Czujniki pomiarowe – własnej konstrukcji: CPD (a) oraz CPM (b)

Rysunek 14. Sposób wykonania testu: przebijania (a), ściskania (b) oraz cięcia (c) badanego materiału

Rysunek 15. Spektrofotometr HunterLab (a,b) oraz kształt badanych próbki sera i wyrobu seropodobnego (c)

Rysunek 16. Zmiany impedancji mleka: surowego, pasteryzowanego oraz z olejem palmowym w funkcji częstotliwości pomiarowej od 20 do 1000 Hz.

Rysunek 17. Zmiany wartości C_s mleka surowego, pasteryzowanego oraz mleka pasteryzowanego z olejem palmowym w funkcji częstotliwości (20 - 1000 Hz).

Rysunek 18. Zmiany wartości C_p mleka surowego, pasteryzowanego oraz mleka pasteryzowanego z olejem palmowym w funkcji częstotliwości (20 - 1000 Hz).

Rysunek 19. Zmiany wartości impedancji sera (S) i wyrobu seropodobnego (WS) przed soleniem (surowy) w funkcji częstotliwości prądu pomiarowego.

Rysunek 20. Zmiany wartości pojemności równoległej sera i wyrobu seropodobnego przed soleniem (surowego) w funkcji częstotliwości, $f = 20 - 3000$ Hz

Rysunek 21. Zmiany wartości pojemności elektrycznej szeregowej (C_s) sera i wyrobu seropodobnego przed soleniem (surowego) w funkcji częstotliwości, $f = 20$ Hz – 200 kHz.

Rysunek 22. Zmiany parametrów tekstury sera (S) i wyrobów seropodobnych (WS) w czasie ich 28 dni dojrzewania: siły ściskania (F_s , a) siły cięcia (F_c , b) i siły przebijania (F_p , c)

Rysunek 23. Zmiany wartości impedancji (Z) sera (S) i wyrobów seropodobnych (WS) w czasie dojrzewania, zmierzonej przy $f=20\text{Hz}$ (a) 2 kHz (b) i 200 kHz (c)

Rysunek 24. Zmiany wartości równoległej pojemności elektrycznej (C_p) sera (S) i wyrobów seropodobnych (WS) w czasie dojrzewania, zmierzonej przy $f=20\text{Hz}$ (a) i 2 kHz (b)

Rysunek 25. Zmiany proporcji SN/TN w serze i wyrobach seropodobnych w czasie ich dojrzewania

Rysunek 26. Zmiany stosunku TCA/TN (a) i PTA/TN (b) w serze i wyrobach seropodobnych w czasie ich dojrzewania

Rysunek 27. Zmiany parametru barwy L^* sera i wyrobu seropodobnego w czasie 28 dni dojrzewania.

Rysunek 28. Zmiany parametrów barwy a^* (a) i b^* (b) sera i wyrobu seropodobnego w czasie 28 dni dojrzewania.

Rysunek 29. Zmiany wartości impedancji (Z , a) i konduktancji (G , b) sera i wyrobów seropodobnych w czasie 28 dni dojrzewania, zmierzone przy $f=1\text{kHz}-100\text{kHz}$.

Rysunek 30. Zmiany wartości pojemności równoległej (C_p , a) i szeregowej (C_s , b) sera (S) i wyrobów seropodobnych (WS) czasie 28 dni dojrzewania, zmierzone przy $f=1\text{kHz}-100\text{kHz}$

Rysunek 31. Okręgi korelacji między parametrami tekstury i parametrów elektrycznych: Z , G (a) i C_p , C_s (b) sera dojrzewającego

Rysunek 32. Okręgi korelacji między parametrami barwy i parametrów elektrycznych: Z , G (a) i C_p , C_s (b) sera dojrzewającego

Rysunek 33. Okręgi korelacji między zawartością związków azotowych a parametrami elektrycznych: Z , G (a) i C_p , C_s (b) sera dojrzewającego

Rysunek 34. Okręgi korelacji między składem chemicznym i parametrów elektrycznych: Z , G (a) i C_p , C_s (b) sera dojrzewającego

Rysunek 35. Okręgi korelacji między zawartością mikroskładników a parametrami elektrycznymi: Z , G (a) i C_p , C_s (b) sera dojrzewającego

Rysunek 36. Okręgi korelacji między parametrami elektrycznymi (Z , G) wyrobu seropodobnego a ich składem chemicznym (a) i parametrami tekstury (b).

Rysunek 37. Okręgi korelacji między parametrami barwy (a), zawartości związków azotowych (b) a parametrami elektrycznymi (Z , G) wyrobu seropodobnego

Rysunek 38. Okręgi korelacji między wapniem i fosforem a parametrami elektrycznymi: Z , G wyrobu seropodobnego

Rysunek 39. Okręgi korelacji między składem chemicznym (a), parametrami tekstury (b) a parametrami elektrycznymi: C_p , C_s wyrobu seropodobnego

Rysunek 40. Okręgi korelacji między parametrami barwy (a), związków azotowych (b) a parametrami elektrycznymi (C_p , C_s) wyrobu seropodobnego

Rysunek 41. Okręgi korelacji między zawartością mikroskładników i parametrów elektrycznych: - C_p , C_s wyrobu seropodobnego