

**UNIWERSYTET PRZYRODNICZY W LUBLINIE**  
**WYDZIAŁ NAUK O ŻYWNOSCI**  
**I BIOTECHNOLOGII**

mgr inż. Maciej Bartoń

**Zastosowanie serwatki do otrzymywania prozdrowotnej i funkcjonalnej  
żywności ekologicznej**

*Application of whey in the production of health-promoting and functional organic food*

**Dyscyplina naukowa: technologia żywności i żywienia**

Rozprawa doktorska wykonana w Zakładzie Technologii Mleczarstwa i Żywności  
Funkcjonalnej Katedry Technologii Żywności Pochodzenia Zwierzęcego  
oraz "JK" Sp. z o. o. w ramach Programu MNiSW (MEiN)  
„Doktorat Wdrożeniowy” (DWD/6/0210/2022)

Promotor:

**Prof. dr hab. inż. Bartosz Sołowiej**

Opiekun Zakładowy:

**mgr inż. Paweł Krajmas**

Lublin 2026

*Składam serdeczne podziękowania mojemu Promotorowi,  
Panu Profesorowi Bartoszowi Sołowiejowi,  
za opiekę naukową, merytoryczne wsparcie, inspirację do podejmowania  
nowych wyzwań badawczych oraz za stworzenie warunków do rozwoju  
naukowego i zdobywania nowych doświadczeń podczas realizacji niniejszej  
rozprawy doktorskiej.*

*Pragnę podziękować  
„JK” Sp. z o.o. w Lublinie  
Panu Pawłowi Krajmasowi  
za możliwość wzięcia udziału w Programie „Doktorat Wdrożeniowy”  
oraz za udostępnienie infrastruktury przedsiębiorstwa  
do celów badawczo-rozwojowych,  
życzliwość, uprzejmość i miłą atmosferę pracy*

*Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej*

*Oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.*

*Data 11.06.2026 r.*

*Podpis promotora .....*



*Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej*

*Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że:*

- niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana przez mnie samodzielnie pod kierunkiem Promotora/Promotorów/Promotora ~~promotorskiego~~\* i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami*
- przedstawiona rozprawa doktorska nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego*
- niniejsza wersja rozprawy doktorskiej jest tożsama z załączoną na płycie CD/pendrive wersją elektroniczną.*

*Data 11.06.2026 r.*

*Podpis autora.....*



*\* niepotrzebne skreślić*

## Spis treści

1.	Streszczenie w języku polskim i języku angielskim.....	6
2.	Wykaz prac naukowych wchodzących w skład cyklu publikacji .....	8
3.	Wprowadzenie teoretyczne na podstawie publikacji.....	9
3.1.	<i>Serwatka jako produkt uboczny przemysłu mleczarskiego oraz wartościowy surowiec do produkcji żywności</i> .....	11
3.2.	<i>Skład chemiczny, wartość odżywcza i właściwości funkcjonalne serwatki</i> .....	13
3.3.	<i>Fermentacja jako metoda kształtowania jakości i potencjału funkcjonalnego produktów serwatkowych</i> .....	15
3.4.	<i>Fermentowane napoje serwatkowe jako przykład prozdrowotnej i funkcjonalnej żywności ekologicznej</i> .....	17
3.5.	<i>Dzika róża (<i>Rosa canina L.</i>) i rokitnik zwyczajny (<i>Hippophae rhamnoides L.</i>) jako naturalne źródła składników bioaktywnych</i> .....	19
3.6.	<i>Właściwości fizykochemiczne, reologiczne i mikrobiologiczne jako kryteria oceny jakości fermentowanych napojów serwatkowych</i> .....	20
3.7.	<i>Aktywność przeciwutleniająca, zawartość składników mineralnych i profil kwasów tłuszczowych jako wyróżniki potencjału funkcjonalnego napojów serwatkowych.</i> .....	22
3.8.	<i>Możliwości zastosowania serwatki w technologii fermentowanych produktów mięsnych</i> .....	24
3.9.	<i>Roślinne składniki funkcjonalne w surowo dojrzewających przekąskach mięsnych</i> .....	27
4.	Hipoteza oraz cel pracy badawczej.....	30
5.	Materiały i metody oraz struktura przeprowadzonych doświadczeń .....	33
5.1.	<i>Zastosowane metodyki badawcze</i> .....	33
5.2.	<i>Pomiar pH i kwasowości miareczkowej</i> .....	33
5.3.	<i>Pomiar lepkości metodą rotacyjną i ultradźwiękową</i> .....	33
5.4.	<i>Badanie właściwości lepkością przężystych</i> .....	34
5.5.	<i>Profilowa analiza tekstury (TPA)</i> .....	34
5.6.	<i>Oznaczanie barwy</i> .....	35
5.7.	<i>Badanie aktywności wody</i> .....	35
5.8.	<i>Oznaczanie składu podstawowego</i> .....	35
5.9.	<i>Pomiar gęstości</i> .....	36
5.10.	<i>Oznaczanie całkowitej zawartości polifenoli</i> .....	36
5.11.	<i>Oznaczanie aktywności przeciwutleniającej</i> .....	36
5.12.	<i>Oznaczanie zawartości tłuszczu i profilu kwasów tłuszczowych</i> .....	37
5.13.	<i>Oznaczanie składników mineralnych i pierwiastków śladowych</i> .....	37
5.14.	<i>Ocena mikrobiologiczna</i> .....	37

5.15.	<i>Analiza statystyczna</i> .....	38
5.16.	<i>Etapy weryfikacji koncepcji badawczych</i> .....	40
5.17.	<i>Schemat technologii produkcji fermentowanych napojów serwatkowych</i> .....	43
5.18.	<i>Schemat technologii produkcji surowo dojrzewających przekąsek mięsnych z dodatkiem serwatki.</i> .....	44
5.19.	<i>Opracowana na potrzeby badań receptura bazowa</i> .....	45
6.	<b>Omówienie wyników badań i dyskusja</b> .....	47
6.1.	<i>Badania dotyczące wpływu rodzaju serwatki i dodatku soków owocowych na właściwości fizykochemiczne, reologiczne i mikrobiologiczne fermentowanych napojów serwatkowych (publikacja I)</i> .....	47
6.2.	<i>Badania dotyczące wpływu rodzaju serwatki i dodatku soków owocowych na profil kwasów tłuszczowych, zawartość składników mineralnych, zawartość polifenoli i aktywność przeciwutleniającą fermentowanych napojów serwatkowych (publikacja II)</i> .....	60
6.3.	<i>Badania dotyczące wpływu serwatki i składników roślinnych na właściwości technologiczne, teksturalne, reologiczne i mikrobiologiczne fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych standardu „human grade” (publikacja III)</i> .....	74
7.	<b>Stwierdzenia i wnioski</b> .....	93
8.	<b>Bibliografia</b> .....	95
9.	<b>Kopie opublikowanych prac wchodzących w skład cyklu publikacji</b> .....	116
9.	<b>Oświadczenia doktoranta oraz współautorów dotyczących ich wkładu w przygotowanie opublikowanych prac naukowych</b> .....	.

## 1. Streszczenie

Przedmiotem rozprawy była ocena możliwości wykorzystania serwatki ekologicznej w wytwarzaniu ekologicznej żywności funkcjonalnej oraz określenie wpływu rodzaju serwatki, pochodzenia surowca mlecznego i dodatku wybranych składników roślinnych pochodzenia ekologicznego na właściwości otrzymanych produktów. Serwatka jako produkt uboczny przemysłu mleczarskiego, stanowi cenny surowiec technologiczny ze względu na obecność białek o wysokiej wartości biologicznej, laktozy, składników mineralnych oraz związków bioaktywnych, a jej zagospodarowanie wpisuje się w koncepcję zrównoważonego przetwórstwa żywności i gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ).

W pierwszym etapie badań opracowano fermentowane napoje na bazie ekologicznej serwatki koziej i krowiej, zarówno kwaśnej, jak i słodkiej, wzbogacone ekologicznym sokiem z rokitnika zwyczajnego lub dzikiej róży. Ocenie poddano ich właściwości fizykochemiczne, reologiczne oraz jakość mikrobiologiczną. W kolejnym etapie przeprowadzono oznaczenia profilu kwasów tłuszczowych, zawartości składników mineralnych zawartości polifenoli oraz aktywności przeciwutleniającej. Stwierdzono, że zarówno rodzaj serwatki, jak i zastosowany dodatek soków owocowych istotnie modyfikowały skład chemiczny oraz potencjał bioaktywny napojów, przy czym najwyższe wartości aktywności przeciwutleniającej odnotowano w wariantach z dodatkiem soku z dzikiej róży. W trzecim etapie zweryfikowano przydatność ekologicznej serwatki w technologii fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych klasy „human grade”, wzbogacanych suszem z dzikiej róży, z rokitnika zwyczajnego, olejkiem rozmarynowym, ekstraktem z soplówki jeżowatej oraz olejem CBD. Przeprowadzono ocenę ich właściwości fizykochemicznych, teksturalnych, składu podstawowego oraz bezpieczeństwa mikrobiologicznego. Wyniki badań potwierdziły, że ekologiczna serwatka może być efektywnie wykorzystywana jako surowiec funkcjonalny zarówno w fermentowanych napojach serwatkowych, jak i w surowo dojrzewających przekąskach mięsnych. Połączenie ekologicznej serwatki, procesu fermentacji oraz ekologicznych surowców roślinnych zostało wskazane jako perspektywiczny kierunek rozwoju innowacyjnej żywności ekologicznej.

**Słowa kluczowe:** serwatka ekologiczna; żywność funkcjonalna; ekologiczne soki/susze owocowe; fermentowane napoje serwatkowe; surowo dojrzewające przekąski mięsne.

## **Abstract**

The subject of this dissertation was the evaluation of the applicability of organic whey in the production of organic functional foods and the determination of the impact of whey type, origin of the dairy raw material, and the addition of selected organic plant-derived ingredients on the properties of the resulting products. Organic whey, as a by-product of the dairy industry, constitutes a valuable technological raw material owing to the presence of high-biological-value proteins, lactose, minerals, and bioactive compounds, and its valorisation is consistent with the principles of sustainable food processing and the circular economy.

In the first stage of the study, fermented beverages were formulated on the basis of organic goat and cow whey, in both acid and sweet forms, enriched with organic sea buckthorn or rosehip juice. Their physicochemical and rheological properties, as well as microbiological quality, were evaluated. In the subsequent stage, the fatty acid profile, the content of selected mineral components, total polyphenol content, and antioxidant activity were determined. It was demonstrated that both the type of whey and the applied fruit juice significantly modified the chemical composition and bioactive potential of the beverages, with the highest antioxidant activity observed in variants containing rosehip juice. In the third stage, the suitability of organic whey was verified in the technology of fermented raw-ripened meat snacks of human-grade quality, enriched with rosehip powder, sea buckthorn, rosemary essential oil, lion's mane mushroom extract, and CBD oil. The physicochemical and textural properties, basic chemical composition, and microbiological safety of these products were assessed. The results confirmed that organic whey can be effectively utilised as a functional raw material both in fermented whey beverages and in raw-ripened meat snacks. The combination of organic whey, fermentation, and organic plant-derived ingredients rich in natural bioactive compounds was identified as a promising direction for the development of innovative organic functional foods.

**Keywords:** organic whey; functional food; organic fruit juices and powders; fermented whey beverages; raw-ripened meat snacks.

## 2. Wykaz prac naukowych wchodzących w skład cyklu publikacji

### PUBLIKACJA I

**Bartoń M.**, Waraczewski R., Sołowiej B.G., 2025. Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices on the Physicochemical, Rheological, and Microbial Properties of Organic Goat or Cow Fermented Whey Beverages. *Applied Sciences*, 15(3), 1240. DOI: 10.3390/app15031240.

Punkty MNiSW: 100 pkt, IF (2024): 2,5

Liczba cytowań wg Web of Science (0)/Scopus (2)

### PUBLIKACJA II

**Bartoń M.**, Stępniewska A., Ognik K., Sołowiej B.G., 2026. Assessment of Fatty Acid Profile, Mineral Composition, and Antioxidant Activity of Fermented Whey Beverages from Organic Cow and Goat Whey with the Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices. *Molecules*, 31(11), 1905. DOI: 10.3390/molecules31111905.

Punkty MNiSW: 140 pkt, IF (2024): 4,6

Liczba cytowań wg Web of Science (0)/Scopus (0)

### PUBLIKACJA III

**Bartoń M.**, Waraczewski R., Muszyński S., Stasiak D.M., Sołowiej B.G., 2025. Effects of Whey and Plant-Based Additives on Technological and Microbiological Characterization of Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks of Human Grade Standard. *Foods*, 14(22), 3960. DOI: 10.3390/foods14223960.

Punkty MNiSW: 100 pkt, IF (2024): 5,1

Liczba cytowań wg Web of Science (0)/Scopus (0)

**Sumaryczna liczba punktów** według komunikatu MNiSW obowiązującego w roku wydania prac: **340 pkt**

**Sumaryczny IF** zgodnie z rokiem opublikowania prac: **12,2**

Sumaryczna liczba cytowań wg Web of Science (0) oraz Scopus (2)

### **3. Wprowadzenie teoretyczne na podstawie publikacji**

Współczesna technologia żywności w coraz większym stopniu koncentruje się na opracowywaniu produktów łączących wysoką wartość odżywczą, bezpieczeństwo mikrobiologiczne, pożądane cechy sensoryczne oraz potencjalne działanie prozdrowotne, co wpisuje się w rozwój żywności funkcjonalnej i produktów o wysokiej wartości dodanej (Boruah i Ray, 2024). Równocześnie zwiększa się znaczenie racjonalnego gospodarowania surowcami oraz zagospodarowania produktów ubocznych przemysłu spożywczego, co pozwala ograniczać straty technologiczne i zmniejszać obciążenie środowiska (Hossain i in., 2025). Szczególną rolę odgrywają rozwiązania zgodne z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym, w której odpady i produkty uboczne mogą być przekształcane w wartościowe składniki żywności funkcjonalnej (Arshad i in., 2022).

Jednym z surowców odpowiadających tym założeniom jest serwatka, powstająca jako produkt uboczny podczas produkcji serów, twarogów oraz innych wyrobów mleczarskich (Pescuma i in., 2015). Przez długi czas była ona traktowana głównie jako odpad technologiczny lub komponent paszowy, a jej zagospodarowanie stanowiło wyzwanie środowiskowe ze względu na wysoką zawartość substancji organicznych (Mehra i in., 2021). Obecnie jednak serwatka jest coraz częściej postrzegana jako wartościowy surowiec technologiczny, zawierający białka, laktozę, składniki mineralne oraz związki biologicznie aktywne, które mogą być wykorzystywane w projektowaniu nowych produktów spożywczych (Czarniecka-Skubina i in., 2025).

Wysoka wartość żywieniowa serwatki wynika przede wszystkim z obecności białek serwatkowych o korzystnym składzie aminokwasowym i wysokiej wartości biologicznej (Mehra i in., 2021). Istotne znaczenie mają również peptydy bioaktywne powstające w wyniku hydrolizy tych białek, które mogą wykazywać właściwości przeciwutleniające, przeciwdrobnoustrojowe, przeciwzapalne, immunomodulujące oraz hipotensyjne (Saubenova i in., 2024). W związku z tym serwatka może pełnić nie tylko funkcję składnika odżywczego, lecz także surowca do produkcji żywności funkcjonalnej o potencjalnym działaniu prozdrowotnym (Mota i in., 2026).

Z technologicznego punktu widzenia serwatka powinna być traktowana nie tylko jako produkt uboczny, lecz jako matryca umożliwiająca opracowywanie nowych produktów spożywczych (Mutaliyeva i in., 2025). Szczególnie obiecujące jest jej zastosowanie w produktach fermentowanych, gdzie może stanowić odpowiednie środowisko dla rozwoju mikroorganizmów oraz syntezy metabolitów, takich jak kwasy

organiczne, egzopolisacharydy czy bioaktywne peptydy (Malos i in., 2025). Proces fermentacji umożliwia kształtowanie właściwości fizykochemicznych i mikrobiologicznych produktów, a także może zwiększać aktywność biologiczną składników, co potwierdzono m.in. w przypadku wzrostu aktywności hamującej konwertazę angiotensyny (Mazorra-Manzano i in., 2020). Dodatkowo zastosowanie bakterii fermentacji mlekowej sprzyja powstawaniu związków o właściwościach przeciwutleniających, przeciwdrobnoustrojowych i hipotensyjnych (Skrzypczak i in., 2020).

W ostatnich latach zwiększa się również zainteresowanie łączeniem surowców mleczarskich z naturalnymi dodatkami roślinnymi, które stanowią źródło związków fenolowych, flawonoidów, karotenoidów oraz witamin o właściwościach przeciwutleniających (Purkiewicz i Pietrzak-Fiećko, 2021). Dzika róża jest ceniona jako bogate źródło związków fenolowych i antyoksydantów, a jej ekstrakty mogą ograniczać procesy oksydacyjne w żywności (Soltan i in., 2023). Rokitnik zwyczajny wyróżnia się wysoką zawartością witaminy C, karotenoidów i tokoferoli, co uzasadnia jego zastosowanie w produktach spożywczych i paszowych (Vilas-Franquesa i in., 2020). Wykazano również, że dodatki roślinne mogą ograniczać utlenianie lipidów w produktach mięsnych, co potwierdzono m.in. dla ekstraktów z liści borówki i rokitnika (Mäkinen i in., 2020).

Serwatka znajduje zastosowanie w różnych matrycach żywnościowych, przy czym jednym z głównych kierunków jej wykorzystania są fermentowane napoje serwatkowe. Produkty te umożliwiają efektywne zagospodarowanie serwatki jako surowca o wysokiej wartości odżywczej, a jednocześnie mogą pełnić funkcję nośnika mikroorganizmów funkcjonalnych oraz związków bioaktywnych (Pescuma i in., 2015). Wzbogacanie takich napojów dodatkami owocowymi sprzyja poprawie ich aktywności przeciwutleniającej, zawartości polifenoli, barwy oraz cech sensorycznych (Purkiewicz i Pietrzak-Fiećko, 2021). Możliwość uzyskania produktów o dobrej akceptowalności sensorycznej potwierdzono również w badaniach nad fermentowanymi napojami na bazie serwatki i soków owocowych (Rébak i in., 2025).

Alternatywnym, lecz coraz bardziej interesującym kierunkiem jest zastosowanie serwatki w technologii produktów mięsnych, zwłaszcza fermentowanych i surowo dojrzewających. Wykorzystanie serwatki i innych produktów ubocznych mleczarstwa w technologii żywności może również przyczynić się do poprawy właściwości

fizykochemicznych i reologicznych produktów, co potwierdza ich znaczenie jako funkcjonalnych składników technologicznych (Hameed i in., 2023).

### ***3.1. Serwatka jako produkt uboczny przemysłu mleczarskiego oraz wartościowy surowiec do produkcji żywności***

Serwatka stanowi produkt uboczny powstający w trakcie produkcji serów oraz kazeiny i należy do najważniejszych produktów ubocznych przemysłu mleczarskiego (Pires i in., 2021). Powstaje w wyniku oddzielenia skrzepu kazeinowego od płynnej frakcji mleka podczas procesu koagulacji (Mirzakulova i in., 2025). Szacuje się, że stanowi ona około 85–95% objętości mleka wykorzystywanego do produkcji sera i zawiera blisko 50% składników odżywczych obecnych w surowcu wyjściowym (Selmi i in., 2025).

W zależności od zastosowanej metody technologicznej wyróżnia się serwatkę słodką i kwaśną (Pires i in., 2021). Serwatka słodka powstaje w wyniku enzymatycznej koagulacji mleka z użyciem podpuszczki i charakteryzuje się pH w zakresie 5,9–6,6 (Mutaliyeva i in., 2025). Natomiast serwatka kwaśna jest produktem koagulacji kwasowej i cechuje się niższym pH, zazwyczaj poniżej 5,0 (Mutaliyeva i in., 2025). Oba typy różnią się nie tylko odczynem, lecz także zawartością związków mineralnych oraz możliwościami zastosowania technologicznego (Pires i in., 2021).

Przez wiele lat serwatka była uznawana za odpad produkcyjny generujący koszty związane z jej zagospodarowaniem (Buchanan i in., 2023). Ze względu na wysoką zawartość związków organicznych jej niekontrolowane odprowadzanie do środowiska może prowadzić do istotnych problemów ekologicznych (Amaral, 2021). Charakteryzuje się ona wysokimi wartościami biochemicznego i chemicznego zapotrzebowania tlenu, co przyczynia się do degradacji jakości wód powierzchniowych (Selmi i in., 2025). Obecnie jednak serwatka jest coraz częściej postrzegana jako wartościowy surowiec wykorzystywany w produkcji żywności funkcjonalnej, suplementów diety, składników bioaktywnych oraz produktów biotechnologicznych (Soumati i in., 2023).

Istotnym atutem serwatki jest jej skład chemiczny. Woda stanowi około 93–94% jej masy, natomiast głównym składnikiem suchej masy jest laktoza (Mirzakulova i in., 2025). Ponadto zawiera ona białka serwatkowe, takie jak  $\beta$ -laktoglobulina,  $\alpha$ -laktoalbumina, albumina surowicy bydlęcej oraz immunoglobuliny (Rebouillat

i Ortega-Requena, 2015). W jej składzie obecne są również składniki mineralne, witaminy z grupy B oraz niewielkie ilości tłuszczu (Mirzakulova i in., 2025).

Szczególną wartość żywieniową przypisuje się białkom serwatkowym, które cechują się wysoką wartością biologiczną oraz korzystnym profilem aminokwasowym (Rebouillat i Ortega-Requena, 2015). Stanowią one źródło aminokwasów egzogennych niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania organizmu (Mota i in., 2026). Dodatkowo, w wyniku procesów enzymatycznych i fermentacyjnych, mogą powstawać peptydy bioaktywne wykazujące właściwości przeciwutleniające, przeciwnadciśnieniowe, przeciwdrobnoustrojowe oraz immunomodulujące (Saubenova i in., 2024). Z tego względu serwatka uznawana jest za cenny składnik żywności funkcjonalnej (Mota i in., 2026).

Oprócz wartości odżywczej serwatka wykazuje także istotne właściwości technologiczne (Jovanović i Vučić, 2020). Białka serwatkowe posiadają zdolność do tworzenia emulsji, pian i żeli, co umożliwia ich wykorzystanie w kształtowaniu tekstury oraz stabilności produktów spożywczych (Rebouillat i Ortega-Requena, 2015). Właściwości te znajdują zastosowanie m.in. w produkcji napojów, deserów mlecznych, wyrobów piekarniczych oraz produktów wysokobiałkowych (Jovanović i Vučić, 2020).

Jednym z najbardziej obiecujących kierunków wykorzystania serwatki jest produkcja napojów fermentowanych (Barukčić i in., 2019). Laktoza obecna w serwatce stanowi odpowiednie źródło energii dla bakterii fermentacji mlekowej, co umożliwia otrzymywanie produktów o korzystnych właściwościach odżywczych i sensorycznych (Mutaliyeva i in., 2025). Proces fermentacji sprzyja również powstawaniu dodatkowych związków bioaktywnych, w tym peptydów o potencjalnym działaniu prozdrowotnym (Saubenova i in., 2024). Coraz większe zainteresowanie budzą także fermentowane napoje serwatkowe wzbogacane kulturami probiotycznymi, które mogą wspierać funkcjonowanie mikrobioty jelitowej (Mutaliyeva i in., 2025).

Wykorzystanie serwatki wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym, której celem jest maksymalne wykorzystanie surowców oraz ograniczenie powstawania odpadów (Soumati i in., 2023). Zagospodarowanie produktów ubocznych przemysłu mleczarskiego przyczynia się do zmniejszenia presji środowiskowej oraz poprawy efektywności ekonomicznej produkcji żywności (Selmi i in., 2025). W związku ze zwiększającym się znaczeniem zrównoważonego rozwoju oraz żywności funkcjonalnej serwatka uznawana jest obecnie za jeden z kluczowych surowców w nowoczesnym przemyśle spożywczym (Czarniecka-Skubina i in., 2025).

### **3.2. Skład chemiczny, wartość odżywcza i właściwości funkcjonalne serwatki**

Serwatka jest produktem ubocznym powstającym w trakcie produkcji serów podpuszczkowych, twarogów oraz innych wyrobów mleczarskich, jednak obecnie nie jest już postrzegana jako odpad technologiczny, lecz jako wartościowy surowiec wykorzystywany w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym i biotechnologicznym. Wzrost zainteresowania jej zagospodarowaniem wynika zarówno z wysokiej wartości odżywczej, jak i z potrzeby ograniczenia negatywnego oddziaływania przemysłu mleczarskiego na środowisko (Selmi i in., 2025). Serwatka zawiera znaczną część składników odżywczych obecnych pierwotnie w mleku, które po oddzieleniu kazeiny pozostają w fazie płynnej (Mirzakulova i in., 2025).

Pod względem składu chemicznego serwatka składa się głównie z wody (około 93–95%), natomiast pozostałą część stanowi sucha masa obejmująca przede wszystkim laktozę, białka serwatkowe, składniki mineralne, witaminy oraz śladowe ilości tłuszczu (Mirzakulova i in., 2025). Jej dokładny skład uzależniony jest od rodzaju mleka, technologii produkcji oraz sposobu koagulacji białek (Selmi i in., 2025). W literaturze najczęściej wyróżnia się dwa podstawowe typy serwatki: słodką, powstającą w wyniku enzymatycznej koagulacji białek mleka, oraz kwaśną, otrzymywaną w następstwie koagulacji kwasowej. Typy te istotnie różnią się przede wszystkim wartością pH, zawartością składników mineralnych oraz właściwościami technologicznymi, co w sposób zasadniczy determinuje ich funkcjonalność oraz potencjalne kierunki zastosowania w przemyśle spożywczym (Chandrapala i in., 2015; Pires i in., 2021).

Dominującym składnikiem suchej masy serwatki jest laktoza, stanowiąca około 70–75% jej zawartości (Barth & Behnke, 1997). Jest to disacharyd zbudowany z glukozy i galaktozy, pełniący funkcję podstawowego źródła energii dla bakterii fermentacji mlekowej (Bandara i in., 2023). W trakcie fermentacji laktoza ulega przekształceniu głównie do kwasu mlekowego, co prowadzi do obniżenia pH i wzrostu kwasowości środowiska (Mazorra-Manzano i in., 2020). Proces ten ma istotne znaczenie dla kształtowania cech sensorycznych oraz trwałości mikrobiologicznej produktów fermentowanych (Bandara i in., 2023). Laktoza wykazuje również działanie prebiotyczne, wspierając rozwój korzystnej mikroflory jelitowej (Barth & Behnke, 1997).

Drugą kluczową grupę składników stanowią białka serwatkowe, uznawane za jedno z najbardziej wartościowych białek pochodzenia zwierzęcego (Barth & Behnke, 1997). Charakteryzują się one wysoką zawartością aminokwasów egzogennych, w tym aminokwasów rozgałęzionych, takich jak leucyna, izoleucyna i walina, które odgrywają

istotną rolę w syntezie i regeneracji białek mięśniowych (Mirzakulova i in., 2025). Do głównych frakcji należą  $\beta$ -laktoglobulina,  $\alpha$ -laktoalbumina, albumina surowicy bydlęcej, immunoglobuliny, laktoferyna oraz laktoperoksydaza (Recio i in., 2008). Związki te cechują się wysoką biodostępnością i dobrą strawnością, co sprzyja ich zastosowaniu w żywności specjalnego przeznaczenia oraz suplementach diety (Mirzakulova i in., 2025).

Znaczenie białek serwatkowych wykracza poza ich wartość odżywczą. W wyniku hydrolizy enzymatycznej lub procesów fermentacyjnych powstają peptydy bioaktywne, które mogą wykazywać właściwości przeciwutleniające, przeciwdrobnoustrojowe, przeciwzapalne oraz przeciwnadciśnieniowe (Saubenova i in., 2024). Część z nich posiada zdolność hamowania aktywności konwertazy angiotensyny, co może wspierać regulację ciśnienia tętniczego (Mazorra-Manzano i in., 2020). Ponadto wskazuje się na ich potencjalne działanie immunomodulujące (Mota i in., 2026).

W składzie serwatki istotną rolę odgrywają również składniki mineralne, takie jak wapń, fosfor, potas, sód i magnez (Barth & Behnke, 1997). Pełnią one ważne funkcje fizjologiczne, związane m.in. z utrzymaniem równowagi elektrolitowej, przewodnictwem nerwowym oraz mineralizacją kości i zębów. Obecność tych składników wpływa także na właściwości technologiczne serwatki, w tym stabilność układów białkowych oraz przebieg procesów fermentacyjnych (Mirzakulova i in., 2025). Wysoka zawartość wapnia sprawia, że produkty serwatkowe mogą stanowić jego istotne źródło w diecie (Barth & Behnke, 1997).

Serwatka jest również źródłem witamin rozpuszczalnych w wodzie, zwłaszcza witamin z grupy B, w tym ryboflawiny, niacyny, kwasu pantotenowego oraz witaminy B12 (Pires i in., 2021). Związki te uczestniczą w licznych przemianach metabolicznych, w tym w procesach związanych z produkcją energii oraz funkcjonowaniem układu nerwowego. Ich obecność przyczynia się do zwiększenia wartości odżywczej produktów zawierających serwatkę (Selmi i in., 2025).

Oprócz wartości żywieniowej serwatka wykazuje także istotne właściwości funkcjonalne wykorzystywane w technologii żywności (Jovanović i Vučić, 2020). Białka serwatkowe mają zdolność wiązania wody, stabilizowania emulsji, tworzenia pian oraz żeli, co przekłada się na poprawę tekstury i stabilności produktów (Jovanović i Vučić, 2020). Dzięki tym cechom znajdują zastosowanie w produkcji napojów mlecznych, deserów, lodów, wyrobów piekarskich oraz produktów wysokobiałkowych (Selmi i in.,

2025). Ich właściwości emulgujące i pianotwórcze umożliwiają także ograniczenie stosowania niektórych dodatków technologicznych (Recio i in., 2008).

W ostatnich latach szczególne zainteresowanie budzi wykorzystanie serwatki w produkcji żywności funkcjonalnej oraz napojów fermentowanych (Bandara i in., 2023). Dzięki obecności laktozy, białek i składników mineralnych stanowi ona odpowiednie środowisko dla rozwoju bakterii fermentacji mlekowej oraz mikroorganizmów probiotycznych (Bandara i in., 2023). Proces fermentacji prowadzi do powstawania metabolitów wpływających na smak, aromat, wartość odżywczą i aktywność biologiczną produktów, a także może zwiększać biodostępność składników odżywczych i poprawiać ich strawność (Mazorra-Manzano i in., 2020).

Wzrastające znaczenie serwatki w przemyśle spożywczym wpisuje się w ramy gospodarki o obiegu zamkniętym oraz koncepcji zrównoważonego rozwoju, ukierunkowanych na maksymalizację stopnia wykorzystania surowców oraz ograniczenie powstawania odpadów (Selmi i in., 2025). Coraz bardziej efektywne zagospodarowanie serwatki umożliwi redukcję obciążenia środowiska generowanego przez sektor mleczarski, przy jednoczesnym kreowaniu produktów o wysokiej wartości dodanej i podwyższonym potencjale żywieniowym oraz prozdrowotnym. W konsekwencji serwatka jest obecnie uznawana za jeden z najbardziej perspektywicznych surowców wtórnych stosowanych w projektowaniu innowacyjnych produktów z segmentu nowoczesnej żywności funkcjonalnej (Czarniecka-Skubina i in., 2025).

### ***3.3. Fermentacja jako metoda kształtowania jakości i potencjału funkcjonalnego produktów serwatkowych***

Fermentacja należy do najstarszych procesów technologicznych wykorzystywanych w produkcji żywności i odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu jej jakości (Bandara i in., 2023). Znajduje szerokie zastosowanie w przetwórstwie mleka, mięsa, zbóż, warzyw oraz napojów, przyczyniając się do wydłużenia trwałości, poprawy bezpieczeństwa mikrobiologicznego oraz kształtowania właściwości sensorycznych produktów. W technologii mleczarskiej szczególne znaczenie ma fermentacja mlekowa prowadzona przez bakterie fermentacji mlekowej, które wykorzystują cukry jako źródło energii, przekształcając je głównie do kwasu mlekowego (Chen i in., 2025). Powstawanie kwasu mlekowego prowadzi do zmniejszenia pH, zwiększenia kwasowości oraz ograniczenia rozwoju niepożądanego mikroflory (Bandara i in., 2023).

W przypadku serwatki proces fermentacji ma szczególne znaczenie ze względu na jej skład chemiczny. Obecność laktozy, białek serwatkowych, składników mineralnych oraz witamin rozpuszczalnych w wodzie sprawia, że stanowi ona korzystne środowisko dla rozwoju mikroorganizmów fermentacyjnych (Malos i in., 2025). Zakwaszenie środowiska sprzyja zwiększeniu stabilności mikrobiologicznej oraz trwałości napojów serwatkowych (Abd Rabo i in., 2025).

Fermentacja wpływa również na właściwości fizykochemiczne produktów serwatkowych. Zmiany pH oraz akumulacja kwasów organicznych oddziałują na strukturę białek i stabilność układów koloidalnych, co może prowadzić do modyfikacji lepkości, konsystencji oraz właściwości reologicznych (Pereira i in., 2018). W przypadku napojów fermentowanych szczególnie istotne jest utrzymanie jednorodności i stabilności podczas przechowywania, ponieważ parametry te mają bezpośredni wpływ na akceptację konsumentką (Rodríguez i in., 2023). Odpowiedni dobór szczepów mikroorganizmów, warunków procesu oraz czasu fermentacji umożliwia kontrolowane kształtowanie jakości produktu (Bandara i in., 2023).

Istotnym aspektem fermentacji jest jej wpływ na bezpieczeństwo mikrobiologiczne żywności. Obniżenie pH oraz obecność kwasów organicznych ograniczają rozwój wielu drobnoustrojów niepożądanych i patogennych (Zamfir i in., 2022). Dodatkowo bakterie fermentacji mlekowej konkurują z innymi mikroorganizmami o składniki odżywcze oraz przestrzeń wzrostu, co sprzyja poprawie jakości mikrobiologicznej (Zamfir i in., 2022; Chen i in., 2025). Należy jednak podkreślić, że fermentacja stanowi uzupełnienie, a nie alternatywę dla właściwej kontroli higienicznej procesu produkcyjnego (Bandara i in., 2023).

W ostatnich latach coraz większą uwagę poświęca się możliwości zwiększania wartości funkcjonalnej fermentowanych napojów serwatkowych. W trakcie fermentacji mogą powstawać związki bioaktywne, takie jak peptydy, kwasy organiczne oraz metabolity o właściwościach przeciwutleniających. Szczególne znaczenie mają peptydy uwalniane z białek serwatkowych w wyniku aktywności enzymatycznej mikroorganizmów, które mogą wykazywać działanie przeciwutleniające, przeciwdrobnoustrojowe, przeciwnadciśnieniowe oraz przeciwzapalne (Saubenova i in., 2024).

Proces fermentacji może także zwiększać biodostępność składników odżywczych poprzez modyfikację ich struktury chemicznej oraz uwalnianie związków związanych z matrycą żywnościową (Chen i in., 2025). W efekcie może dochodzić do wzrostu

aktywności przeciwutleniającej produktu oraz lepszego wykorzystania składników bioaktywnych przez organizm. Dodatkowo fermentacja wpływa korzystnie na profil sensoryczny, redukując niepożądane nuty smakowo-zapachowe i zwiększając akceptację konsumentką (Yan i in., 2023).

Istotnym kierunkiem rozwoju jest wzbogacanie fermentowanych napojów serwatkowych dodatkami roślinnymi. Surowce roślinne stanowią źródło polifenoli, flawonoidów, karotenoidów oraz innych związków bioaktywnych, które mogą podnosić wartość funkcjonalną produktów (Rodríguez i in., 2023). Ich obecność może jednocześnie wpływać na przebieg fermentacji oraz właściwości sensoryczne napojów (Chen i in., 2025). Interakcje pomiędzy składnikami roślinnymi, białkami mlecznymi i mikroorganizmami mogą oddziaływać na stabilność, barwę, smak oraz aktywność przeciwutleniającą produktu (Shehata i in., 2023).

Fermentowane napoje serwatkowe są obecnie uznawane za obiecującą grupę żywności funkcjonalnej, łączącą wartość odżywczą serwatki z korzyściami wynikającymi z procesów fermentacyjnych oraz możliwością wzbogacania w składniki bioaktywne (Bandara i in., 2023). Właściwe wykorzystanie fermentacji umożliwi nie tylko efektywne zagospodarowanie produktów ubocznych przemysłu mleczarskiego, ale także opracowywanie innowacyjnych produktów odpowiadających współczesnym wymaganiom konsumentów (Abd Rabo i in., 2025).

### ***3.4. Fermentowane napoje serwatkowe jako przykład prozdrowotnej i funkcjonalnej żywności ekologicznej***

Fermentowane napoje serwatkowe stanowią jedną z obiecujących form zagospodarowania serwatki w technologii żywności (Kotsaki i in., 2025; Çoklar i in., 2025). Produkty te łączą wysoką wartość odżywczą serwatki z korzyściami wynikającymi z procesu fermentacji oraz możliwością wzbogacania ich składu dodatkami pochodzenia naturalnego (Sa'aid i Tan, 2025). W rezultacie mogą być klasyfikowane jako żywność funkcjonalna, której rola wykracza poza dostarczanie podstawowych składników odżywczych i obejmuje również zwiększenie potencjału bioaktywnego oraz poprawę atrakcyjności konsumentkiej (Paramithiotis i in., 2024; Li i in., 2024).

Podstawowym surowcem do produkcji tego typu napojów jest serwatka pochodząca z różnych procesów technologicznych oraz z mleka różnych gatunków zwierząt. Szczególne znaczenie mają różnice pomiędzy serwatką słodką i kwaśną, a także

pomiędzy serwatką krowią i kozią, które mogą determinować przebieg fermentacji oraz właściwości fizykochemiczne, reologiczne, sensoryczne i mikrobiologiczne produktów (Szafrńska i in., 2025; Çoklar i in., 2025).

Fermentowane napoje serwatkowe mogą stanowić interesującą alternatywę dla tradycyjnych napojów mlecznych i fermentowanych produktów mleczarskich (Kotsaki i in., 2025; Rébak i in., 2025). W porównaniu z produktami opartymi na pełnym mleku często cechują się lżejszą konsystencją, niższą zawartością tłuszczu oraz specyficznym profilem sensorycznym wynikającym z obecności serwatki i procesów fermentacyjnych (Szafrńska i in., 2025). Jednocześnie zachowują wysoką wartość odżywczą, dostarczając białek serwatkowych, laktozy, składników mineralnych oraz metabolitów powstających podczas fermentacji (Kotsaki i in., 2025; Prestes i in., 2023).

Kluczowym elementem procesu technologicznego jest dobór kultury starterowej oraz parametrów fermentacji (Behera i in., 2018; Plessas, 2021). Zastosowane mikroorganizmy powinny efektywnie metabolizować laktozę, produkować kwas mlekowy oraz kształtować pożądane cechy sensoryczne produktu (Behera i in., 2018). Prawidłowo prowadzona fermentacja prowadzi do obniżenia pH, zwiększenia kwasowości, rozwoju charakterystycznego smaku i aromatu oraz ograniczenia wzrostu niepożądanego mikroflory (Jiménez i in., 2022; Faria-Oliveira i in., 2015).

Istotnym kierunkiem doskonalenia napojów serwatkowych jest ich wzbogacanie komponentami pochodzenia roślinnego, w tym pulpami owocowymi oraz koncentratami soków owocowych, które pełnią funkcję nośników związków bioaktywnych. W badaniach wykorzystano między innymi pulpę guabiroby (*Campomanesia xanthocarpa*) oraz koncentraty soków: jabłkowego, malinowego i żurawinowego, które istotnie przyczyniały się do podwyższenia wartości funkcjonalnej oraz intensyfikacji aktywności przeciwutleniającej otrzymanych napojów (Prestes i in., 2023; Kotsaki i in., 2025). Zastosowanie soków owocowych, ekstraktów roślinnych lub innych naturalnych składników może poprawiać właściwości sensoryczne, nadawać produktowi pożądaną barwę, zwiększać zawartość związków bioaktywnych oraz wzmacniać jego potencjał funkcjonalny (Purkiewicz i Pietrzak-Fiećko, 2021; Žvirdauskienė i in., 2025). Dodatek owoców zwiększa zawartość związków fenolowych oraz aktywność przeciwutleniającą napojów fermentowanych, a także poprawia ich walory sensoryczne (Prestes i in., 2023; Purkiewicz i Pietrzak-Fiećko, 2021). O jakości fermentowanych napojów serwatkowych decydują również ich właściwości fizykochemiczne i reologiczne (Szafrńska i in., 2025). Parametry takie jak pH, kwasowość, lepkość, właściwości lepkością oraz stabilność

układu mają istotny wpływ na trwałość, teksturę oraz akceptowalność konsumencką produktu (Salek i in., 2025; Szafrńska i in., 2025).

### **3.5. Dzika róża (*Rosa canina L.*) i rokitnik zwyczajny (*Hippophae rhamnoides L.*) jako naturalne źródła składników bioaktywnych**

W ostatnich latach obserwuje się większe zainteresowanie wykorzystaniem naturalnych surowców roślinnych w projektowaniu żywności funkcjonalnej. Szczególną uwagę zwraca się na owoce bogate w związki biologicznie aktywne, które mogą wywierać korzystny wpływ na zdrowie człowieka. Do tej grupy zalicza się dziką różę (*Rosa canina L.*) oraz rokitnik zwyczajny (*Hippophae rhamnoides L.*), od dawna wykorzystywane zarówno w przemyśle spożywczym, jak i farmaceutycznym. Ich wartość wynika przede wszystkim z wysokiej zawartości przeciwutleniaczy, witamin, polifenoli, karotenoidów oraz innych związków bioaktywnych o potencjalnym działaniu prozdrowotnym (Zhou i in., 2023; Wang i in., 2022).

Dzika róża (*Rosa canina L.*), należąca do rodziny *Rosaceae*, występuje powszechnie w Europie, Azji oraz Ameryce Północnej. Jej owoce, określane jako szupinki, są szczególnie cenione ze względu na bardzo wysoką zawartość witaminy C, która w zależności od gatunku, warunków środowiskowych i stopnia dojrzałości może przewyższać poziomy obserwowane w owocach cytrusowych. Oprócz kwasu askorbinowego owoce te zawierają również znaczące ilości polifenoli, flawonoidów, karotenoidów, tokoferoli, pektyn oraz kwasów organicznych (Medveckienė i in., 2020; Zhou i in., 2023).

Wśród najważniejszych związków fenolowych obecnych w owocach *Rosa canina* wymienia się katechiny, proantocyjanidyny, kwas galusowy, elagowy i chlorogenowy oraz glikozydy kwercetyny. Związki te odpowiadają za wysoką aktywność przeciwutleniającą, umożliwiając neutralizację wolnych rodników i ograniczanie procesów oksydacyjnych zachodzących w organizmie. Właściwości antyoksydacyjne stanowią jeden z kluczowych elementów warunkujących potencjał prozdrowotny dzikiej róży (Zhou i in., 2023).

Istotną grupę składników stanowią również karotenoidy, takie jak  $\beta$ -karoten, likopen, luteina i zeaksantyna, które nadają owocom charakterystyczną czerwono-pomarańczową barwę. Związki te pełnią funkcję naturalnych przeciwutleniaczy i uczestniczą w ochronie komórek przed stresem oksydacyjnym, co może przyczynić się do ograniczenia ryzyka rozwoju chorób cywilizacyjnych (Medveckienė i in., 2020).

Drugim cennym surowcem roślinnym jest rokitnik zwyczajny (*Hippophae rhamnoides* L.) z rodziny *Elaeagnaceae*, naturalnie występujący w Europie i Azji. Owoce tej rośliny od dawna znajdują zastosowanie w medycynie tradycyjnej oraz przemyśle spożywczym. Charakteryzują się bogatym składem chemicznym obejmującym witaminy, związki fenolowe, karotenoidy, fitosterole oraz nienasycone kwasy tłuszczowe, co czyni rokitnik jednym z najbardziej wartościowych surowców roślinnych o właściwościach funkcjonalnych (Wang i in., 2022).

Owoce *Hippophae rhamnoides* są szczególnie zasobne w witaminę C, witaminę E oraz witaminy z grupy B. Zawierają również znaczne ilości karotenoidów, takich jak  $\beta$ -karoten, likopen, luteina i zeaksantyna, które odpowiadają za intensywną barwę owoców oraz ich wysoką aktywność przeciwutleniającą. W porównaniu z innymi owocami rokitnik wyróżnia się także wysoką zawartością tokoferoli i tokotrienoli, chroniących lipidy przed utlenianiem (Wang i in., 2022).

Znaczącą grupę związków bioaktywnych w rokitniku stanowią polifenole, w tym flawonole, katechiny i kwasy fenolowe. Związki te wykazują działanie przeciwutleniające, przeciwzapalne oraz przeciwdrobnoustrojowe, co może korzystnie wpływać na funkcjonowanie organizmu. Liczne badania wskazują, że dieta bogata w polifenole może przyczyniać się do zmniejszenia ryzyka chorób sercowo-naczyniowych oraz zaburzeń metabolicznych (Wang i in., 2022).

Cechą wyróżniającą rokitnik jest również obecność znacznych ilości lipidów, zwłaszcza w nasionach i miąższu owoców. Olej rokitnikowy zawiera kwasy tłuszczowe z grup omega-3, omega-6, omega-7 i omega-9, które odgrywają istotną rolę w utrzymaniu prawidłowych funkcji organizmu. Szczególne znaczenie przypisuje się kwasowi palmitooleinowemu (omega-7), rzadko występującemu w świecie roślin (Wang i in., 2022).

### **3.6. Właściwości fizykochemiczne, reologiczne i mikrobiologiczne jako kryteria oceny jakości fermentowanych napojów serwatkowych**

Ocena jakości fermentowanych napojów serwatkowych obejmuje analizę parametrów fizykochemicznych, reologicznych oraz mikrobiologicznych, które determinują stabilność, trwałość oraz akceptację konsumencką produktu (Bandara i in., 2023). Wskaźniki te umożliwiają zarówno monitorowanie przebiegu procesu fermentacji, jak i ocenę jakości wyrobu końcowego.

Do kluczowych parametrów fizykochemicznych zalicza się pH oraz kwasowość miareczkową, które odzwierciedlają aktywność bakterii fermentacji mlekowej oraz stopień zakwaszenia produktu (Szafrńska i in., 2025; Skryplonek i in., 2019). W trakcie fermentacji laktoza ulega przemianie do kwasu mlekowego, co skutkuje obniżeniem wartości pH i wzrostem kwasowości (Abella i in., 2016; Bandara i in., 2023). Parametry te wpływają jednocześnie na bezpieczeństwo mikrobiologiczne, właściwości sensoryczne oraz trwałość przechowalniczą napojów (Vélez-Ruiz & Hernández, 2024).

Istotnym elementem charakterystyki jakościowej jest również zawartość suchej masy, która odzwierciedla ilość składników stałych, takich jak białka, tłuszcze, cukry i składniki mineralne. Zwiększenie jej poziomu może wynikać z dodatku koncentratów owocowych, błonnika lub innych komponentów funkcjonalnych, co przekłada się na poprawę wartości odżywczej oraz właściwości teksturalnych produktu (Aly i in., 2019; Prestes i in., 2023).

Barwa stanowi kolejny istotny wyróżnik jakości, będący jednym z pierwszych elementów ocenianych przez konsumentów i mający znaczący wpływ na akceptację produktu (Prestes i in., 2023). Zastosowanie dodatków roślinnych, takich jak owoce i ich przetwory, może istotnie modyfikować parametry barwy oraz zwiększać atrakcyjność wizualną napojów fermentowanych (Abd Rabo i in., 2025).

Właściwości reologiczne, w szczególności lepkość, odgrywają istotną rolę w kształtowaniu cech sensorycznych napojów serwatkowych. Wpływają one na percepcję konsystencji i gęstości produktu przez konsumenta (Szafrńska i in., 2025). Lepkość zależy głównie od zawartości białek, obecności substancji stabilizujących oraz dodatków pochodzenia roślinnego (Łopusiewicz i in., 2022). Wykazano, że dodatki owocowe mogą zwiększać lepkość napojów dzięki obecności pektyn i błonnika pokarmowego (Aly i in., 2019).

Stabilność napojów serwatkowych związana jest z utrzymaniem jednorodnej struktury w trakcie przechowywania. Na jej poziom wpływają m.in. pH, skład produktu, obecność stabilizatorów oraz interakcje pomiędzy białkami a polisacharydami (Bandara i in., 2023). Odpowiednie dobranie składników technologicznych pozwala ograniczyć zjawiska sedymentacji i rozwarstwiania, poprawiając tym samym jakość handlową produktu (Taheri i in., 2019).

Ocena mikrobiologiczna stanowi kluczowy element kontroli jakości fermentowanych napojów serwatkowych. Ze względu na bogaty skład odżywczy serwatka sprzyja rozwojowi bakterii fermentacji mlekowej (Molero & Briñez, 2018; Bandara i in.,

2023), które odpowiadają za produkcję kwasu mlekowego, kształtowanie właściwości sensorycznych oraz ograniczanie wzrostu mikroorganizmów niepożądanych (Skryplonek i in., 2019). W celu zapewnienia bezpieczeństwa produktu konieczne jest monitorowanie liczebności bakterii fermentacji mlekowej oraz kontrola obecności drożdży, pleśni i mikroorganizmów wskaźnikowych (Abella i in., 2016).

### ***3.7. Aktywność przeciwutleniająca, zawartość składników mineralnych i profil kwasów tłuszczowych jako wyróżniki potencjału funkcjonalnego napojów serwatkowych.***

Ocena potencjału funkcjonalnego produktów serwatkowych wymaga uwzględnienia nie tylko podstawowych parametrów fizykochemicznych i mikrobiologicznych, lecz także wybranych wyróżników związanych z ich wartością bioaktywną i żywieniową. Do kluczowych należą aktywność przeciwutleniająca, zawartość związków fenolowych, zawartość składników mineralnych oraz profil kwasów tłuszczowych, które umożliwiają pełniejszą ocenę jakości produktu i jego znaczenia żywieniowego (Shahidi i Ambigaipalan, 2015; Purkiewicz i Pietrzak-Fiećko, 2021). W przypadku fermentowanych napojów serwatkowych wzbogacanych dodatkami roślinnymi analiza tych parametrów jest szczególnie istotna, ponieważ właściwości końcowe zależą zarówno od składu serwatki, jak i od obecności związków bioaktywnych pochodzących z owoców (Purkiewicz i Pietrzak-Fiećko, 2021; Schubertová i in., 2021).

Aktywność przeciwutleniająca należy do najczęściej ocenianych wyróżników potencjału bioaktywnego żywności. Odnosi się ona do zdolności składników obecnych w produkcie do neutralizowania wolnych rodników, ograniczania reakcji utleniania oraz wspierania stabilności oksydacyjnej układu żywnościowego. W żywności aktywność ta może wynikać z obecności wielu grup związków, m.in. polifenoli, flawonoidów, karotenoidów, witaminy C, tokoferoli oraz peptydów bioaktywnych (Shahidi i Ambigaipalan, 2015; Kania-Dobrowolska i in., 2023). W produktach serwatkowych istotną rolę odgrywają zarówno składniki naturalnie obecne w serwatce, jak i metabolity powstające w trakcie fermentacji oraz związki wprowadzane wraz z dodatkami roślinnymi (Schubertová i in., 2021; Purkiewicz i Pietrzak-Fiećko, 2021).

Dzika róża stanowi cenne źródło witaminy C, polifenoli, flawonoidów i karotenoidów. Związki te przyczyniają się do wysokiej aktywności przeciwutleniającej produktów z jej udziałem (Moldovan i in., 2021; Skapska i in., 2020). Rokitnik natomiast

charakteryzuje się znaczną zawartością karotenoidów, tokoferoli, flawonoidów oraz lipidów o wysokiej wartości biologicznej (Vilas-Franquesa i in., 2020; Kania-Dobrowolska i in., 2023). Różnice w składzie obu surowców sprawiają, że ich dodatek może prowadzić do zróżnicowanego profilu aktywności przeciwutleniającej i zawartości związków fenolowych w produkcie końcowym (Vilas-Franquesa i in., 2020; Moldovan i in., 2021).

Ze względu na zróżnicowane mechanizmy działania związków o właściwościach przeciwutleniających, w praktyce badawczej stosuje się szereg komplementarnych metod oznaczania aktywności przeciwutleniającej (Apak i in., 2016). Do najczęściej wykorzystywanych należą testy DPPH, ABTS oraz FRAP, umożliwiające ocenę zdolności badanych próbek do neutralizowania wolnych rodników oraz redukcji związków utlenionych (Munteanu i Apetrei, 2021). Metoda DPPH polega na oznaczeniu zdolności próbki do wygaszania stabilnego rodnika DPPH, natomiast metoda ABTS służy do oceny zdolności do neutralizowania kationorodnika ABTS (Apak i in., 2016). Z kolei metoda FRAP opiera się na oznaczeniu właściwości redukcyjnych próbki poprzez redukcję jonów żelaza(III) do żelaza(II) w odpowiednim układzie reakcyjnym (Rumpf i in., 2023). Zastosowanie kilku uzupełniających się metod pozwala na bardziej wszechstronną i wiarygodną charakterystykę potencjału przeciwutleniającego badanego produktu (Chaves i in., 2020).

Kluczową grupę związków determinujących aktywność przeciwutleniającą produktów wzbogacanych komponentami pochodzenia roślinnego stanowią polifenole (Shahidi i Ambigaipalan, 2015). Są to naturalne składniki surowców roślinnych, wykazujące zdolność neutralizowania wolnych rodników, chelatowania jonów metali oraz hamowania procesów utleniania lipidów, białek i innych składników żywności (Rao i Zheng, 2025). Do związków polifenolowych zalicza się między innymi kwasy fenolowe, flawonoidy, antocyjany, katechiny oraz taniny (Amiot i in., 2021). Ich zawartość i profil jakościowy w produkcie końcowym pozostają w ścisłym związku z gatunkiem i odmianą surowca roślinnego, stopniem dojrzałości, warunkami uprawy, a także parametrami zastosowanej technologii przetwarzania, w tym obróbki termicznej, suszenia czy fermentacji (Škrovánková i Mlček, 2025).

Profil kwasów tłuszczowych stanowi kolejny element oceny wartości funkcjonalnej produktów serwatkowych. Mimo że serwatka zawiera stosunkowo niewielkie ilości tłuszczu, jego skład może wpływać na wartość żywieniową produktu. Szczególną uwagę zwraca się na udział nasyconych, jednonienasyconych i wielonienasyconych kwasów tłuszczowych (Park, 2017). Dodatki roślinne, takie jak rokitnik, mogą dodatkowo

wzbogacać produkt w frakcje lipidowe zawierające kwasy tłuszczowe z rodzin omega-3, omega-6 oraz omega-7 (Vilas-Franquesa i in., 2020; Kania-Dobrowolska i in., 2023).

Tłuszcz mleka koziego jest często opisywany jako bogatszy w krótko- i średniołańcuchowe kwasy tłuszczowe niż tłuszcz mleka krowiego, co może wpływać na jego strawność i właściwości sensoryczne (Park, 2017). Z kolei rokitnik uznawany jest za źródło biologicznie aktywnych lipidów i nienasyconych kwasów tłuszczowych (Vilas-Franquesa i in., 2020). Aktywność przeciwutleniająca, zawartość składników mineralnych i profil kwasów tłuszczowych pozostają ze sobą powiązane: związki przeciwutleniające ograniczają procesy utleniania lipidów, a skład frakcji tłuszczowej wpływa na podatność produktu na utlenianie (Shahidi i Ambigaipalan, 2015). Z tego względu kompleksowa ocena produktów serwatkowych powinna obejmować jednoczesną analizę tych parametrów (Purkiewicz i Pietrzak-Fiećko, 2021).

### ***3.8. Możliwości zastosowania serwatki w technologii fermentowanych produktów mięsnych***

W ostatnich latach odnotowuje się istotny wzrost zainteresowania nowymi kierunkami zagospodarowania serwatki, wykraczającymi poza jej tradycyjne wykorzystanie w sektorze mleczarskim. Serwatka, obok zastosowania w wytwarzaniu napojów fermentowanych, koncentratów białkowych oraz składników żywnościowych, może pełnić funkcję funkcjonalnego komponentu w technologii przetwórstwa mięsa (Czarniecka-Skubina i in., 2025). Szczególnie obiecujące są jej aplikacje w wyrobach fermentowanych, surowo dojrzewających, w których zasadnicze znaczenie mają procesy zakwaszania, zmniejszania aktywności wody, kształtowania właściwości teksturalnych oraz zapewnienia stabilności mikrobiologicznej produktu (Munekata i in., 2021; Karwowska i in., 2022). Jakość fermentowanych wyrobów mięsnych kształtowana jest przez złożone przemiany fizykochemiczne, mikrobiologiczne i enzymatyczne zachodzące podczas fermentacji i dojrzewania. W ich trakcie dochodzi do zmian pH, aktywności wody, struktury białek, profilu smakowo-zapachowego, barwy oraz stabilności mikrobiologicznej (Toldrá i in., 2014; Domínguez i in., 2019). Włączenie serwatki do matrycy mięsnej może w istotny sposób modyfikować przebieg wymienionych procesów, gdyż stanowi ona źródło laktozy, białek serwatkowych, peptydów oraz składników mineralnych, które oddziałują zarówno na aktywność mikroorganizmów fermentacyjnych, jak i na właściwości technologiczne gotowego produktu (Karwowska i in., 2022).

Z punktu widzenia fermentacji jednym z kluczowych składników serwatki jest laktoza, stanowiąca substrat dla bakterii fermentacji mlekowej, które przekształcają dostępne cukry w kwas mlekowy (Leroy i in., 2006). Zmniejszenie pH należy do podstawowych czynników warunkujących trwałość, bezpieczeństwo mikrobiologiczne, smak i teksturę fermentowanych produktów mięsnych (Toldrá i in., 2014). Zastosowanie serwatki kwaśnej może dodatkowo wspierać proces zakwaszania i poprawiać stabilność mikrobiologiczną wyrobów (Wójciak i in., 2015; Sionek i in., 2025).

Białka serwatkowe odgrywają istotną rolę w kształtowaniu właściwości technologicznych produktów mięsnych, przede wszystkim dzięki zdolności wiązania wody, stabilizowania układów emulsyjnych oraz uczestniczenia w formowaniu struktur żelowych. W konsekwencji wpływają one na teksturę, soczystość, spójność oraz stabilność gotowych wyrobów (Reddy i in., 2023; Han i in., 2023). W przypadku produktów surowo dojrzewających, w których zachodzi stopniowa utrata wody i związana z tym koncentracja suchej masy, funkcjonalność białek może mieć szczególne znaczenie dla przebiegu zmian teksturalnych oraz ogólnej jakości produktu (Liu i in., 2022).

Jednym z kluczowych parametrów tego typu wyrobów jest aktywność wody, której zmniejszenie stanowi podstawowy mechanizm ich utrwalania. Poziom aktywności wody determinuje możliwość rozwoju mikroorganizmów, stabilność mikrobiologiczną, właściwości teksturalne oraz tempo przemian zachodzących podczas dojrzewania (Munekata i in., 2021; Bal-Prylypko i in., 2024). Składniki serwatki, takie jak białka, laktoza oraz sole mineralne, mogą pośrednio wpływać na wiązanie i dostępność wody w matrycy mięsnej, modyfikując tym samym przebieg procesów dojrzewania (Czarniecka-Skubina i in., 2025).

Obecność serwatki może ponadto istotnie modyfikować właściwości reologiczne wyrobów mięsnych. Analiza reologiczna umożliwia ocenę zachowania produktu pod wpływem odkształcenia i dostarcza informacji o stopniu ukształtowania struktury oraz stabilności układu białkowo-tłuszczowego. Białka serwatkowe, peptydy i składniki mineralne mogą zmieniać interakcje pomiędzy białkami mięśniowymi, tłuszczem i wodą, co przekłada się na zwartość, elastyczność oraz stabilność strukturalną gotowego wyrobu (Han i in., 2023; Idyryshev i in., 2025). Istotnym aspektem zastosowania serwatki w produktach mięsnych jest również jej wpływ na mikrobiologię. Fermentowane wyroby opierają się na kontrolowanym rozwoju mikroflory technologicznej, głównie bakterii fermentacji mlekowej, odpowiedzialnych za zakwaszanie środowiska i ograniczanie

rozwoju drobnoustrojów niepożądanych (Leroy i in., 2006; Sivamaruthi i in., 2025). Wykorzystanie serwatki kwaśnej w połączeniu z odpowiednio dobranymi kulturami starterowymi może poprawiać jakość mikrobiologiczną fermentowanych kielbas i hamować wzrost wybranych patogenów (Wójciak i in., 2015).

Zastosowanie serwatki staje się szczególnie interesujące w produktach mięsnych wzbogacanych naturalnymi składnikami roślinnymi. Surowce takie jak dzika róża, rokitnik, rozmaryn czy grzyby jadalne mogą wносить do produktu związki bioaktywne, naturalne przeciwutleniacze, barwniki oraz komponenty aromatyczne (Das i in., 2021; Vilas-Franquesa i in., 2020). W takim układzie serwatka pełni funkcję składnika technologicznego i odżywczego, natomiast dodatki roślinne wzmacniają potencjał funkcjonalny oraz stabilność oksydacyjną wyrobów (Das i in., 2021; Lorenzo i in., 2018).

W przypadku produktów mięsnych szczególnie ważna jest stabilność oksydacyjna, ponieważ tłuszcz może ulegać utlenianiu, prowadząc do pogorszenia smaku, zapachu, barwy oraz wartości odżywczej (Lorenzo i in., 2018). Naturalne dodatki roślinne bogate w związki fenolowe mogą ograniczać utlenianie lipidów poprzez neutralizację wolnych rodników i hamowanie reakcji oksydacyjnych (Das i in., 2021; Lorenzo i in., 2018). Dlatego przy projektowaniu fermentowanych produktów mięsnych z dodatkiem serwatki należy równolegle uwzględniać pH, aktywność wody, profil mikrobiologiczny, teksturę, barwę oraz stabilność oksydacyjną (Toldrá i in., 2014).

Możliwość wykorzystania serwatki w produktach mięsnych ma istotne znaczenie w kontekście zrównoważonego przetwórstwa żywności, ponieważ sprzyja bardziej efektywnemu zagospodarowaniu zasobów surowcowych. Włączenie produktu ubocznego przemysłu mleczarskiego do receptur wyrobów mięsnych zwiększa wartość dodaną serwatki, ogranicza straty surowcowe oraz poszerza zakres jej zastosowań poza tradycyjne produkty mleczarskie (Soumati i in., 2023; El-Aidie i Khalifa, 2024). Jednocześnie należy podkreślić, że implementacja serwatki w formulacjach produktów mięsnych wymaga starannie zaprojektowanego składu recepturowego oraz ścisłej kontroli przebiegu procesu technologicznego. Obecność serwatki może bowiem wpływać na kwasowość, aktywność wody, właściwości sensoryczne, teksturę oraz mikrobiologiczną stabilność wyrobów, co wymaga uwzględnienia w procesie projektowania i optymalizacji technologii (Wójciak i in., 2015; Karwowska i in., 2022). Nadmierny udział serwatki lub niewłaściwe warunki technologiczne mogą skutkować niepożądanymi zmianami, takimi jak zbyt wysoka wilgotność, nadmierne zakwaszenie, zaburzenia struktury czy stabilność. Dlatego wdrażanie serwatki do matrycy mięsnej powinno być poprzedzone szczegółową oceną

właściwości fizykochemicznych, teksturalnych i mikrobiologicznych opracowywanych produktów (Toldrá i in., 2014).

### ***3.9. Roślinne składniki funkcjonalne w surowo dojrzewających przekąskach mięsnych***

Roślinne składniki funkcjonalne stanowią obecnie coraz istotniejszą grupę dodatków wykorzystywanych w technologii produktów mięsnych (Pateiro i in., 2021; Karwowska i in., 2022). Ich wykorzystanie wynika z potrzeby opracowywania wyrobów o korzystniejszym profilu jakościowym, wyższej stabilności przechowalniczej oraz bardziej naturalnym składzie (Pateiro i in., 2021; Tocai i in., 2025). Współcześnie konsumenci coraz częściej oczekują produktów o ograniczonej zawartości dodatków syntetycznych, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej trwałości, atrakcyjnej barwy, pożądanego smaku i bezpieczeństwa mikrobiologicznego (Kurćubić i in., 2022; Tocai i in., 2025). W związku z tym surowce roślinne bogate w związki bioaktywne są intensywnie analizowane jako komponenty wspierające stabilność oksydacyjną, jakość sensoryczną oraz funkcjonalność wyrobów mięsnych (Pateiro i in., 2021; Martínez-Zamora i in., 2021).

Surowo dojrzewające i fermentowane produkty mięsne są szczególnie podatne na procesy utleniania ze względu na obecność lipidów, wydłużony czas dojrzewania oraz kontakt składników mięsa z tlenem na etapie produkcji i przechowywania (Lorenzo i in., 2013; Aquilani i in., 2018). Utlenianie lipidów może prowadzić do pogorszenia smaku, zapachu, barwy oraz obniżenia wartości odżywczej wyrobów (Domínguez i in., 2019; Pateiro i in., 2021). Zastosowanie naturalnych przeciwutleniaczy pochodzenia roślinnego pozwala ograniczać te niekorzystne przemiany i sprzyja utrzymaniu jakości produktów dojrzewających (Lorenzo i in., 2013; Martínez-Zamora i in., 2021).

Jednym z najlepiej poznanych dodatków roślinnych stosowanych w technologii produktów mięsnych jest rozmaryn. Ekstrakty rozmarynu mogą ograniczać utlenianie lipidów oraz wspierać stabilność barwy w kiełbasach fermentowanych i suszonych (Gök i in., 2011; Rohlík i in., 2013). Efekt ten wiąże się głównie z obecnością związków fenolowych, takich jak kwas karnozowy, karnozol i kwas rozmarynowy. W produktach surowo dojrzewających konieczna jest jednak właściwa kontrola poziomu dodatku, ponieważ intensywny aromat rozmarynu może wpływać na profil sensoryczny wyrobu (Pateiro i in., 2021).

Ekstrakt z pestek winogron stanowi kolejny dobrze udokumentowany dodatek roślinny o korzystnym działaniu w produktach dojrzewających. W kielbasach typu chorizo jego zastosowanie ograniczało utlenianie lipidów i poprawiało wybrane cechy jakościowe produktu (Lorenzo i in., 2013). W suchych kielbasach fermentowanych wykazano ponadto możliwość wykorzystania ekstraktu z pestek winogron jako składnika częściowo zastępującego azotyny, w połączeniu z innymi naturalnymi przeciwutleniaczami (Aquilani i in., 2018). Działanie ochronne tego dodatku wiąże się z obecnością polifenoli zdolnych do neutralizowania wolnych rodników i spowalniania procesów oksydacyjnych (Pateiro i in., 2021).

Hydroksytyrozol pochodzący z oliwek stanowi przykład naturalnego związku fenolowego wykorzystywanego w projektowaniu produktów mięsnych typu clean label (Martínez-Zamora i in., 2021; Argemí-Armengol i in., 2026). W surowo dojrzewającej kielbasie typu fuet ekstrakty oliwne zawierające hydroksytyrozol ograniczały utlenianie lipidów i białek oraz zwiększały aktywność przeciwutleniającą produktu (Martínez-Zamora i in., 2021). Badania nad organicznymi kielbasami fermentowanymi wskazują, że związek ten może wspierać redukcję dodatku azotanów i azotynów, jednak nie powinien być traktowany jako ich pełny zamiennik bez weryfikacji bezpieczeństwa mikrobiologicznego (Argemí-Armengol i in., 2026).

Olejki eteryczne oregano i tymianku wykazują zarówno działanie przeciwutleniające, jak i przeciwdrobnoustrojowe w fermentowanych produktach mięsnych. Ich dodatek do suchych fermentowanych kielbas drobiowych prowadził do obniżenia wartości TBARS oraz poprawy wybranych wskaźników higienicznej jakości produktu. Jednocześnie nie stwierdzono istotnego pogorszenia cech sensorycznych, co wskazuje, że oregano i tymianek mogą stanowić naturalne dodatki wspierające trwałość produktów fermentowanych, pod warunkiem właściwego dawkowania (Adab i Hassouna, 2016).

W produktach surowo dojrzewających zastosowanie znajdują również ekstrakty z owoców oraz produkty uboczne przetwórstwa owocowego. Ekstrakty cytrusowe stosowane w kielbasie fuet mogą natomiast wspierać aktywność przeciwutleniającą i stanowić element receptur ukierunkowanych na redukcję dodatków syntetycznych (Martínez-Zamora i in., 2021).

Funkcję technologiczną w dojrzewających produktach mięsnych mogą pełnić także naturalne dodatki barwiące. Liofilizowany wodny ekstrakt z czerwonej kapusty zastosowany w paście pokrywającej pastirmę poprawiał parametry barwy oraz ograniczał

utlenianie lipidów podczas produkcji i przechowywania (Aksu i in., 2020). Wyniki te sugerują, że wybrane surowce roślinne mogą jednocześnie pełnić rolę naturalnych barwników i przeciwutleniaczy (Aksu i in., 2020; Pateiro i in., 2021).

Zastosowanie roślinnych składników funkcjonalnych w surowo dojrzewających przekąskach mięsnych może zatem sprzyjać poprawie stabilności oksydacyjnej, utrzymaniu barwy, modyfikacji profilu sensorycznego oraz ograniczeniu udziału wybranych dodatków syntetycznych (Lorenzo i in., 2013; Aquilani i in., 2018; Martínez-Zamora i in., 2021). Skuteczność takich dodatków zależy jednak od rodzaju ekstraktu, zastosowanej dawki, składu recepturowego oraz warunków fermentacji, suszenia i przechowywania (Gök i in., 2011; Adab i Hassouna, 2016). Z tego względu dobór roślinnych składników funkcjonalnych powinien być każdorazowo weryfikowany poprzez ocenę właściwości fizykochemicznych, mikrobiologicznych i sensorycznych gotowych wyrobów (Aquilani i in., 2018; Argemí-Armengol i in., 2026).

#### 4. Hipoteza oraz cel pracy badawczej

Na podstawie problemu badawczego zgłoszonego przez firmę „JK” Sp. z o.o. oraz przeprowadzonego przeglądu literatury sformułowano następującą hipotezę badawczą: serwatka, będąca produktem ubocznym przemysłu mleczarskiego, może stanowić wartościowy surowiec technologiczny i funkcjonalny do otrzymywania prozdrowotnej, ekologicznej żywności o cechach funkcjonalnych. Jej zastosowanie w połączeniu z procesem fermentacji oraz naturalnymi składnikami roślinnymi, takimi jak dzika róża, rokitnik zwyczajny, rozmaryn, soplówka jeżowata i olej CBD, umożliwia otrzymanie produktów o korzystnych właściwościach fizykochemicznych, reologicznych, teksturalnych, mikrobiologicznych i bioaktywnych.

Głównym celem pracy było określenie możliwości wykorzystania serwatki do wytwarzania prozdrowotnej i funkcjonalnej żywności ekologicznej oraz ocena wpływu rodzaju serwatki, pochodzenia surowca mlecznego i dodatku wybranych składników roślinnych na właściwości opracowanych produktów.

Zakres badań obejmował przede wszystkim ocenę właściwości fizykochemicznych, reologicznych, mikrobiologicznych i fermentowanych napojów serwatkowych otrzymanych na bazie ekologicznej serwatki koziej i krowiej, zarówno kwaśnej, jak i słodkiej, z dodatkiem ekologicznego soku z dzikiej róży lub rokitnika zwyczajnego. Dodatkowo oznaczono profil kwasów tłuszczowych, zawartość składników mineralnych, zawartość pierwiastków śladowych, całkowitą zawartość polifenoli oraz aktywność przeciwutleniającą otrzymanych produktów. W dalszej części pracy oceniono także możliwość zastosowania serwatki w technologii fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych standardu „human grade”, wzbogaconych wybranymi składnikami funkcjonalnymi pochodzenia roślinnego i grzybowego, tj. suszem z dzikiej róży (*Rosa canina*), suszem z rokitnika zwyczajnego (*Hippophae rhamnoides*), olejkiem rozmarynowym (*Rosmarinus officinalis*), olejem CBD pozyskanym z konopi siewnych (*Cannabis sativa* L.) oraz ekstraktem z soplówki jeżowatej (*Hericium erinaceus*).

W celu weryfikacji sformułowanych koncepcji badawczych wyznaczono następujące cele szczegółowe:

- określenie przydatności serwatki ekologicznej jako surowca technologicznego i funkcjonalnego, umożliwiającego zagospodarowanie produktu ubocznego przetwórstwa mleczarskiego zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym, ograniczania strat surowcowych oraz

zrównoważonego przetwórstwa żywności ekologicznej, a także projektowania innowacyjnych produktów o podwyższonym potencjale prozdrowotnym.

- określenie możliwości wykorzystania ekologicznej serwatki koziej i krowiej jako surowca do otrzymywania fermentowanych napojów serwatkowych o potencjale funkcjonalnym;
- porównanie przydatności serwatki kwaśnej i słodkiej w technologii fermentowanych napojów serwatkowych;
- ocenę wpływu pochodzenia surowca mlecznego (serwatka kozia i krowia) na właściwości fizykochemiczne i reologiczne fermentowanych napojów serwatkowych;
- określenie wpływu dodatku ekologicznego soku z dzikiej róży oraz ekologicznego soku z rokitnika zwyczajnego na właściwości fizykochemiczne, reologiczne i mikrobiologiczne fermentowanych napojów serwatkowych;
- ocenę bezpieczeństwa mikrobiologicznego fermentowanych napojów serwatkowych otrzymanych z udziałem różnych rodzajów serwatki oraz dodatków soków owocowych;
- określenie wpływu rodzaju serwatki, pochodzenia surowca mlecznego oraz dodatku soku z dzikiej róży lub rokitnika zwyczajnego na profil kwasów tłuszczowych fermentowanych napojów serwatkowych;
- ocenę zawartości składników mineralnych oraz zawartości pierwiastków śladowych w fermentowanych napojach serwatkowych wzbogacanych naturalnymi dodatkami owocowymi;
- określenie całkowitej zawartości polifenoli oraz aktywności przeciwutleniającej fermentowanych napojów serwatkowych z dodatkiem soków z dzikiej róży lub rokitnika zwyczajnego;
- porównanie aktywności przeciwutleniającej fermentowanych napojów serwatkowych z wykorzystaniem wybranych metod analitycznych, w tym DPPH, ABTS i FRAP;
- ocenę możliwości zastosowania serwatki w technologii fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych standardu „human grade”;

- określenie wpływu dodatku serwatki oraz wybranych składników funkcjonalnych – suszu z dzikiej róży, suszu z rokitnika zwyczajnego, olejku rozmarynowego, ekstraktu z soplówki jeżowatej oraz oleju CBD – na właściwości fizykochemiczne, technologiczne, teksturalne i reologiczne fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych. określenie wpływu zastosowanych składników funkcjonalnych na barwę, aktywność wody, gęstość oraz skład podstawowy fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych;
- ocenę bezpieczeństwa mikrobiologicznego fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wzbogacanych serwatką i składnikami funkcjonalnymi;

## **5. Materiały i metody oraz struktura przeprowadzonych doświadczeń**

### **5.1. Zastosowane metodyki badawcze**

Zakres metodyczny pracy obejmował oznaczenia fizykochemiczne, reologiczne, teksturalne i mikrobiologiczne, a także analizy składu podstawowego, profilu kwasów tłuszczowych, zawartości wybranych makroelementów i metali ciężkich, zawartości polifenoli oraz aktywności przeciwutleniającej badanych produktów. W przypadku fermentowanych napojów serwatkowych oceniano przebieg fermentacji, stopień zakwaszenia, właściwości reologiczne, jakość mikrobiologiczną, profil kwasów tłuszczowych, zawartość wybranych makroelementów i metali ciężkich, zawartość polifenoli oraz aktywność przeciwutleniającą.

W odniesieniu do fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych zakres badań obejmował ocenę struktury i tekstury, właściwości reologicznych i lepkościowych, barwy, aktywności wody, gęstości, składu podstawowego oraz jakości mikrobiologicznej. Zastosowane procedury badawcze oparto na aktualnych normach PN-EN ISO, metodach instrumentalnych oraz literaturze metodycznej właściwej dla oceny produktów mlecznych, fermentowanych i mięsnych. Uzupełnieniem analiz instrumentalnych była ocena sensoryczna i organoleptyczna, umożliwiająca określenie cech jakościowych istotnych z punktu widzenia akceptowalności produktów.

### **5.2. Pomiar pH i kwasowości miareczkowej**

Pomiar pH fermentowanych napojów serwatkowych prowadzono metodą potencjometryczną przy użyciu pH-metru Elmetron CP-315 (Elmetron Sp.j., Zabrze), z dokładnością  $\pm 0,05$ . Oznaczenia umożliwiły ocenę stopnia zakwaszenia produktów po fermentacji oraz porównanie wpływu rodzaju serwatki i dodatku owocowego na końcowy odczyn napojów. Kwasowość miareczkową oznaczano metodą miareczkowania roztworem NaOH wobec fenoloftaleiny, a wynik wyrażano w stopniach Soxhleta-Henkla ( $^{\circ}\text{SH}$ ). Procedurę realizowano zgodnie z metodyką stosowaną dla mleka i produktów mlecznych, opartą na normach PN-A-86122:1968 i PN-A-86061:2002.

### **5.3. Pomiar lepkości metodą rotacyjną i ultradźwiękową**

Lepkość pozorną fermentowanych napojów serwatkowych oznaczano przy użyciu reometru rotacyjnego Brookfield DV II+ (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., Middleboro, MA, USA) z cylindrami współosiowymi S21. Pomiary wykonywano w temperaturze  $21^{\circ}\text{C}$ , przy prędkości obrotowej 0,5 rpm, w trzech powtórzeniach. Lepkość

dynamiczną oznaczano metodą ultradźwiękową przy użyciu aparatu Unipan 505 (UNIPAN, Warszawa), w temperaturze 21°C. Zastosowanie dwóch metod pomiaru pozwoliło na pełniejszą charakterystykę właściwości przepływowych napojów jako układów płynnych o zróżnicowanym składzie surowcowym. Interpretację oparto na założeniach reologii układów spożywczych oraz literaturze dotyczącej produktów mlecznych, napojów owocowych i układów z dodatkami roślinnymi (Oomah i in., 1999; Castro i in., 2013; Morell i in., 2015; Saricaoglu i in., 2019).

#### **5.4. Badanie właściwości lepkosprężystych**

Właściwości lepkosprężyste fermentowanych napojów serwatkowych oraz fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych oznaczano przy użyciu reometru oscylacyjnego Kinexus Lab+ (Malvern Panalytical, Cambridge, UK), wyposażonego w ząbkowane płytki pomiarowe PU40X SW1382 SS oraz PLS40X S2222 SS, w układzie płytka–płytko. W przypadku fermentowanych napojów serwatkowych pomiary prowadzono w temperaturze 21°C, przy częstotliwości 1 Hz, w zakresie liniowej lepkosprężystości badanego materiału. Oznaczano moduł zachowawczy  $G'$  oraz moduł stratności  $G''$ , co umożliwiło określenie udziału komponenty sprężystej i lepkiej w strukturze badanych układów serwatkowo-owocowych. Wyniki opracowano z wykorzystaniem oprogramowania rSpace, wersja 2.2. W przypadku fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych pomiary wykonywano dla próbek o wymiarach  $\text{Ø}10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , w temperaturze 21°C, z zastosowaniem szczeliny pomiarowej 2,8 mm. Przed właściwym pomiarem przeprowadzano test amplitudowy w celu wyznaczenia liniowego zakresu lepkosprężystego, a następnie oznaczenia wykonywano przy odkształceniu 5% i częstotliwości 1 Hz. Rejestrowano wartości modułu zachowawczego  $G'$  oraz modułu stratności  $G''$ . Wszystkie pomiary wykonano w trzech powtórzeniach, a wyniki opracowano przy użyciu oprogramowania rSpace, wersja 2.2. Interpretację zmian wartości  $G'$  i  $G''$  odniesiono do właściwości strukturalnych badanych matryc, w szczególności do stopnia uformowania sieci białkowej, udziału komponenty lepkiej i sprężystej oraz możliwych interakcji między białkami a związkami bioaktywnymi obecnymi w zastosowanych dodatkach roślinnych i grzybowych, w tym interakcji białko–polifenol oraz białko–polisacharyd.

#### **5.5. Profilowa analiza tekstury (TPA)**

Analizę profilu tekstury (TPA) dla surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wykonywano z użyciem analizatora tekstury TA.XTplus (Stable Micro Systems,

Godalming, UK) wyposażonego w cylindryczną sondę SMSP/36R. Próbki o średnicy i wysokości 10 mm temperowano do 21°C, a następnie dwukrotnie ściskano do 50% pierwotnej wysokości przy prędkości 5 mm/s. Na podstawie krzywych siła–czas wyznaczano cechy takiej jak: twardość, sprężystość, spójność (kohezyjność), przylegalność (adhezyjność) i żujność. Profilowa analiza tekstury (TPA) umożliwiła ocenę właściwości mechanicznych i strukturalnych produktów oraz wpływu dodatków funkcjonalnych na zachowanie matrycy mięsno-białkowej podczas deformacji. Interpretację oparto na literaturze dotyczącej oddziaływania dodatków roślinnych, błonnika, polifenoli i składników białkowych na teksturę produktów mięsnych i układów białkowych (Kumar i in., 2015; Salehi, 2021; Guo i in., 2024; Zou i in., 2024).

### **5.6. Oznaczanie barwy**

Barwę surowo dojrzewających przekąsek mięsnych oznaczano instrumentalnie w systemie CIE L\*a\*b\* przy użyciu kolorymetru CR-221 Chroma Meter (Minolta, Osaka, Japonia) Określano jasność L\*, udział składowej czerwono-zielonej a\* oraz żółto-niebieskiej b\*. Pomiary prowadzono zgodnie z metodyką stosowaną w ocenie produktów spożywczych i białkowo-tłuszczowych (Sołowiej i in., 2015). Oznaczenie barwy pozwoliło określić wpływ dodatków funkcjonalnych, zwłaszcza surowców roślinnych zawierających naturalne barwniki, polifenole i karotenoidy, na wygląd gotowych produktów.

### **5.7. Badanie aktywności wody**

Aktywność wody ( $a_w$ ) badano za pomocą aparatu Aqua Lab 3 TE (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA), z dokładnością  $\pm 0,001 a_w$ . Przed pomiarami aparat kalibrowano z użyciem wzorca wilgotności; oznaczenia prowadzono w 22°C zgodnie z metodyką stosowaną w badaniach produktów mleczno-białkowych i tłuszczowych (Szafrńska i in., 2020). Parametr  $a_w$  był kluczowy przy ocenie trwałości i bezpieczeństwa surowo dojrzewających przekąsek, ponieważ aktywność wody determinuje możliwość wzrostu drobnoustrojów oraz stabilność przechowalniczą żywności.

### **5.8. Oznaczanie składu podstawowego**

Skład podstawowy surowo dojrzewających przekąsek (zawartość wody, białka, tłuszczu i popiołu) badano przy użyciu analizatora FoodScan™ 2 (Foss, Hillerød, Dania), opartego na spektroskopii transmisyjnej w bliskiej podczerwieni. Próbki przed analizą homogenizowano i umieszczano w szklanych celkach pomiarowych. Uzyskane wyniki

traktowano jako dane przesiewowe, umożliwiające porównanie wariantów produktów; uwzględniono możliwość występowania efektu matrycy wynikającego z obecności dodatków roślinnych, olejków oraz składników tłuszczowych.

### **5.9. Pomiar gęstości**

Gęstość próbek oznaczano metodą piknometrii gazowej przy użyciu aparatu AccuPyc 1330 (Micromeritics, Norcross, GA, USA) Pomiarów wykonywano w temperaturze 22°C, z użyciem cylindra o objętości 10 cm<sup>3</sup> i gazu pomiarowego He/N<sub>2</sub>. Przed każdą serią pomiarów aparat kalibrowano wzorcem objętości. Procedurę oparto na metodyce opisanej przez Szafrńska i in. (2020). Oznaczenie gęstości pozwoliło ocenić wpływ dodatków funkcjonalnych na stopień upakowania, strukturę wewnętrzną oraz właściwości fizyczne surowo dojrzewających przekąsek mięsnych.

### **5.10. Oznaczanie całkowitej zawartości polifenoli**

Całkowitą zawartość polifenoli w fermentowanych napojach serwatkowych oznaczano metodą kolorymetryczną z użyciem odczynnika Folina-Ciocalteu. Ekstrakty metanolowe próbek mieszano z odczynnikiem Folina-Ciocalteu i roztworem węgla sodu, a po inkubacji mierzono absorbancję przy 725 nm (spektrofotometr UV–VIS Shimadzu UV-1800). Wyniki wyrażano w mg CAE/100 g. Procedurę przeprowadzono według Pérez i in. (2023), z niewielkimi modyfikacjami. Metoda ta pozwoliła określić udział związków fenolowych, głównie pochodzących z soku z dzikiej róży i rokitnika, w kształtowaniu potencjału funkcjonalnego napojów.

### **5.11. Oznaczanie aktywności przeciwutleniającej**

Aktywność przeciwutleniającą fermentowanych napojów serwatkowych określano trzema metodami: DPPH, ABTS i FRAP. Testy DPPH i ABTS służyły do oceny zdolności próbek do neutralizacji wolnych rodników, natomiast metoda FRAP – do oznaczenia zdolności redukcyjnej. Zastosowanie kilku uzupełniających się testów było uzasadnione, ponieważ różnią się one mechanizmem reakcji i czułością wobec poszczególnych grup związków przeciwutleniających. Interpretację wyników oparto na klasycznej metodyce FRAP opisanej przez Benzie i Strain (1996) oraz na procedurach stosowanych w ocenie aktywności przeciwutleniającej fermentowanych produktów mlecznych i roślinnych (Szafrńska i in., 2024).

### **5.12. Oznaczanie zawartości tłuszczu i profilu kwasów tłuszczowych**

Zawartość tłuszczu w fermentowanych napojach serwatkowych oznaczano metodą ekstrakcji rozpuszczalnikowej Soxhleta. Homogenizowane próbki ekstrahowano heksanem w systemie Soxtec Avanti® (Foss Tecator AB, Höganäs, Szwecja), a zawartość tłuszczu obliczano grawimetrycznie i wyrażano w g/100 g. Procedurę oparto na metodach AOAC (AOAC International, 2019). Estrы metylowe kwasów tłuszczowych przygotowywano zgodnie z ISO 12966-2:2017, z niewielkimi modyfikacjami. Wyekstrahowany tłuszcz poddawano zmydlaniu metanolemowym roztworem KOH, a następnie estryfikowano z użyciem trifluorku boru w metanolu. Po ekstrakcji estrów metylowych do heksanu próbki analizowano chromatograficznie zgodnie z ISO 12966-4:2015.

### **5.13. Oznaczanie składników mineralnych i pierwiastków śladowych**

Zawartość składników mineralnych i pierwiastków śladowych oznaczano w napojach serwatkowych metodami spektrometrycznymi. Wybrane makro- i mikroelementy analizowano metodą płomieniowej atomowej spektrometrii absorpcyjnej FAAS (Varian Inc., Palo Alto, CA, USA). W odniesieniu do produktów mlecznych wykorzystano procedury opisane przez Cruijssen i in. (2019) oraz normę ISO 21424:2018 dotyczącą oznaczania pierwiastków śladowych w mleku i przetworach mlecznych metodą ICP-MS. Zawartość rtęci oznaczano zgodnie z procedurą U.S. EPA 7473, opartą na termicznym rozkładzie próbki, amalgamacji i atomowej spektrometrii absorpcyjnej. Zakres oznaczeń obejmował zarówno składniki pożądane żywieniowo, jak i pierwiastki potencjalnie toksyczne.

### **5.14. Ocena mikrobiologiczna**

Ocenę mikrobiologiczną fermentowanych napojów serwatkowych i surowo dojrzewających przekąsek mięsnych prowadzono w zakresie drobnoustrojów patogennych oraz wskaźników higieny procesu. Obecność *Salmonella spp.* oznaczano zgodnie z PN-EN ISO 6579-1:2017-04 + A1:2020-09, natomiast obecność/liczbę *Listeria monocytogenes* – zgodnie z PN-EN ISO 11290-1:2017-07 i PN-EN ISO 11290-2:2017-07. Dodatkowo oznaczano: ogólną liczbę tlenowych bakterii mezofilnych (PN-EN ISO 4833-1:2013-12 + A1:2022-06), drożdże i pleśnie (PN-ISO 21527-2:2009), *Enterobacteriaceae* (PN-EN ISO 21528-2:2017-08),  $\beta$ -glukuronidazo-dodatnie *E. coli* (PN-ISO 16649-2:2004), gronkowce koagulazo-dodatnie (PN-EN ISO 6888-2:2001/A1:2004), domniemane *Bacillus cereus* (PN-EN ISO 7932:2005 + A1:2020-09) oraz domniemane *Pseudomonas spp.* (PN-EN ISO 13720:2010). Analizy prowadzono w warunkach zgodnych z wymaganiami badań

żywności, a interpretację bezpieczeństwa mikrobiologicznego odnoszono do rozporządzenia Komisji (WE) nr 2073/2005.

### ***5.15. Analiza statystyczna***

Wyniki badań fermentowanych napojów serwatkowych opracowano z wykorzystaniem trójczynnikowej analizy wariancji (ANOVA). Różnice pomiędzy wartościami średnimi oceniano za pomocą testu Tukeya przy poziomie istotności  $p \leq 0,05$ , z wykorzystaniem

pakietu Statistica PL, wersja 13 (StatSoft, Kraków). W przypadku fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA), a porównania post hoc przeprowadzono testem Tukeya HSD przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wyniki przedstawiano jako wartości średnie  $\pm$  odchylenie standardowe. Dla wybranych parametrów teksturalnych uwzględniono ograniczenia zakresu pomiarowego zastosowanego analizatora tekstury. Wartości przekraczające zakres pomiarowy aparatu traktowano jako prawostronnie cenzurowane i nie były uwzględniane w analizach statystycznych obejmujących parametr twardości. Dla parametrów oznaczonych w zakresie pomiarowym analizatora obliczono ponadto wielkość efektu Cohena (Cohen's d), w celu określenia skali różnic pomiędzy poszczególnymi wariantami badawczymi a próbą kontrolną.

### 5.16. Etapy weryfikacji koncepcji badawczych

Weryfikacji założeń badawczych dokonywano poprzez wykonywanie odpowiednich doświadczeń i analiz, zgodnie z założeniami przedstawionymi w **Tabeli 1**. Efekty dokonanej weryfikacji załączono w formie publikacji, które stanowią przedmiot rozprawy doktorskiej.

**Tabela 1.** Etapy weryfikacji koncepcji badawczych

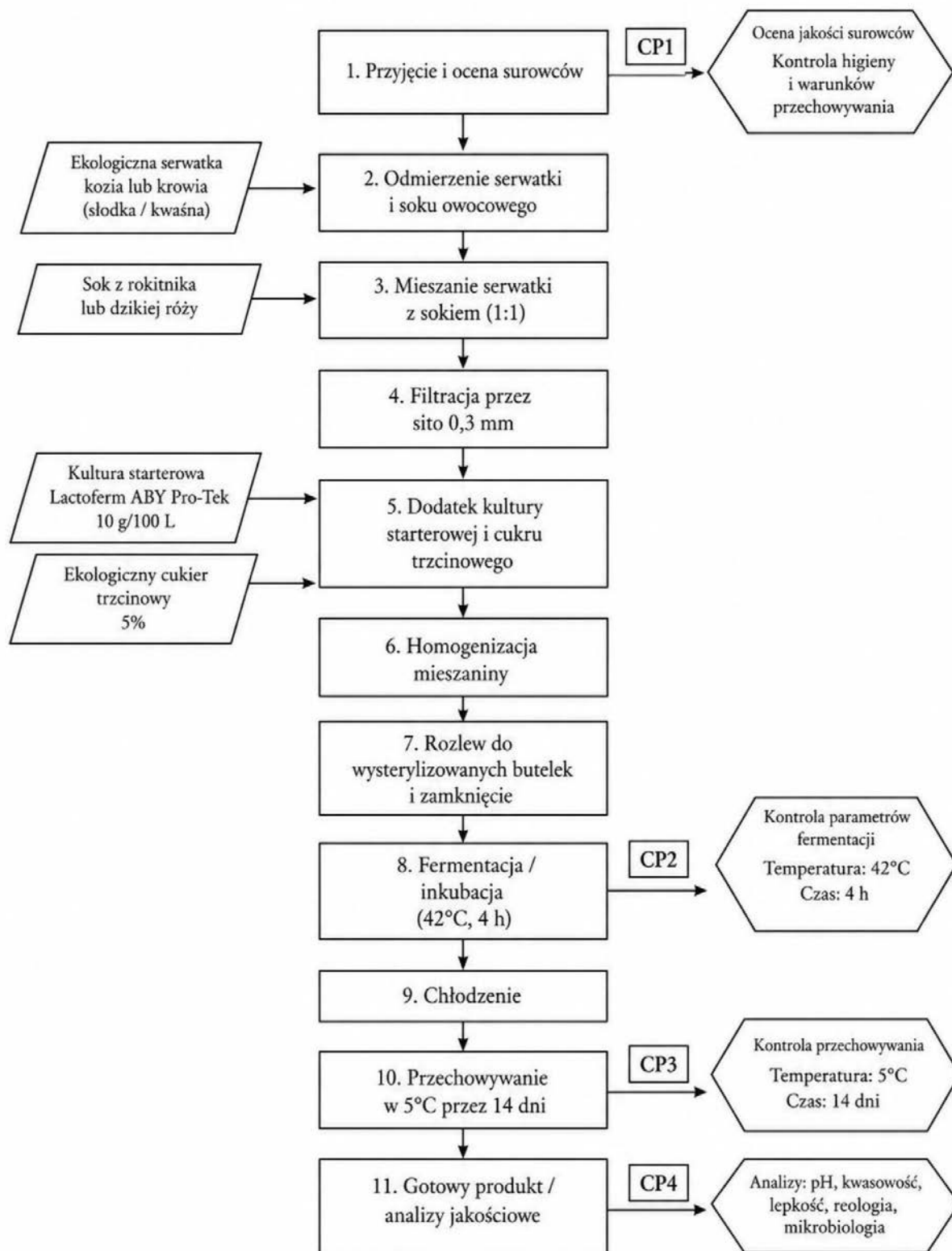
ZAŁOŻENIA	PUBLIKACJA
<p><b>Publikacja I</b> Opracowanie fermentowanych napojów na bazie ekologicznej serwatki koziej i krowiej, kwaśnej i słodkiej, wzbogaconych sokiem z rokitnika lub dzikiej róży. Ocena wpływu rodzaju serwatki, pochodzenia surowca mlecznego oraz dodatku owocowego na właściwości fizykochemiczne, reologiczne, lepkość i mikrobiologiczne napojów. Określenie przydatności ekologicznej serwatki jako surowca do otrzymywania prozdrowotnej i funkcjonalnej żywności ekologicznej.</p>	 <p><b>Punkty MNiSW: 100 pkt, IF (2024): 2,5</b></p>

<p><b>Publikacja II</b></p> <p>Publikacja II</p> <p>Ocena profilu kwasów tłuszczowych, składu mineralnego, zawartości polifenoli oraz aktywności przeciwtleniającej fermentowanych napojów serwatkowych otrzymanych z ekologicznej serwatki koziej i krowiej z dodatkiem soku z rokitnika lub dzikiej róży.</p> <p>Określenie wpływu rodzaju serwatki i dodatku owocowego na potencjał funkcjonalny opracowanych napojów.</p>	  <p>Article</p> <p><b>Assessment of Fatty Acid Profile, Mineral Composition, and Antioxidant Activity of Fermented Whey Beverages from Organic Cow and Goat Whey with the Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices</b></p> <p>Maciej Bartoń <sup>‡</sup>, Anna Stępniewska <sup>‡</sup>, Katarzyna Ognik <sup>‡</sup> and Bartosz G. Sołowiej <sup>1,*</sup></p> <p><b>Punkty MNiSW: 140 pkt, IF (2024): 4,6</b></p>
<p><b>Publikacja III</b></p> <p>Publikacja III</p> <p>Opracowanie fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych standardu „human grade” z dodatkiem serwatki i wybranych składników roślinnych.</p> <p>Ocena ich właściwości fizykochemicznych,</p>	  <p>Article</p> <p><b>Effects of Whey and Plant-Based Additives on Technological and Microbiological Characterization of Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks of Human Grade Standard</b></p> <p>Maciej Bartoń <sup>1</sup>, Robert Waraczewski <sup>1</sup>, Siemowit Muszyński <sup>2</sup>, Dariusz M. Stasiak <sup>1</sup> and Bartosz G. Sołowiej <sup>1,*</sup></p> <p><b>Punkty MNiSW: 100 pkt, IF (2024): 5,1</b></p>

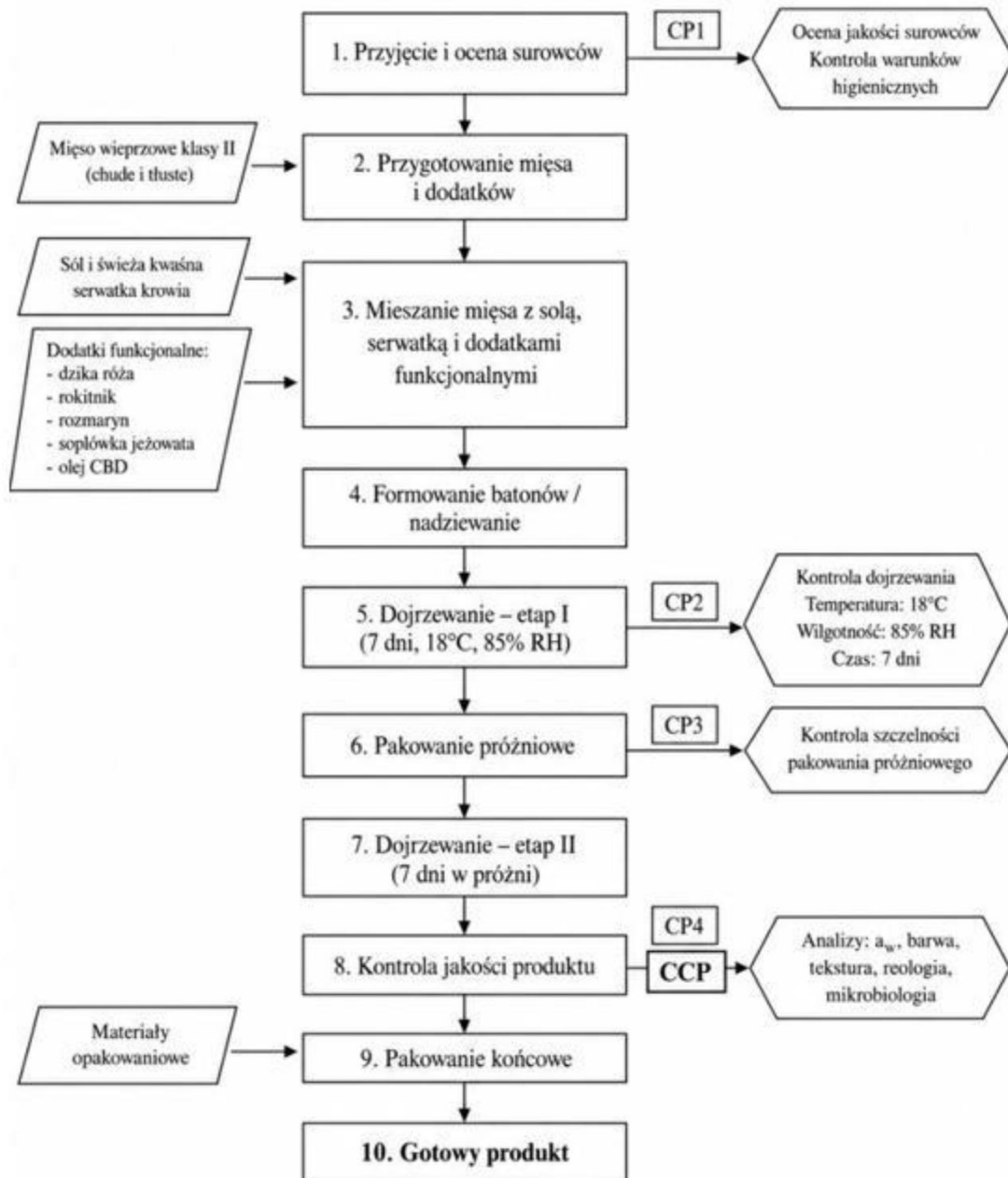
reologicznych,  
teksturalnych  
i mikrobiologicznych.

5.17. Schemat technologii produkcji fermentowanych napojów serwatkowych.

Schemat technologii produkcji fermentowanych napojów serwatkowych



**5.18. Schemat technologii produkcji surowo dojrzewających przekąsek mięsnych z dodatkiem serwatki.**



### 5.19. Opracowana na potrzeby badań receptura bazowa

**Tabela 2. Kompozycja zaprojektowanych fermentowanych napojów serwatkowych**

Składnik	Udział w wyrobie gotowym (%)
Ekologiczna serwatka kozia lub krowia, kwaśna lub słodka	50,00
Ekologiczny sok z rokitnika zwyczajnego lub dzikiej róży	50,00
Ekologiczny cukier trzcinowy	do 5,00
Kultura starterowa Lactoferm ABY Pro-Tek	10 g/100 L

\* Serwatka: kwaśna kozia, słodka kozia, kwaśna krowia, słodka krowia.

\*\* Sok owocowy: sok z rokitnika zwyczajnego lub sok z dzikiej róży.

\*\*\* Warianty kontrolne przygotowano bez dodatku soku owocowego.

**Tabela 3. Kompozycja recepturowa zaprojektowanych fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych standardu „human grade” przed procesem dojrzewania (%).**

Składnik	Przekąska z dziką różą (%)	Przekąska z soplówką (%)	Przekąska z CBD (%)	Przekąska z olejkiem rozmarynowym (%)	Przekąska z rokitnikiem (%)	Charakter składnika
Mięso wieprzowe klasy II chude Ø5	46,22	46,22	48,15	48,15	46,22	podstawowa matryca mięsna
Mięso wieprzowe klasy II chude 2 × Ø5	15,41	15,41	16,05	16,05	15,41	podstawowa matryca mięsna
Mięso wieprzowe klasy II tłuste Ø5	30,82	30,82	32,10	32,10	30,82	podstawowa matryca mięsna
Sól spożywcza	1,39	1,39	1,44	1,44	1,39	składnik technologiczny
Składnik funkcjonalny	4,62	4,62	0,64	0,64	4,62	dodatek zależny od wariantu

Składnik	Przekąska z dziką różą (%)	Przekąska z soplówką (%)	Przekąska z CBD (%)	Przekąska z olejkiem rozmarynowym (%)	Przekąska z rokitnikiem (%)	Charakter składnika
Woda	1,54	1,54	1,61	1,61	1,54	składnik technologiczny
Razem	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

#### **Objaśnienia:**

- W wariancie z dziką różą składnikiem funkcjonalnym był susz z dzikiej róży, dodany w ilości 0,30 kg na 6,00 kg mięsa.
- W wariancie z soplówką składnikiem funkcjonalnym była soplówka jeżowata, dodana w ilości 0,30 kg na 6,00 kg mięsa.
- W wariancie z CBD zastosowano olej CBD w ilości 0,04 l na 6,00 kg mięsa.
- W wariancie z olejkiem rozmarynowym zastosowano olejek rozmarynowy w ilości 0,04 l na 6,00 kg mięsa.
- W wariancie z rokitnikiem zastosowano owoce rokitnika zwyczajnego w ilości 0,30 kg na 6,00 kg mięsa.

Udział procentowy składników obliczono na podstawie receptur surowcowych stosowanych przed formowaniem i dojrzewaniem przekąsek.

## 6. Omówienia wyników badań i dyskusja

### 6.1. Badania dotyczące wpływu rodzaju serwatki i dodatku soków owocowych na właściwości fizykochemiczne, reologiczne i mikrobiologiczne fermentowanych napojów serwatkowych (publikacja I)

Fermentowane napoje serwatkowe stanowią interesującą grupę produktów funkcjonalnych, ponieważ łączą zagospodarowanie serwatki jako produktu ubocznego przemysłu mleczarskiego z wykorzystaniem procesu fermentacji oraz naturalnych dodatków roślinnych. W literaturze podkreśla się, że fermentacja serwatki z udziałem bakterii fermentacji mlekowej może poprawiać właściwości organoleptyczne produktu, zwiększać jego wartość funkcjonalną oraz sprzyjać powstawaniu bioaktywnych metabolitów, w tym kwasów organicznych i peptydów bioaktywnych. Proces ten może ponadto wspierać rozwój korzystnej mikroflory, wpływać na pH, kwasowość, teksturę i stabilność produktu, a jednocześnie zwiększać jego atrakcyjność dla konsumentów (Sionek i in., 2023; Verardo i in., 2020; Kadyan i in., 2021).

Serwatka jest wartościowym surowcem żywnościowym, zawierającym białka o wysokiej wartości biologicznej, laktozę, składniki mineralne oraz frakcje białkowe mogące uczestniczyć w tworzeniu peptydów bioaktywnych. Produkty serwatkowe, takie jak koncentraty białek serwatkowych, napoje fermentowane, jogurty czy kefir, są szeroko opisywane jako żywność o potencjale funkcjonalnym. Istotną rolę odgrywają białka serwatkowe, w tym  $\beta$ -laktoglobulina,  $\alpha$ -laktoalbumina, laktoferyna i immunoglobuliny, które wpływają zarówno na wartość odżywczą, jak i na właściwości technologiczne produktów (Darewicz i in., 2011; Królczyk i in., 2016; Yiğit i in., 2023).

Wzbogacanie napojów serwatkowych dodatkami owocowymi jest jednym ze sposobów poprawy ich wartości odżywczej, cech sensorycznych i potencjału bioaktywnego. Dzika róża (*Rosa canina L.*) charakteryzuje się wysoką zawartością witaminy C, związków fenolowych, flawonoidów i innych składników o aktywności przeciwutleniającej. Rokitnik zwyczajny (*Hippophae rhamnoides L.*) jest natomiast źródłem witamin, karotenoidów, flawonoidów oraz kwasów tłuszczowych, które mogą korzystnie wpływać na właściwości funkcjonalne i prozdrowotne produktów. Zastosowanie tych surowców w napojach serwatkowych może poprawiać barwę, smak, stabilność oksydacyjną oraz potencjał funkcjonalny wyrobów (Demir i in., 2014; Olas, 2016; Tkacz i in., 2020; Zorzi i in., 2020). Wzbogacanie napojów serwatkowych dodatkami owocowymi stanowi istotny kierunek doskonalenia ich profilu sensorycznego, wartości odżywczej oraz właściwości

funkcjonalnych. Wang i in. (2019) wykazali, że dodatek soku owocowego do fermentowanego mleka koziego istotnie modyfikuje właściwości fizykochemiczne i sensoryczne produktu, przy czym moment wprowadzenia komponentu owocowego w procesie technologicznym może wpływać na końcowy profil jakościowy napoju. Argan i in. (2015) zauważyli, że napoje owocowe wzbogacane składnikami mlecznymi stanowią atrakcyjną kategorię asortymentową, łączącą cechy napojów mlecznych i funkcjonalnych. Z kolei Perumal i Chunduri (2023) podkreślają, że fermentowane napoje owocowe na bazie serwatki należy uznać za produkty o wysokim potencjale innowacyjnym, szczególnie w kontekście wykorzystania serwatki jako surowca o podwyższonej wartości dodanej.

W nawiązaniu do powyższych informacji przeprowadzono badania, których celem było określenie możliwości otrzymywania fermentowanych napojów na bazie ekologicznej serwatki koziej i krowiej, zarówno kwaśnej, jak i słodkiej, z dodatkiem ekologicznego soku z rokitnika zwyczajnego lub dzikiej róży. Zakres badań obejmował ocenę właściwości fizykochemicznych, reologicznych oraz mikrobiologicznych opracowanych napojów. Wyniki tych badań przedstawiono w **publikacji I pt. „Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices on the Physicochemical, Rheological, and Microbial Properties of Organic Goat or Cow Fermented Whey Beverages”**.

Do przygotowania napojów zastosowano niepasteryzowaną kwaśną i słodką serwatkę kozią oraz niepasteryzowaną kwaśną i słodką serwatkę krowią. Serwatkę łączono z sokiem z rokitnika lub dzikiej róży w stosunku 1:1. Następnie mieszaniny filtrowano przez sito o średnicy oczek 0,3 mm, dodawano liofilizowaną kulturę starterową Lactoferm ABY Pro-Tek oraz ekologiczny cukier trzcinowy, po czym prowadzono fermentację w temperaturze 42°C przez 4 godziny. Po zakończeniu fermentacji napoje przechowywano w temperaturze 5°C przez 14 dni. Tak zaprojektowany układ doświadczenia umożliwił ocenę wpływu trzech głównych czynników: pochodzenia serwatki, rodzaju serwatki oraz rodzaju soku owocowego.

**Tabela 4. Układ doświadczenia zastosowany do otrzymywania fermentowanych napojów serwatkowych z dodatkiem ekologicznych soków owocowych.**

Grupa surowcowa	Rodzaj serwatki	Sok owocowy	Oznaczenie wariantu
Serwatka krowia	słodka	sok z rokitnika zwyczajnego	SSKr/R
Serwatka krowia	kwaśna	sok z rokitnika zwyczajnego	SKKr/R
Serwatka krowia	słodka	sok z dzikiej róży	SSKr/DR
Serwatka krowia	kwaśna	sok z dzikiej róży	SKKr/DR
Serwatka kozia	słodka	sok z rokitnika zwyczajnego	SSK/R
Serwatka kozia	kwaśna	sok z rokitnika zwyczajnego	SKK/R
Serwatka kozia	słodka	sok z dzikiej róży	SSK/DR
Serwatka kozia	kwaśna	sok z dzikiej róży	SKK/DR

**Objaśnienia:** Kr — serwatka krowia; K — serwatka kozia; SS — serwatka słodka; SK — serwatka kwaśna; R — sok z rokitnika zwyczajnego; DR — sok z dzikiej róży.

W Tabeli 4 przedstawiono warianty badane fermentowanych napojów serwatkowych z uwzględnieniem rodzaju serwatki, jej pochodzenia oraz zastosowanego dodatku owocowego. Zestawienie to pozwala uporządkować układ doświadczenia i pokazuje, że badania obejmowały zarówno serwatkę kozią, jak i krowią, w wariantach kwaśnych i słodkich, a także napoje z dodatkiem soku z rokitnika lub dzikiej róży. Takie podejście umożliwiło porównanie wpływu matrycy mlecznej i składnika roślinnego na właściwości gotowych produktów.

Pierwszą grupę analiz stanowiły badania właściwości reologicznych, obejmujące lepkość pozorną oraz lepkość dynamiczną. Parametry te są istotne z punktu widzenia jakości napojów fermentowanych, ponieważ wpływają na odczucie konsystencji, płynność, stabilność oraz ogólną akceptowalność produktu. W przypadku napojów serwatkowych szczególnie ważne jest uzyskanie równowagi pomiędzy zbyt niską lepkością, powodującą wrażenie wodnistości, a zbyt wysoką lepkością, która mogłaby zaburzać typowy charakter napoju.

**Tabela 5. Wpływ rodzaju serwatki i dodatku owocowego na lepkość fermentowanych napojów serwatkowych.**

Oznaczenie próbki	Charakterystyka wariantu	Lepkość pozorna [Pa·s]	Lepkość dynamiczna [mPa·s × g/cm <sup>3</sup> ]
SKKr/R	kwaśna serwatka krowia + sok z rokitnika	0,21 <sup>a</sup> ± 0,01	16,67 <sup>d</sup> ± 4,71
SSKr/R	słodka serwatka krowia + sok z rokitnika	0,21 <sup>ab</sup> ± 0,00	3,67 <sup>ab</sup> ± 1,16
SSK/R	słodka serwatka kozia + sok z rokitnika	0,31 <sup>c</sup> ± 0,00	1,17 <sup>a</sup> ± 0,24
SKK/R	kwaśna serwatka kozia + sok z rokitnika	0,31 <sup>c</sup> ± 0,00	2,50 <sup>ab</sup> ± 0,00
SSKr/DR	słodka serwatka krowia + sok z dzikiej róży	0,31 <sup>c</sup> ± 0,00	3,00 <sup>ab</sup> ± 0,50
SSK/DR	słodka serwatka kozia + sok z dzikiej róży	0,30 <sup>c</sup> ± 0,00	2,00 <sup>ab</sup> ± 0,00
SKKr/DR	kwaśna serwatka krowia + sok z dzikiej róży	0,21 <sup>a</sup> ± 0,00	8,50 <sup>bc</sup> ± 3,20
SKK/DR	kwaśna serwatka kozia + sok z dzikiej róży	0,30 <sup>c</sup> ± 0,00	2,50 <sup>ab</sup> ± 0,00
SSKr/NP	słodka serwatka krowia, bez	0,23 <sup>abc</sup> ± 0,05	17,66 <sup>d</sup> ± 1,43

**Oznaczenie**

<b>próbki</b>	<b>Charakterystyka wariantu</b>	<b>Lepkość pozorna [Pa·s]</b>	<b>Lepkość dynamiczna [mPa·s × g/cm<sup>3</sup>]</b>
SKKr/NP	dodatku soku kwaśna serwatka krowia, bez dodatku soku	0,30 <sup>bc</sup> ± 0,00	11,67 <sup>cd</sup> ± 1,12
SSK/NP	słodka serwatka kozia, bez dodatku soku	0,93 <sup>e</sup> ± 0,05	26,67 <sup>e</sup> ± 2,00
SKK/NP	kwaśna serwatka kozia, bez dodatku soku	0,80 <sup>d</sup> ± 0,08	46,33 <sup>f</sup> ± 3,81

**Objaśnienia:** Kr — serwatka krowia; K — serwatka kozia; SS — serwatka słodka; SK — serwatka kwaśna; R — sok z rokitnika zwyczajnego; DR — sok z dzikiej róży; NP — wariant bez dodatku soku owocowego. Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe. Różne litery w tej samej kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ .

Uzyskane wyniki dotyczące lepkości wskazują, że właściwości reologiczne fermentowanych napojów serwatkowych są silnie uwarunkowane składem matrycy oraz obecnością dodatków pochodzenia roślinnego. Zmniejszenie lepkości zaobserwowane w części wariantów z dodatkiem soków owocowych można wiązać z rozcieńczeniem układu serwatkowego, zmianą pH oraz oddziaływaniem kwasów organicznych i rozpuszczalnych składników soków z białkami serwatkowymi, co może prowadzić do modyfikacji struktury koloidalnej układu. Podobne zależności opisali Castro i in. (2013), wskazując, że dodatek składników funkcjonalnych do napojów serwatkowych może istotnie modyfikować ich lepkość i stabilność, natomiast Ciołkowska i in. (2023) podkreślają, że właściwości reologiczne napojów mlecznych i serwatkowych pozostają w ścisłym związku ze stężeniem białek, obecnością substancji zagęszczających oraz stopniem ukształtowania struktury układu. W badaniach własnych najwyższe wartości lepkości uzyskane w wariantach kontrolnych, zwłaszcza na bazie serwatki koziej, wskazują, że brak dodatku soku powodował uzyskanie bardziej lepkiej/skoncentrowanej struktury napoju.

Na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 5 stwierdzono, że lepkość pozorna badanych napojów mieściła się w zakresie od 0,21 do 0,93 Pa·s. Najniższe wartości lepkości pozornej uzyskano dla napojów na bazie kwaśnej i słodkiej serwatki krowiej z dodatkiem soku z rokitnika, natomiast najwyższą wartość odnotowano w próbce kontrolnej ze słodkiej serwatki koziej bez dodatku soku owocowego. Wyniki te wskazują, że zarówno rodzaj serwatki, jak i obecność dodatku owocowego wpływały na właściwości przepływu napojów. W wielu przypadkach napoje bez dodatku soku charakteryzowały się wyższą lepkością niż warianty wzbogacane sokiem owocowym, co może świadczyć o modyfikującym wpływie składników owocowych na strukturę układu serwatkowego.

Podobne zróżnicowanie zaobserwowano w przypadku lepkości dynamicznej. Najwyższą wartość tego parametru odnotowano dla próbki kontrolnej otrzymanej z kwaśnej serwatki koziej bez dodatku soku owocowego, natomiast niższe wartości występowały w wielu wariantach z dodatkiem rokitnika lub dzikiej róży. Z technologicznego punktu widzenia wyniki te wskazują, że dodatki soków owocowych mogą istotnie poprawiać konsystencję fermentowanych napojów serwatkowych. Może to wynikać z obecności kwasów organicznych, składników mineralnych, związków fenolowych oraz innych substancji roślinnych, które oddziałują z białkami serwatkowymi i metabolitami fermentacyjnymi.

Kolejnym etapem oceny była analiza właściwości lepkosprężystych, obejmująca moduł zachowawczy  $G'$  oraz moduł stratności  $G''$ . Parametry te pozwalają scharakteryzować strukturę produktu i określić, czy dany układ wykazuje przewagę cech sprężystych, czy lepkich. W produktach płynnych, takich jak fermentowane napoje serwatkowe, analiza ta umożliwi lepsze zrozumienie wpływu składu receptury na stabilność, strukturę i odczucie teksturalne produktu.

**Tabela 6. Właściwości lepkosprężyste fermentowanych napojów serwatkowych w zależności od rodzaju serwatki i dodatku owocowego.**

Oznaczenie próbki	Charakterystyka wariantu	Moduł	
		zachowawczy G' [Pa]	Moduł stratności G'' [Pa]
SKKr/R	kwaśna serwatka krowia + sok z rokitnika	1,364 <sup>f</sup> ± 0,069	4,344 <sup>j</sup> ± 0,078
SSKr/R	słodka serwatka krowia + sok z rokitnika	0,772 <sup>d</sup> ± 0,002	2,334 <sup>fg</sup> ± 0,002
SSK/R	słodka serwatka kozia + sok z rokitnika	4,076 <sup>h</sup> ± 0,006	4,924 <sup>h</sup> ± 0,001
SKK/R	kwaśna serwatka kozia + sok z rokitnika	5,619 <sup>i</sup> ± 0,128	1,554 <sup>e</sup> ± 0,079
SSKr/DR	słodka serwatka krowia + sok z dzikiej róży	3,568 <sup>g</sup> ± 0,153	3,824 <sup>h</sup> ± 0,246
SSK/DR	słodka serwatka kozia + sok z dzikiej róży	0,350 <sup>c</sup> ± 0,004	2,438 <sup>g</sup> ± 0,004
SKKr/DR	kwaśna serwatka krowia + sok z dzikiej róży	4,848 <sup>i</sup> ± 0,025	0,127 <sup>a</sup> ± 0,017
SKK/DR	kwaśna serwatka kozia + sok z dzikiej róży	0,062 <sup>a</sup> ± 0,004	4,124 <sup>i</sup> ± 0,005
SSKr/NP	słodka serwatka krowia, bez dodatku	0,158 <sup>b</sup> ± 0,016	0,576 <sup>d</sup> ± 0,032

Oznaczenie próbki	Charakterystyka wariantu	Moduł	
		zachowawczy G' [Pa]	Moduł stratności G'' [Pa]
	soku		
SKKr/NP	kwaśna serwatka krowia, bez dodatku soku	0,040 <sup>a</sup> ± 0,022	0,280 <sup>b</sup> ± 0,024
SSK/NP	słodka serwatka kozia, bez dodatku soku	1,089 <sup>e</sup> ± 0,008	2,285 <sup>f</sup> ± 0,054
SKK/NP	kwaśna serwatka kozia, bez dodatku soku	0,104 <sup>a</sup> ± 0,017	0,436 <sup>c</sup> ± 0,021

**Objaśnienia:** Kr — serwatka krowia; K — serwatka kozia; SS — serwatka słodka; SK — serwatka kwaśna; R — sok z rokitnika zwyczajnego; DR — sok z dzikiej róży; NP — wariant bez dodatku soku owocowego. Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe. Różne litery w tej samej kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ .

Analiza modułów  $G'$  i  $G''$  umożliwiła bardziej wnikliwą ocenę struktury wewnętrznej badanych napojów niż sama ocena lepkości. Moduł zachowawczy  $G'$  odzwierciedla udział komponenty sprężystej układu, natomiast moduł stratności  $G''$  informuje o udziale komponenty lepkiej. W literaturze podkreśla się, że właściwości lepkosprężyste układów białkowych są ściśle powiązane ze stopniem uformowania struktury oraz charakterem oddziaływań pomiędzy składnikami matrycy (Cheong i in., 2016). Podobnie Pushpadass i in. (2015) wskazują, że analiza wartości  $G'$  i  $G''$  stanowi użyteczne narzędzie w ocenie stabilności strukturalnej napojów mlecznych oraz ich potencjalnych cech reologicznych. W badaniach własnych najwyższa wartość modułu  $G'$  w wariacie z kwaśną serwatką kozią i dodatkiem soku z rokitnika sugeruje silniej ukształtowaną komponentę sprężystą, podczas gdy niskie wartości tego parametru w wybranych próbach świadczą o bardziej płynnym, mniej usieciowanym charakterze układu. Zróżnicowanie uzyskanych wyników potwierdza, że zarówno typ serwatki, jak i rodzaj dodatku owocowego mogą być efektywnie wykorzystywane do kierunkowego kształtowania struktury fermentowanych napojów serwatkowych, w tym ich potencjalnych cech reologicznych.

Wyniki przedstawione w Tabeli 6 wykazały wyraźne zróżnicowanie właściwości lepkością badanych napojów. Najwyższą wartość modułu  $G'$  uzyskano dla próbki zawierającej kwaśną serwatkę kozią i sok z rokitnika, co wskazuje na większy udział cech sprężystych oraz bardziej uporządkowaną strukturę tego wariantu. Najniższą wartość  $G'$  stwierdzono natomiast w próbce z kwaśną serwatką kozią i sokiem z dzikiej róży, co może świadczyć o słabszej strukturze sprężystej. Zróżnicowanie wartości  $G'$  i  $G''$  potwierdza, że dodatki soków owocowych nie oddziaływały jednakowo na wszystkie warianty napojów, a ich wpływ zależał od rodzaju serwatki i pochodzenia surowca mlecznego.

Właściwości fizykochemiczne napojów oceniano przede wszystkim na podstawie wartości pH i kwasowości miareczkowej. Parametry te mają kluczowe znaczenie w przypadku fermentowanych produktów mlecznych, ponieważ wpływają na smak, stabilność mikrobiologiczną, trwałość, aktywność mikroorganizmów oraz właściwości białek. Wartość pH poniżej 4,6 jest istotna z punktu widzenia ograniczania rozwoju wielu mikroorganizmów niepożądanych i stanowi ważny element bezpieczeństwa produktu.

**Tabela 7. Wpływ rodzaju serwatki i dodatku owocowego na pH oraz kwasowość miareczkową fermentowanych napojów serwatkowych.**

Oznaczenie próbki	Charakterystyka wariantu	pH	Kwasowość miareczkowa [°SH]
SKKr/R	kwaśna serwatka krowia + sok z rokitnika	3,90 <sup>g</sup> ± 0,01	116,25 <sup>j</sup> ± 1,25
SSKr/R	słodka serwatka krowia + sok z rokitnika	3,98 <sup>h</sup> ± 0,02	135,00 <sup>l</sup> ± 1,25
SSK/R	słodka serwatka kozia + sok z rokitnika	3,84 <sup>f</sup> ± 0,01	109,58 <sup>i</sup> ± 0,72
SKK/R	kwaśna serwatka kozia + sok z rokitnika	3,82 <sup>e</sup> ± 0,01	127,08 <sup>k</sup> ± 0,72

Oznaczenie próbki	Charakterystyka wariantu	pH	Kwasowość miareczkowa [°SH]
SSKr/DR	słodka serwatka krowia + sok z dzikiej róży	2,91 <sup>a</sup> ± 0,01	79,58 <sup>h</sup> ± 0,72
SSK/DR	słodka serwatka kozia + sok z dzikiej róży	2,98 <sup>b</sup> ± 0,01	62,92 <sup>e</sup> ± 0,72
SKKr/DR	kwaśna serwatka krowia + sok z dzikiej róży	3,09 <sup>c</sup> ± 0,01	58,75 <sup>d</sup> ± 1,25
SKK/DR	kwaśna serwatka kozia + sok z dzikiej róży	2,90 <sup>a</sup> ± 0,01	71,67 <sup>f</sup> ± 1,91
SSKr/NP	słodka serwatka krowia, bez dodatku soku	4,19 <sup>i</sup> ± 0,01	24,65 <sup>b</sup> ± 0,35
SKKr/NP	kwaśna serwatka krowia, bez dodatku soku	3,60 <sup>d</sup> ± 0,00	52,63 <sup>c</sup> ± 0,09
SSK/NP	słodka serwatka kozia, bez dodatku soku	4,31 <sup>j</sup> ± 0,02	21,00 <sup>a</sup> ± 0,00
SKK/NP	kwaśna serwatka kozia, bez dodatku soku	3,61 <sup>d</sup> ± 0,01	76,00 <sup>g</sup> ± 0,82

**Objaśnienia:** Kr — serwatka krowia; K — serwatka kozia; SS — serwatka słodka; SK — serwatka kwaśna; R — sok z rokitnika zwyczajnego; DR — sok z dzikiej róży; NP — wariant bez dodatku soku owocowego. Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe. Różne litery w tej samej kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ .

Na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 7 stwierdzono, że pH fermentowanych napojów serwatkowych mieściło się w zakresie od 2,90 do 4,31. Najniższe pH uzyskano dla napoju na bazie kwaśnej serwatki koziej z dodatkiem soku z dzikiej róży, natomiast najwyższe dla próbki kontrolnej ze słodkiej serwatki koziej bez dodatku soku owocowego. Wyniki te wskazują, że dodatek soków owocowych, szczególnie dzikiej róży, wyraźnie zwiększał zakwaszenie napojów. Różnice te wynikały zarówno z naturalnej kwasowości zastosowanych soków, jak i z przebiegu procesu fermentacji.

Kwasowość miareczkowa, wyrażona w stopniach Soxhleta-Henkla, również istotnie różniła się pomiędzy wariantami. Najniższe wartości obserwowano w próbkach kontrolnych bez dodatku soku, natomiast najwyższe w napojach wzbogacanych sokiem owocowym, szczególnie rokitnika. Oznacza to, że dodatek soku owocowego był jednym z głównych czynników kształtujących profil kwasowości napojów. Z technologicznego punktu widzenia odpowiednio wysoka kwasowość sprzyja trwałości i bezpieczeństwu produktu, jednak jej nadmierny poziom może wymagać optymalizacji ze względu na akceptację sensoryczną. Wyniki oznaczeń pH oraz kwasowości miareczkowej uzyskane w badaniach własnych potwierdzają istotny wpływ dodatków owocowych na stopień zakwaszenia fermentowanych napojów serwatkowych. Szczególnie wyraźny efekt zaobserwowano w wariantach z dodatkiem soku z dzikiej róży, które charakteryzowały się najniższymi wartościami pH, co można wiązać z wysoką naturalną kwasowością tego surowca oraz obecnością kwasów organicznych. Zgodnie z doniesieniami Tomovskiej i in. (2016) proces fermentacji mlekowej prowadzi do zmniejszenia pH produktu w wyniku aktywności bakterii kwasu mlekowego i wytwarzania kwasów organicznych. Z kolei Cheong i in. (2016) wykazali, że dodatek kwaśnych komponentów owocowych do układów białkowych może istotnie modyfikować ich pH, kwasowość oraz właściwości strukturalne. W badaniach własnych wszystkie warianty napojów osiągnęły pH poniżej 4,6, co ma istotne znaczenie technologiczne i mikrobiologiczne, gdyż tak niskie pH ogranicza możliwość rozwoju wielu niepożądanych drobnoustrojów.

Ostatnim istotnym elementem oceny była jakość mikrobiologiczna fermentowanych napojów serwatkowych. Produkty otrzymywane z niepasteryzowanej serwatki wymagają szczególnie starannej kontroli mikrobiologicznej, ponieważ surowiec może stanowić źródło zarówno mikroflory pożądaney, jak i niepożądaney. W badaniach oceniano obecność mikroorganizmów chorobotwórczych oraz wskaźników higieny procesu, w tym *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., gronkowców koagulazo-dodatnich, bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae* oraz *Escherichia coli*.

**Tabela 8. Jakość mikrobiologiczna fermentowanych ekologicznych napojów serwatkowych z dodatkiem ekologicznych soków owocowych.**

Próba	$\beta$ -glukuronidazo- dodatnie <i>Escherichia coli</i> [jtk/g]	Enterobacteriaceae [jtk/g]	Gronkowce koagulazo- dodatnie [jtk/g]	<i>Listeria</i> <i>monocytogenes</i> [jtk/g]	<i>Salmonella</i> spp. [w 25 g]
SKKr/R	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SSKr/R	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SSK/R	$<4,0 \times 10^1$	$<4,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SKK/R	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SSKr/DR	$<1,0 \times 10^1$	$<4,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SSK/DR	$8,0 \times 10^1$	$1,5 \times 10^2$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SKKr/DR	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SKK/DR	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SSKr/NP	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SKKr/NP	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SSK/NP	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto
SKK/NP	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	nie wykryto

**Objaśnienia:**

SKKr/R — niepasteryzowana kwaśna serwatka krowia z sokiem z rokitnika zwyczajnego; SSKr/R — niepasteryzowana słodka serwatka krowia z sokiem z rokitnika zwyczajnego; SSK/R — niepasteryzowana słodka serwatka kozia z sokiem z rokitnika zwyczajnego; SKK/R — niepasteryzowana kwaśna serwatka kozia z sokiem z rokitnika zwyczajnego; SKKr/DR — niepasteryzowana kwaśna serwatka krowia z sokiem z dzikiej róży; SSKr/DR — niepasteryzowana słodka serwatka krowia z sokiem z dzikiej róży; SSK/DR — niepasteryzowana słodka serwatka kozia z sokiem z dzikiej róży; SKK/DR — niepasteryzowana kwaśna serwatka kozia z sokiem z dzikiej róży; SSKr/NP — niepasteryzowana słodka serwatka krowia bez dodatku soku; SKKr/NP — niepasteryzowana kwaśna serwatka krowia bez dodatku soku; SSK/NP — niepasteryzowana słodka serwatka kozia bez dodatku soku; SKK/NP — niepasteryzowana kwaśna serwatka kozia bez dodatku soku.

jtk — jednostki tworzące kolonie; NP — wariant kontrolny bez dodatku soku owocowego.

Wyniki potwierdziły, że opracowane fermentowane napoje serwatkowe charakteryzowały się odpowiednią jakością mikrobiologiczną. Nie stwierdzono obecności *Salmonella* spp., a poziom pozostałych analizowanych mikroorganizmów nie wskazywał na zagrożenie bezpieczeństwa produktu. Uzyskane dane dowodzą, że przy zachowaniu odpowiednich warunków technologicznych możliwe jest wykorzystanie niepasteryzowanej ekologicznej serwatki do otrzymywania fermentowanych napojów o akceptowalnej jakości mikrobiologicznej. Wyniki analiz mikrobiologicznych potwierdzają, że zastosowana technologia fermentacji umożliwiła otrzymanie napojów o korzystnej jakości higienicznej, pomimo wykorzystania niepasteryzowanej serwatki. Brak wykrycia bakterii z rodzaju *Salmonella* w 25 g produktu oraz bardzo niskie poziomy *Listeria monocytogenes*, gronkowców koagulazo-dodatnich, *Escherichia coli* i *Enterobacteriaceae* świadczą o skutecznej kontroli przebiegu procesu technologicznego oraz właściwym doborze parametrów fermentacji. Zgodnie z doniesieniami Sionek i in. (2023) bakterie fermentacji mlekowej mogą ograniczać rozwój mikroorganizmów niepożądanych poprzez obniżanie pH środowiska, konkurencję o składniki odżywcze oraz produkcję metabolitów o działaniu przeciwdrobnoustrojowym. Podobne wnioski przedstawili Kadyan i in. (2021), wykazując, że fermentacja serwatki z udziałem bakterii kwasu mlekowego i drożdży przyczynia się do poprawy profilu mikrobiologicznego oraz zwiększenia aktywności przeciwdrobnoustrojowej produktu. W badaniach własnych dodatkowym czynnikiem sprzyjającym stabilności mikrobiologicznej mogła być obecność kwaśnych soków owocowych, zwłaszcza z dzikiej róży i rokitnika, dostarczających związków fenolowych i kwasów organicznych o potencjalnym działaniu antymikrobiologicznym.

Wyniki przedstawione w **publikacji I** potwierdzają, że ekologiczna serwatka kozia i krowia może być efektywnie wykorzystana jako baza do projektowania fermentowanych napojów funkcjonalnych o zróżnicowanych właściwościach technologicznych. Dodatek soku z rokitnika zwyczajnego lub dzikiej róży istotnie wpływał na lepkość, właściwości lepkosprężyste, pH oraz kwasowość miareczkową, umożliwiając tym samym kierunkowe modyfikowanie struktury, stabilności i potencjalnej atrakcyjności sensorycznej otrzymanych produktów. Uzyskane wyniki pozostają w zgodzie z obserwacjami Verardo i in. (2020), którzy podkreślają, że fermentacja oraz zastosowanie bioaktywnych składników pochodzenia roślinnego mogą przyczyniać się do zwiększenia wartości funkcjonalnej żywności.

## **6.2. Badania dotyczące wpływu rodzaju serwatki i dodatku soków owocowych na profil kwasów tłuszczowych, zawartość składników mineralnych, zawartość polifenoli i aktywność przeciwutleniającą fermentowanych napojów serwatkowych (publikacja II)**

Ocena jakości fermentowanych napojów serwatkowych nie powinna ograniczać się wyłącznie do parametrów technologicznych, takich jak pH, kwasowość, lepkość, właściwości reologiczne czy bezpieczeństwo mikrobiologiczne. W przypadku żywności funkcjonalnej szczególnego znaczenia nabiera także charakterystyka składników bioaktywnych i żywieniowych, które mogą decydować o potencjale prozdrowotnym produktu. Do kluczowych wyróżników należą całkowita zawartość polifenoli, aktywność przeciwutleniająca, profil kwasów tłuszczowych oraz zawartość składników mineralnych, w tym zawartość pierwiastków śladowych i potencjalnie toksycznych.

Serwatka, jako produkt uboczny przemysłu mleczarskiego, zawiera składniki o istotnym znaczeniu żywieniowym, w tym białka serwatkowe, peptydy bioaktywne, laktozę i składniki mineralne. Jej zastosowanie w produkcji fermentowanych napojów pozwala nie tylko na racjonalne zagospodarowanie surowca ubocznego, lecz także na otrzymanie produktu wpisującego się w założenia zrównoważonego przetwórstwa i gospodarki o obiegu zamkniętym (Królczyk i in., 2016; Darewicz i in., 2011; Yiğit i in., 2023; Verardo i in., 2020; Sionek i in., 2023). Szczególnie istotne jest wykorzystanie serwatki ekologicznej, ponieważ umożliwia projektowanie produktów o naturalnym składzie, odpowiadających oczekiwaniom konsumentów poszukujących żywności mniej przetworzonej i o potwierdzonej wartości funkcjonalnej.

W ostatnich latach coraz większą uwagę zwraca się na wzbogacanie produktów mlecznych i serwatkowych składnikami pochodzenia roślinnego. Surowce takie jak dzika róża (*Rosa canina L.*) i rokitnik zwyczajny (*Hippophae rhamnoides L.*) są szczególnie interesujące, ponieważ stanowią źródło związków o aktywności bioaktywnej, w tym polifenoli, flawonoidów, karotenoidów, witaminy C, tokoferoli oraz wybranych frakcji lipidowych. Dzika róża jest ceniona przede wszystkim ze względu na wysoką zawartość związków fenolowych, kwasu askorbinowego i karotenoidów, które mogą wpływać na zdolność neutralizowania wolnych rodników oraz wzmacniać potencjał przeciwutleniający żywności (Negrean i in., 2024; Bakhtiar i in., 2023; Igual i in., 2022; Peña i in., 2023). Rokitnik zwyczajny zawiera natomiast karotenoidy, tokoferole, flawonoidy, kwasy organiczne oraz nienasycone kwasy tłuszczowe, co czyni go wartościowym surowcem w projektowaniu żywności funkcjonalnej (Ji i in., 2020; Jaśniewska i Diowski, 2021; Schubertová i in., 2021; Wang i in., 2022).

W publikacji II pt. „*Assessment of Fatty Acid Profile, Mineral Composition, and Antioxidant Activity of Fermented Whey Beverages from Organic Cow and Goat Whey with the Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices*” przeprowadzono rozszerzoną ocenę wartości funkcjonalnej fermentowanych napojów serwatkowych otrzymanych z ekologicznej serwatki koziej i krowiej, kwaśnej i słodkiej, wzbogacanych sokiem z rokitnika zwyczajnego lub dzikiej róży. Badania te stanowiły kontynuację publikacji I, w której oceniano głównie właściwości fizykochemiczne, reologiczne i mikrobiologiczne fermentowanych napojów serwatkowych. W publikacji II zakres analiz poszerzono o ocenę całkowitej zawartości polifenoli, aktywności przeciwutleniającej oznaczanej metodami DPPH, ABTS i FRAP, profil kwasów tłuszczowych oraz zawartość składników mineralnych, pierwiastków śladowych i metali potencjalnie toksycznych.

Metody DPPH, ABTS i FRAP pozwalają na ocenę różnych mechanizmów aktywności przeciwutleniającej. Test DPPH określa zdolność próbki do neutralizowania wolnych rodników, metoda ABTS umożliwia ocenę wygaszania kationorodnika ABTS, natomiast FRAP określa zdolność redukcyjną badanej próbki (Benzie i Strain, 1996; Szafrńska i in., 2024). Z kolei całkowita zawartość polifenoli, oznaczana najczęściej metodą Folina-Ciocalteu, pozwala określić udział związków fenolowych w potencjale bioaktywnym produktu. Łączne zastosowanie tych metod umożliwia pełniejszą ocenę aktywności przeciwutleniającej napojów, ponieważ poszczególne grupy związków bioaktywnych mogą działać poprzez odmienne mechanizmy. Ocena aktywności przeciwutleniającej produktów wzbogacanych składnikami roślinnymi wymaga zastosowania kilku uzupełniających się metod analitycznych, ponieważ pojedynczy test nie jest w stanie odzwierciedlić złożonego charakteru reakcji antyoksydacyjnych. Benzie i Strain (1996) wskazali, że metoda FRAP umożliwia ocenę zdolności redukcyjnej próbki, lecz nie opisuje wszystkich mechanizmów neutralizacji wolnych rodników. Z kolei Pérez i in. (2023) podkreślili, że oznaczenie całkowitej zawartości polifenoli metodą Folina-Ciocalteu powinno być traktowane jako wskaźnik ogólnego potencjału redukcyjnego, a nie jako miara ilości pojedynczej, jednorodnej grupy związków fenolowych. W tym kontekście łączne wykorzystanie metod DPPH, ABTS, FRAP oraz oznaczenia TPC pozwala uzyskać pełniejszą i bardziej wiarygodną charakterystykę potencjału bioaktywnego fermentowanych napojów serwatkowych.

**Tabela 9. Aktywność przeciwutleniająca oraz zawartość polifenoli w fermentowanych napojach serwatkowych wzbogacanych sokiem z rokitnika lub dzikiej róży.**

Oznaczenie próbki	Charakterystyka wariantu	DPPH [% inhibicji]	ABTS [% inhibicji]	FRAP [mmol TE/L]	Polifenole [mg/100 g]
SKK/DR	kwaśna serwatka kozia + sok z dzikiej róży	80,99 <sup>e</sup> ± 0,94	36,40 <sup>i</sup> ± 0,44	1,022 <sup>h</sup> ± 0,018	351,7 <sup>c</sup> ± 1,91
SKK/NP	kwaśna serwatka kozia, bez dodatku soku	61,57 <sup>d</sup> ± 0,63	45,14 <sup>k</sup> ± 0,15	0,761 <sup>e</sup> ± 0,012	21,2 <sup>a</sup> ± 1,50
SKK/R	kwaśna serwatka kozia + sok z rokitnika	41,52 <sup>a</sup> ± 0,68	14,44 <sup>c</sup> ± 0,20	0,599 <sup>c</sup> ± 0,009	39,1 <sup>a</sup> ± 2,89
SKKr/DR	kwaśna serwatka krowia + sok z dzikiej róży	91,00 <sup>g</sup> ± 1,78	34,95 <sup>h</sup> ± 0,24	0,979 <sup>g</sup> ± 0,011	421,6 <sup>e</sup> ± 13,30
SKKr/NP	kwaśna serwatka krowia, bez dodatku soku	48,77 <sup>b</sup> ± 0,72	13,18 <sup>b</sup> ± 0,14	0,449 <sup>a</sup> ± 0,004	28,5 <sup>a</sup> ± 0,44
SKKr/R	kwaśna serwatka krowia + sok z rokitnika	94,62 <sup>h</sup> ± 0,66	3,10 <sup>a</sup> ± 0,04	0,815 <sup>f</sup> ± 0,006	41,9 <sup>a</sup> ± 2,81
SSK/DR	słodka serwatka kozia + sok z dzikiej róży	49,51 <sup>b</sup> ± 0,32	42,05 <sup>j</sup> ± 0,61	1,162 <sup>j</sup> ± 0,011	327,5 <sup>b</sup> ± 19,90
SSK/NP	słodka serwatka kozia, bez dodatku soku	57,23 <sup>c</sup> ± 0,27	29,55 <sup>f</sup> ± 0,37	0,691 <sup>d</sup> ± 0,002	23,2 <sup>a</sup> ± 1,82
SSK/R	słodka	43,73 <sup>a</sup> ±	3,01 <sup>a</sup> ± 0,02	0,536 <sup>b</sup> ±	41,4 <sup>a</sup> ± 1,10

Oznaczenie próbki	Charakterystyka wariantu	DPPH [% inhibicji]	ABTS [% inhibicji]	FRAP [mmol TE/L]	Polifenole [mg/100 g]
	serwatka kozia + sok z rokitnika	0,51		0,006	
SSKr/DR	słodka serwatka krowia + sok z dzikiej róży	92,55 <sup>g</sup> ± 1,10	32,87 <sup>g</sup> ± 0,18	1,122 <sup>i</sup> ± 0,017	379,3 <sup>d</sup> ± 8,62
SSKr/NP	słodka serwatka krowia, bez dodatku soku	58,42 <sup>c</sup> ± 0,68	25,88 <sup>e</sup> ± 0,42	0,772 <sup>c</sup> ± 0,009	26,5 <sup>a</sup> ± 1,61
SSKr/R	słodka serwatka krowia + sok z rokitnika	86,28 <sup>f</sup> ± 0,29	19,05 <sup>d</sup> ± 0,31	0,519 <sup>b</sup> ± 0,005	41,4 <sup>a</sup> ± 2,46

**Objaśnienia:** Kr — serwatka krowia; K — serwatka kozia; SS — serwatka słodka; SK — serwatka kwaśna; R — sok z rokitnika zwyczajnego; DR — sok z dzikiej róży; NP — wariant bez dodatku soku owocowego. Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe. Różne litery w tej samej kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ .

Ocena aktywności przeciwutleniającej wykazała, że zastosowany dodatek soków owocowych był jednym z głównych czynników kształtujących potencjał bioaktywny fermentowanych napojów serwatkowych. Szczególnie korzystny wpływ zaobserwowano w przypadku dodatku soku z dzikiej róży. Napoje zawierające ten składnik charakteryzowały się najwyższą całkowitą zawartością polifenoli oraz wysokimi wartościami aktywności przeciwutleniającej oznaczonej metodami DPPH i FRAP. Warianty z dziką różą osiągały wielokrotnie wyższą zawartość związków fenolowych niż próbki kontrolne oraz napoje z dodatkiem soku z rokitnika.

Najwyższą zawartość polifenoli stwierdzono w napoju otrzymanym z kwaśnej serwatki krowiej z dodatkiem soku z dzikiej róży. Wysokie wartości tego parametru uzyskano również w wariantach ze słodkiej serwatki krowiej oraz kwaśnej serwatki koziej z dodatkiem dzikiej róży. Wyniki te potwierdzają, że dzika róża była głównym źródłem związków fenolowych w badanych produktach. Warianty z rokitnikiem charakteryzowały się istotnie niższą zawartością polifenoli, jednak w wybranych próbkach wykazywały wysoką aktywność

oznaczoną metodą DPPH, co może wskazywać na udział innych grup związków przeciwutleniających, takich jak karotenoidy, tokoferole lub witamina C. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że sok z dzikiej róży był kluczowym czynnikiem zwiększającym zawartość polifenoli oraz potencjał redukcyjny fermentowanych napojów serwatkowych. Jest to spójne z publikacjami Gruszeckiego i in. (2024), którzy wykazali, że owoce dzikiej róży stanowią bogate źródło związków bioaktywnych, w tym polifenoli oraz składników o wysokiej aktywności przeciwutleniającej. Również Bakhtiar i in. (2023) podkreślili, że skład chemiczny dzikiej róży obejmuje zarówno kwasy tłuszczowe obecne w nasionach, jak i liczne związki biologicznie aktywne, co uzasadnia jej wykorzystanie w projektowaniu produktów funkcjonalnych. Uzyskane w badaniach własnych najwyższe wartości TPC i FRAP w wariantach z dodatkiem soku z dzikiej róży potwierdzają, że surowiec ten może pełnić rolę naturalnego wzmacniacza potencjału przeciwutleniającego napojów serwatkowych.

Warianty z dodatkiem rokitnika zwyczajnego charakteryzowały się niższą zawartością polifenoli w porównaniu z napojami z dziką różą, jednak w wybranych próbach wykazywały wysoką aktywność przeciwutleniającą oznaczaną metodą DPPH. Zjawisko to można wiązać z odmiennym profilem związków bioaktywnych rokitnika, wśród których istotną rolę odgrywają nie tylko polifenole, lecz także karotenoidy, tokoferole oraz witamina C. Jaśniewska i Diowks (2021) zwracają uwagę, że rokitnik zawiera szerokie spektrum związków aktywnych, uczestniczących w ochronie przed stresem oksydacyjnym i istotnych w kontekście projektowania żywności funkcjonalnej. Z kolei Ji i in. (2020) podkreślili, że polifenole rodzaju *Hippophae* wykazują aktywność przeciwutleniającą poprzez zróżnicowane mechanizmy, obejmujące neutralizację wolnych rodników, działanie redukcyjne oraz wspomaganie endogennych układów antyoksydacyjnych. Zróżnicowanie wyników uzyskanych metodami DPPH, ABTS i FRAP wskazuje, że aktywność przeciwutleniająca badanych napojów była efektem działania różnych grup związków bioaktywnych. Metoda DPPH odzwierciedla przede wszystkim zdolność neutralizowania wolnych rodników, metoda ABTS pozwala ocenić wygaszanie kationorodnika ABTS, natomiast FRAP określa zdolność redukcyjną próbki. Wysokie wartości FRAP w wariantach z dziką różą sugerują, że związki obecne w tym surowcu wykazywały szczególnie silny potencjał redukcyjny. Z kolei wybrane warianty z rokitnikiem osiągały wysoką aktywność DPPH mimo niższej zawartości polifenoli, co potwierdza odmienny mechanizm działania związków bioaktywnych obecnych w rokitniku. Wyniki te są spójne z doniesieniami literaturowymi, w których podkreśla się udział zarówno polifenoli, jak i karotenoidów oraz tokoferoli w kształtowaniu aktywności

przeciwutleniającej produktów z udziałem rokitnika (Sytářová i in., 2020; Jaśniewska i Diowks, 2021; Wang i in., 2022).

**Tabela 10. Wskaźniki relacji aktywności przeciwutleniającej fermentowanych napojów serwatkowych wzbogacanych sokiem z dzikiej róży lub rokitnika.**

Rodzaj dodatku owocowego	DPPH/FRAP	FRAP/ABTS	TPC/DPPH
Dzika róża ( <i>Rosa canina</i> )	74,3 ± 21,9	0,029 ± 0,003	4,9 ± 1,1
Rokitnik zwyczajny ( <i>Hippophae rhamnoides</i> )	108,3 ± 43,4	0,127 ± 0,113	0,7 ± 0,3

**Objaśnienia:** DPPH/FRAP — relacja zdolności wygaszania rodnika DPPH do zdolności redukcyjnej FRAP; FRAP/ABTS — relacja zdolności redukcyjnej FRAP do zdolności wygaszania kationorodnika ABTS; TPC/DPPH — relacja całkowitej zawartości polifenoli do aktywności oznaczonej metodą DPPH. Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe.

Analiza relacji pomiędzy wskaźnikami aktywności przeciwutleniającej pozwoliła lepiej scharakteryzować mechanizmy działania badanych dodatku soków owocowych. Warianty z dodatkiem dzikiej róży cechowały się wyraźnie wyższym udziałem polifenoli w kształtowaniu potencjału przeciwutleniającego, co potwierdzała wysoka wartość relacji TPC/DPPH. Oznacza to, że w napojach z dziką różą związki fenolowe stanowiły zasadniczy czynnik odpowiedzialny za aktywność przeciwutleniającą. W napojach z dodatkiem rokitnika obserwowano natomiast wyższe wartości relacji DPPH/FRAP, co może świadczyć o dominującym znaczeniu związków wykazujących silną aktywność rodnikową, typowych m.in. dla karotenoidów i tokoferoli. Wyniki te wskazują, że dzika róża i rokitnik nie powinny być traktowane jako dodatki o identycznym mechanizmie działania, lecz jako surowce wzajemnie się uzupełniające pod względem profilu związków bioaktywnych.

Analiza relacji pomiędzy zastosowanymi wskaźnikami aktywności przeciwutleniającej potwierdza, że dzika róża i rokitnik kształtowały potencjał bioaktywny napojów poprzez odmienne mechanizmy. Wyższe wartości stosunku TPC/DPPH w wariantach z dodatkiem dzikiej róży wskazują na większy udział polifenoli w neutralizowaniu wolnych rodników oraz w ogólnej zdolności redukcyjnej produktu. Podobne zależności opisali Bratu i in. (2018),

którzy wykazali korelacje pomiędzy zawartością polifenoli, poziomem wybranych mikroelementów a aktywnością przeciwutleniającą naparów owocowych.

W przypadku rokitnika niższe wartości TPC/DPPH sugerują, że za obserwowaną aktywność przeciwutleniającą odpowiadały w istotnym stopniu także inne grupy związków niż polifenole, w szczególności karotenoidy i witamina C. Wang i in. (2022) zwrócili uwagę, że rokitnik charakteryzuje się złożonym profilem fitochemicznym, a jego aktywność przeciwutleniająca jest efektem synergistycznego współdziałania polifenoli, flawonoidów, karotenoidów, tokoferoli oraz frakcji lipidowych. Kolejnym etapem badań była ocena profilu kwasów tłuszczowych fermentowanych napojów serwatkowych. Mimo że serwatka nie jest surowcem wysokotłuszczowym, obecność tłuszczu mlecznego oraz frakcji lipidowych pochodzących z dodatków owocowych może wpływać na końcowy profil kwasów tłuszczowych produktu. Szczególne znaczenie mają nasycone kwasy tłuszczowe charakterystyczne dla produktów mlecznych, krótko- i średniołańcuchowe kwasy tłuszczowe obecne w tłuszczu mlecznym oraz nienasycone kwasy tłuszczowe częściowo wnoszone przez dodatki roślinne.

**Tabela 11. Zawartość kwasów omega-6 i omega-3 oraz stosunek n-6/n-3 w fermentowanych napojach serwatkowych i sokach owocowych.**

Oznaczenie próbki	Charakterystyka wariantu	Omega-6	Omega-3	Stosunek n-6/n-3
SKK/R	kwaśna serwatka kozia + sok z rokitnika	0,229	0,040	5,73
SKK/DR	kwaśna serwatka kozia + sok z dzikiej róży	0,089	0,000	NC
SSK <sub>r</sub> /NP	słodka serwatka krowia, bez dodatku soku	0,040	0,003	13,33
SKK <sub>r</sub> /DR	kwaśna serwatka krowia + sok z dzikiej róży	0,006	0,009	0,67
SKK <sub>r</sub> /NP	kwaśna serwatka krowia, bez dodatku soku	0,028	0,034	0,82
SSK <sub>r</sub> /R	słodka serwatka krowia + sok z rokitnika	0,124	0,028	4,43
SKK/NP	kwaśna serwatka kozia, bez dodatku soku	0,084	0,053	1,58
SSK/NP	słodka serwatka kozia, bez dodatku soku	0,067	0,046	1,46
SSK/DR	słodka serwatka kozia + sok z dzikiej róży	0,015	0,011	1,36
SKK <sub>r</sub> /R	kwaśna serwatka krowia + sok z rokitnika	0,103	0,018	5,72
SSK/R	słodka serwatka kozia + sok z rokitnika	0,106	0,021	5,05
Sok z dzikiej róży	sok owocowy	0,0044	0,0028	1,57
Sok z rokitnika zwyčajnego	sok owocowy	0,062	0,005	12,40

**Objaśnienia:** Kr — serwatka krowia; K — serwatka kozia; SS — serwatka słodka; SK — serwatka kwaśna; R — sok z rokitnika zwyčajnego; DR — sok z dzikiej róży; NP — wariant bez dodatku soku owocowego; NC — nie obliczono ze względu na brak oznaczalnej zawartości kwasów omega-3.

Analiza profilu kwasów tłuszczowych wykazała, że we wszystkich badanych napojach dominującą frakcją stanowiły nasycone kwasy tłuszczowe, głównie kwas palmitynowy oraz krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe typowe dla lipidów mlecznych. Jednocześnie zastosowanie soku z dzikiej róży lub rokitnika modyfikowało udział kwasów jedno- i wielonienasyconych. Warianty z dodatkiem dzikiej róży charakteryzowały się korzystniejszym udziałem wielonienasyconych kwasów tłuszczowych oraz wybranych kwasów z rodziny omega-3, co może wynikać z obecności odpowiedniej frakcji lipidowej

w tym surowcu. Z kolei napoje z dodatkiem rokitnika wykazywały większy udział niektórych jednonienasyconych kwasów tłuszczowych, w tym kwasu palmitooleinowego, charakterystycznego dla frakcji lipidowej rokitnika. Profil kwasów tłuszczowych fermentowanych napojów serwatkowych był zdeterminowany zarówno przez pochodzenie serwatki, jak i rodzaj zastosowanego dodatku owocowego. Dominacja nasyconych kwasów tłuszczowych, w tym kwasu palmitynowego, jest typowa dla frakcji lipidowej pochodzenia mlecznego, natomiast obecność krótko- i średniołańcuchowych kwasów tłuszczowych w wariantach na bazie serwatki koziej potwierdza odrębność tej matrycy w stosunku do serwatki krowiej. Zgodnie z doniesieniami Alkaisy i in. (2023) mleko kozie oraz jego frakcje białkowo-lipidowe mogą wykazywać odmienne właściwości żywieniowe i funkcjonalne niż mleko krowie, co może przekładać się na jakość produktów fermentowanych.

Dodatek soku z dzikiej róży sprzyjał zwiększeniu udziału wielonienasyconych kwasów tłuszczowych w wybranych wariantach, natomiast rokitnik wpływał przede wszystkim na wzrost zawartości kwasów jednonienasyconych, w tym kwasu palmitooleinowego. Máté i in. (2022) wykazali, że owoce i nasiona różnych genotypów rokitnika różnią się właściwościami fizykochemicznymi oraz profilem kwasów tłuszczowych, co podkreśla znaczenie odmiany i pochodzenia surowca roślinnego. Z kolei Tereshchuk i in. (2020) zwrócili uwagę, że oleje z rokitnika i dzikiej róży mogą stanowić źródło składników lipidowych o istotnym znaczeniu funkcjonalnym. Wyniki własne potwierdzają, że nawet w produktach o stosunkowo niskiej zawartości tłuszczu, takich jak napoje serwatkowe, dodatek surowców owocowych może modyfikować profil lipidowy i w pewnym stopniu poprawiać jego wartość żywieniową.

Stosunek kwasów omega-6 do omega-3 stanowi ważny wskaźnik jakości żywieniowej frakcji lipidowej. W badaniach własnych najkorzystniejsze wartości tego wskaźnika odnotowano w wybranych wariantach z dodatkiem dzikiej róży oraz w części próbek kontrolnych, podczas gdy napoje z rokitnikiem zwykle charakteryzowały się wyższym stosunkiem n-6/n-3, co można wiązać z naturalnym składem lipidowym tego surowca, obejmującym znaczący udział kwasów jednonienasyconych oraz wybranych kwasów omega-6. Interpretując te wyniki, należy jednak uwzględnić niską całkowitą zawartość tłuszczu w napojach serwatkowych, przez co profil kwasów tłuszczowych powinien być traktowany przede wszystkim jako element charakterystyki funkcjonalnej, a nie jako główne kryterium oceny wartości odżywczej produktu. Ostatnim elementem rozszerzonej oceny funkcjonalnej była analiza zawartości składników mineralnych oraz zawartości pierwiastków

śladowych i potencjalnie toksycznych. Produkty serwatkowe mogą stanowić źródło składników mineralnych, takich jak wapń, cynk, żelazo, mangan i selen. Jednocześnie w przypadku żywności ekologicznej szczególnie istotna jest kontrola obecności pierwiastków niepożądanych, takich jak arsen, kadm, ołów i rtęć, które mogą pochodzić z zanieczyszczenia środowiska, surowców roślinnych lub procesów technologicznych.

**Tabela 12. Zawartość składników mineralnych oraz pierwiastków śladowych w fermentowanych napojach serwatkowych wzbogacanych sokiem z rokitnika lub dzikiej róży.**

Oznaczenie	Charakterystyka	Ca [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mn [mg/kg]	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Se [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Co [mg/kg]	Hg [mg/kg]
nie próbki	warian tu											
SKK/R	kwaśna serwatka kozia + sok z rokitnika	639	8,76	6,15	1,40	0,012	0,007	0,072	0,274	0,066	0,004	<LOQ = 0,005
SKK/DR	kwaśna serwatka kozia + sok z dzikiej róży	859	0,753	3,65	2,34	0,011	0,004	0,044	0,251	0,007	0,003	<LOQ = 0,005
SSKf/NP	słodka serwatka krowia, bez dodatku soku	297	<LOQ = 0,1	4,41	<LOQ = 0,005	0,012	<LOQ = 0,001	0,047	0,274	<LOQ = 0,005	0,001	<LOQ = 0,005
SKKf/D R	kwaśna serwatka krowia + sok z dzikiej róży	812	1,88	4,51	2,29	0,011	0,004	0,040	0,240	<LOQ = 0,005	0,003	<LOQ = 0,005
SKKf/NP	kwaśna serwatka krowia, bez dodatku	961	7,30	5,83	<LOQ = 0,005	0,014	<LOQ = 0,001	0,047	0,270	<LOQ = 0,005	0,004	<LOQ = 0,005

SKK/r/R	soku																			
	kwaśna serwatka	347	3,78	4,30	0,361	0,007	<LOQ = 0,001	0,032	0,196	0,081	0,002	<LOQ = 0,005								
	krowia + sok z rokitnika																			
SKK/NP	kwaśna serwatka	1050	<LOQ = 0,1	5,63	<LOQ = 0,005	0,016	<LOQ = 0,001	0,058	0,311	<LOQ = 0,005	0,003	<LOQ = 0,005								
	kozia, bez dodatku soku																			
	slodka serwatka	312	<LOQ = 0,1	1,57	<LOQ = 0,005	0,063	<LOQ = 0,001	0,072	0,291	<LOQ = 0,005	0,002	<LOQ = 0,005								
SSK/DR	slodka serwatka	322	0,894	2,51	2,59	0,008	0,005	0,050	0,241	<LOQ = 0,005	0,003	<LOQ = 0,005								
	kozia + sok z dzikiej róży																			
	kwaśna serwatka	562	<LOQ = 0,1	4,43	<LOQ = 0,005	0,011	<LOQ = 0,001	0,054	0,254	0,072	0,003	<LOQ = 0,005								
SSK/R	krowia + sok z rokitnika																			
	slodka serwatka	165	4,71	4,44	0,574	0,012	0,007	0,056	0,260	0,061	0,002	<LOQ = 0,005								
	kozia + sok z rokitnika																			
Sok z dzikiej róży	sok owocowy	641	1,59	3,03	6,49	0,009	0,010	0,054	0,237	0,042	0,004	<LOQ = 0,005								

Sok z	sok	75,1	13,10	2,64	2,13	0,004	0,016	0,110	0,230	0,218	0,003	<LOQ = 0,005
rokitnika	owocow											
zwyyczajn	y											
ego												

**Objaśnienia:** Kr — serwatka krowia; K — serwatka kozia; SS — serwatka słodka; SK — serwatka kwaśna; R — sok z rokitnika zwyyczajnego; DR — sok z dzikiej róży; NP — wariant bez dodatku soku owocowego; LOQ — granica oznaczalności metody.

Analiza zawartości składników mineralnych wykazała, że fermentowane napoje serwatkowe mogą stanowić źródło wybranych pierwiastków istotnych z punktu widzenia wartości żywieniowej, takich jak wapń, żelazo, cynk, mangan i selen. Obecność tych składników wynikała zarówno z naturalnego profilu mineralnego serwatki, jak i z udziału dodatków owocowych. Cruijssen i in. (2019) podkreślają, że produkty mleczne oraz żywność specjalnego przeznaczenia powinny być oceniane pod kątem zawartości składników mineralnych i pierwiastków śladowych, które stanowią ważne wyróżniki ich jakości żywieniowej. W badaniach własnych szczególnie wyraźny był wpływ dodatku rokitnika na wzrost zawartości żelaza i niklu, natomiast sok z dzikiej róży oraz sam surowiec owocowy charakteryzowały się podwyższoną zawartością manganu.

Równoległe z oceną składników mineralnych konieczna była kontrola zawartości pierwiastków potencjalnie toksycznych, takich jak arsen, kadm, ołów i rtęć. Uzyskane wyniki wykazały, że ich poziomy pozostawały niskie i nie wskazywały na zagrożenie bezpieczeństwa zdrowotnego produktu, co ma szczególne znaczenie w przypadku żywności ekologicznej, od której oczekuje się zarówno podwyższonej wartości funkcjonalnej, jak i wysokiego poziomu bezpieczeństwa surowcowego. Bobková i in. (2021) zwracają uwagę, że zawartość metali ciężkich w produktach roślinnych i naparach może zależeć od pochodzenia surowca, stopnia przetworzenia oraz warunków środowiskowych, co uzasadnia konieczność rutynowej kontroli tych pierwiastków w produktach wzbogacanych dodatkami roślinnymi.

Niskie poziomy kadmu, ołowiu i rtęci stwierdzone w badaniach własnych potwierdzają, że zastosowane surowce oraz parametry procesu technologicznego nie sprzyjały niekorzystnej kumulacji metali ciężkich. Zgodność uzyskanych wyników z obowiązującymi wymaganiami w zakresie bezpieczeństwa żywności jest istotna również w kontekście regulacji Unii Europejskiej dotyczących dopuszczalnych poziomów zanieczyszczeń w środkach spożywczych. Połączenie ekologicznej serwatki z sokami z dzikiej róży i rokitnika pozwoliło uzyskać produkty o korzystnym profilu mineralnym przy jednoczesnym utrzymaniu niskiego poziomu pierwiastków niepożądanych, co wzmacnia ich potencjał jako ekologicznych napojów funkcjonalnych.

Podsumowując, wyniki badań przedstawionych w **publikacji II** wykazały, że rozszerzona ocena składu chemicznego oraz potencjału bioaktywnego fermentowanych napojów serwatkowych umożliwiła pełniejsze określenie ich wartości funkcjonalnej. Dodatek soku z dzikiej róży szczególnie silnie zwiększał zawartość polifenoli oraz aktywność przeciwutleniającą, zwłaszcza w zakresie zdolności redukcyjnej i neutralizowania wolnych

rodników. Rokitnik zwyczajny wnosił natomiast odmienny profil bioaktywny, związany z obecnością karotenoidów, tokoferoli, związków fenolowych oraz frakcji lipidowych, a także wpływał na zawartość wybranych pierwiastków mineralnych. Profil kwasów tłuszczowych potwierdził dominację frakcji nasyconej, typowej dla produktów mlecznych, przy jednoczesnym wykazaniu, że dodatki owocowe mogą modyfikować udział kwasów jedno- i wielonienasyconych. Ocena pierwiastków śladowych i metali potencjalnie toksycznych potwierdziła bezpieczeństwo analizowanych produktów. Uzyskane wyniki wskazują, że fermentowane napoje na bazie ekologicznej serwatki, wzbogacane sokiem z dzikiej róży lub rokitnika zwyczajnego, mogą być traktowane jako innowacyjne produkty funkcjonalne, łączące wysoką wartość odżywczą, istotny potencjał przeciwutleniający oraz założenia zrównoważonego wykorzystania surowców mleczarskich.

### ***6.3. Badania dotyczące wpływu serwatki i składników roślinnych na właściwości technologiczne, teksturalne, reologiczne i mikrobiologiczne fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych standardu „human grade” (publikacja III)***

Fermentowane wyroby mięsne należą do grupy produktów, których jakość kształtują złożone przemiany fizykochemiczne, mikrobiologiczne i enzymatyczne zachodzące w trakcie dojrzewania, suszenia oraz przechowywania. W tego typu produktach kluczowe znaczenie mają aktywność wody, organizacja matrycy białkowo-tłuszczowej, tekstura, barwa, stabilność mikrobiologiczna oraz bezpieczeństwo zdrowotne gotowego wyrobu. W ostatnich latach coraz większy nacisk kładzie się na możliwość projektowania fermentowanych produktów mięsnych o podwyższonej wartości funkcjonalnej, wzbogacanych naturalnymi składnikami pochodzenia roślinnego lub grzybowego (Munekata i in., 2022; Carneiro i in., 2024).

W odpowiedzi na oczekiwania współczesnych konsumentów zwiększa się zainteresowanie produktami o uproszczonym składzie, z ograniczoną liczbą dodatków syntetycznych oraz wyższą wartością żywieniową. W tym kontekście szczególnie atrakcyjne są surowo dojrzewające przekąski mięsne standardu „human grade”, wytwarzane z surowców przeznaczonych do spożycia przez ludzi i produkowane z zachowaniem wymogów higienicznych typowych dla żywności. Tego typu wyroby mogą stanowić alternatywę dla klasycznych, wysoko przetworzonych przekąsek, łącząc wysoką zawartość białka, wyrazisty profil smakowy oraz możliwość wzbogacenia w składniki o działaniu funkcjonalnym.

W technologii fermentowanych produktów mięsnych istotną rolę może odgrywać również serwatka. Serwatka kwaśna, jako produkt uboczny przemysłu mleczarskiego, zawiera

laktozę, białka serwatkowe, składniki mineralne oraz naturalną mikroflorę kwasu mlekowego. Jej włączenie do matrycy mięsnej może wspomagać przebieg fermentacji, wpływać na obniżenie pH, aktywność mikroorganizmów oraz kształtowanie tekstury i właściwości reologicznych wyrobu. Takie rozwiązanie łączy racjonalne zagospodarowanie surowca ubocznego z tworzeniem żywności o cechach funkcjonalnych i dobrze wpisuje się w koncepcję zrównoważonego przetwórstwa.

Rozmaryn stanowi znane źródło związków fenolowych, w tym kwasu karnozowego, karnozolu oraz kwasu rozmarynowego, które w literaturze opisywane są przede wszystkim w kontekście ograniczania utleniania lipidów i poprawy stabilności oksydacyjnej produktów mięsnych (Ribeiro i in., 2019; Sojić i in., 2021; Bellucci i in., 2022). Dzika róża i rokitnik zwyczajny dostarczają polifenoli, karotenoidów, kwasów organicznych, witamin oraz frakcji błonnikowych, dzięki czemu mogą wpływać na właściwości jakościowe produktów mięsnych, w tym barwę, stabilność oksydacyjną oraz potencjał funkcjonalny (Vossen i in., 2012; Kozhakhieva i in., 2018). Soplówka jeżowata, jako surowiec grzybowy, zawiera polisacharydy,  $\beta$ -glukany oraz inne związki bioaktywne, które mogą modyfikować właściwości technologiczne matryc mięsnych, zwłaszcza w zakresie wiązania wody i kształtowania struktury (Das i in., 2021). Olej CBD w niniejszej pracy należy zatem interpretować przede wszystkim jako dodatek lipidowy, mogący wpływać na właściwości teksturalne poprzez częściowe uplastycznienie matrycy białkowo-tłuszczowej, przy czym jego potencjalne działanie biologiczne nie było przedmiotem oceny. W **publikacji III pt. „Effects of Whey and Plant-Based Additives on Technological and Microbiological Characterization of Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks of Human Grade Standard”** wytworzono i oceniono fermentowane surowo dojrzewające przekąski wieprzowe standardu „human grade”, otrzymane z mięsa wieprzowego klasy II, soli spożywczej oraz świeżej, niepasteryzowanej kwaśnej serwatki krowiej. W wariantach funkcjonalnych zastosowano dodatki takie jak: soplówka jeżowata, olej rozmarynowy, dzika róża, rokitnik zwyczajny oraz olej CBD, natomiast próba kontrolna nie zawierała dodatku funkcjonalnego. Proces dojrzewania prowadzono dwuetapowo: najpierw przez 7 dni w temperaturze 18°C i wilgotności względnej 85%, a następnie, po zapakowaniu próżniowym, przez kolejne 7 dni w warunkach chłodniczych.

Zakres badań obejmował oznaczenia właściwości lepkością, analizę profilu tekstury, ocenę barwy, aktywności wody, składu podstawowego, gęstości oraz jakości mikrobiologicznej. Tak zaprojektowany eksperyment umożliwił określenie wpływu serwatki

oraz wybranych składników funkcjonalnych na strukturę, stabilność i bezpieczeństwo fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych.

**Tabela 13. Właściwości lepkością fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wzbogaconych składnikami funkcjonalnymi.**

Wariant produktu	Składnik funkcjonalny	Moduł zachowawczy G' [Pa]	Moduł stratności G'' [Pa]
Próba kontrolna	brak dodatku funkcjonalnego	3341 ± 211 <sup>a</sup>	531 ± 34 <sup>a</sup>
Przekąska z soplówką jeżowatą	<i>Hericium erinaceus</i>	7562 ± 347 <sup>c</sup>	1221 ± 59 <sup>c</sup>
Przekąska z olejem CBD	olej CBD	6114 ± 310 <sup>b</sup>	1013 ± 51 <sup>b</sup>
Przekąska z olejem rozmarynowym	<i>Rosmarinus officinalis</i>	7895 ± 329 <sup>c</sup>	1294 ± 66 <sup>c</sup>
Przekąska z rokitnikiem	<i>Hippophae rhamnoides</i>	7455 ± 292 <sup>c</sup>	1186 ± 47 <sup>c</sup>
Przekąska z dziką różą	<i>Rosa canina</i>	6274 ± 298 <sup>b</sup>	1065 ± 44 <sup>b</sup>

**Objaśnienia:** Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe. Różne litery w tej samej kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ . Warianty oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie statystycznie.

W pierwszym etapie analizowano właściwości lepkością, wyrażone poprzez moduł zachowawczy G' oraz moduł stratności G''. We wszystkich wariantach wartości G' przewyższały wartości G'', co wskazuje na dominację cech sprężystych nad lepkiemi i potwierdza obecność zwartej, żelopodobnej struktury charakterystycznej dla stabilnych wyrobów dojrzewających. Próba kontrolna wykazywała najniższe wartości obu modułów, podczas gdy warianty wzbogacone składnikami funkcjonalnymi cechowały się wyraźnie wzmocnioną strukturą.

Najwyższe wartości modułu G' odnotowano w wariantach z olejem rozmarynowym, soplówką jeżowatą oraz rokitnikiem zwyczajnym. Może to świadczyć o silniejszym usieciowaniu matrycy białkowej i większej sztywności struktury. W przypadku rozmarynu efekt ten można powiązać z obecnością związków fenolowych zdolnych do oddziaływania z białkami mięśniowymi. Soplówka jeżowata mogła zwiększać zwartość układu dzięki polisacharydom i β-glukanom, które uczestniczą w wiązaniu wody oraz wzmocnianiu

struktury białkowej. Wariant z rokitnikiem również charakteryzował się wysokimi wartościami  $G'$  i  $G''$ , co można wiązać z obecnością polifenoli, kwasów organicznych i składników błonnikowych wpływających na strukturę produktu.

Uzyskane wyniki właściwości lepkosprężystych mogą być interpretowane w kontekście oddziaływań składników funkcjonalnych z matrycą białkowo-tłuszczową produktu, jednak z zachowaniem ostrożności, ponieważ w niniejszym badaniu nie prowadzono bezpośredniej identyfikacji interakcji białko-polifenol ani analiz mikrostrukturalnych. W przypadku wariantu z olejem rozmarynowym wzrost wartości modułu zachowawczego ( $G'$ ) i strat ( $G''$ ) można wiązać z obecnością związków fenolowych, które w literaturze opisywane są przede wszystkim jako czynniki ograniczające utlenianie lipidów i białek w produktach mięsnych (Ribeiro i in., 2019; Sojić i in., 2021; Bellucci i in., 2022). Jednocześnie związki te mogą oddziaływać z białkami mięśniowymi, wpływając na stabilność oraz organizację przestrzenną matrycy białkowej. Znaczenie interakcji białko-polifenol w układach białkowych i mięsnych podkreślają m.in. Guo i in. (2024) oraz Yang i in. (2023), jednak w niniejszej pracy mechanizm ten należy traktować jako hipotezę interpretacyjną, a nie bezpośrednio potwierdzony efekt.

Podwyższone wartości  $G'$  i  $G''$  w wariancie z dodatkiem soplówki jeżowatej można ostrożnie wiązać z obecnością polisacharydów,  $\beta$ -glukanów oraz frakcji błonnikowych, które mogą zwiększać zdolność wiązania wody oraz przyczyniać się do wzmocnienia struktury matrycy mięsnej. Jak wskazują Das i in. (2021), grzyby jadalne stanowią wartościowe składniki funkcjonalne w produktach mięsnych ze względu na zawartość błonnika, polisacharydów, białek i związków bioaktywnych. Podobne mechanizmy oddziaływania dodatków polisacharydowych i błonnikowych na właściwości reologiczne żeli białkowych opisano również w odniesieniu do układów białek miofibrylarnych oraz matryc białkowo-polisacharydowych (Zhang i in., 2023; Jiang i in., 2024; Zou i in., 2024).

Wariant z rokitnikiem zwyczajnym również charakteryzował się wysokimi wartościami  $G'$  i  $G''$ , co można wiązać z obecnością błonnika, kwasów organicznych, polifenoli, karotenoidów oraz innych składników bioaktywnych pochodzenia roślinnego. Kozhakhieva i in. (2018) wykazali możliwość poprawy jakości oraz stabilności oksydacyjnej produktów mięsnych z dodatkiem proszku z owoców rokitnika, natomiast Jaśniewska i Diowks (2021) oraz Wang i in. (2022) wskazują na szerokie spektrum związków bioaktywnych obecnych w tym surowcu. Należy jednak podkreślić, że doniesienia te nie stanowią bezpośredniego dowodu na wzrost parametrów lepkosprężystych w analizowanym produkcie; obserwowany wzrost  $G'$  i  $G''$  stanowi wynik badań własnych.

W przypadku wariantu z olejem CBD wzrost modułów lepkosprężystych należy interpretować przede wszystkim w aspekcie technologicznym, jako efekt obecności frakcji lipidowej wpływającej na organizację matrycy białkowo-tłuszczowej, a nie jako dowód specyficznego działania biologicznego kannabidiolu. Z kolei dodatek dzikiej róży mógł oddziaływać poprzez obecność pektyn, błonnika oraz związków fenolowych, sprzyjając kształtowaniu struktury bardziej elastycznej, przy jednoczesnym zachowaniu jej stabilności. Vossen i in. (2012) potwierdzają możliwość wykorzystania dzikiej róży w produktach wieprzowych, głównie w kontekście poprawy stabilności oksydacyjnej, natomiast wpływ na wartości  $G'G'$  i  $G''G''$  w analizowanej matrycy stanowi wynik niniejszych badań.

**Tabela 14. Wyniki analizy profilu tekstury fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wzbogacanych składnikami funkcjonalnymi.**

Wariant produktu	Składnik funkcjonalny	Twardość [N]	Żujność [N·s]	Sprężystość [%]	Spójność	Adhezyjność [N·s]
Próba kontrolna	brak dodatku funkcjonalnego	205,0 ± 20,0 <sup>c</sup>	526 ± 93 <sup>b</sup>	19,5 ± 1,0 <sup>a</sup>	0,157 ± 0,004 <sup>a</sup>	0,11 ± 0,02 <sup>a</sup>
Przekąska z soplówką jeżowatą	<i>Hericium erinaceus</i>	nd	nd	nd	nd	nd
Przekąska z olejem CBD	olej CBD	132,3 ± 10,9 <sup>a</sup>	428 ± 74 <sup>a</sup>	22,1 ± 1,2 <sup>b</sup>	0,165 ± 0,003 <sup>b</sup>	0,09 ± 0,01 <sup>a</sup>
Przekąska z olejem rozmarynowym	<i>Rosmarinus officinalis</i>	nd	nd	nd	nd	nd
Przekąska z rokitnikiem	<i>Hippophae rhamnoides</i>	nd	nd	nd	nd	nd
Przekąska z dziką	<i>Rosa canina</i>	171,8 ± 13,5 <sup>b</sup>	472 ± 81 <sup>ab</sup>	20,8 ± 1,1 <sup>b</sup>	0,163 ± 0,003 <sup>b</sup>	0,10 ± 0,02 <sup>a</sup>

Wariant	Składnik	Twardość	Żujność	Sprężystość	Spójność	Adhezyjność
produktu	funkcjonalny	[N]	[N·s]	[%]		[N·s]
różą						

**Objaśnienia:** nd — nie oznaczono ze względu na przekroczenie zakresu pomiarowego aparatu w przyjętej konfiguracji testu (>325 N). Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe. Różne litery w tej samej kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$  dla wariantów mieszczących się w zakresie pomiarowym. Warianty oznaczone jako nd wyłączono z porównań statystycznych w zakresie twardości i parametrów pochodnych.

Analiza profilu tekstury wykazała, że zastosowane składniki funkcjonalne istotnie modyfikowały właściwości mechaniczne wyrobów. Warianty z soplówką jeżowatą, olejem rozmarynowym oraz rokitnikiem przekroczyły zakres pomiarowy aparatu w przyjętej konfiguracji, co świadczy o bardzo wysokiej twardości i zwartej strukturze tych próbek. Z tego powodu wartości twardości i parametrów pochodnych dla tych wariantów nie zostały wykorzystane w bezpośrednich porównaniach statystycznych. Analiza profilu tekstury wykazała, że zastosowanie składników funkcjonalnych istotnie modulowało właściwości mechaniczne fermentowanych, surowo dojrzewających przekąsek mięsnych. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że warianty zawierające soplówkę jeżowatą, olej rozmarynowy oraz rokitnik zwyczajny przekroczyły zakres pomiarowy aparatu w przyjętej konfiguracji testu (>325 N). Oznacza to, że próbki te charakteryzowały się bardzo wysoką odpornością na kompresję, jednak ich wartości nie powinny być bezpośrednio zestawiane z wynikami mieszczącymi się w zakresie pomiarowym. W konsekwencji parametry twardości oraz wielkości pochodne dla tych wariantów zostały wyłączone z analiz statystycznych.

Przekroczenie zakresu pomiarowego w próbach z dodatkiem soplówki, rozmarynu i rokitnika może sugerować powstanie wysoce zwartej i mechanicznie odpornej matrycy białkowo-tłuszczowej. Interpretacja ta pozostaje spójna z wynikami analizy właściwości lepkosprężystych, gdyż te same warianty osiągały najwyższe wartości modułów zachowawczego ( $G'$ ) i stratności ( $G''$ ). Należy jednak podkreślić, że nie można wskazać jednego dominującego mechanizmu odpowiedzialnego za obserwowane zmiany, ponieważ na właściwości mechaniczne mogły równocześnie oddziaływać takie czynniki jak stopień odwodnienia, aktywność wody, zawartość błonnika, obecność polisacharydów, związki fenolowe, dystrybucja tłuszczu oraz zagęszczenie struktury w trakcie dojrzewania.

Dane literaturowe wskazują, że związki fenolowe mogą wchodzić w interakcje z białkami mięśniowymi zarówno poprzez wiązania kowalencyjne, jak i niekowalencyjne,

obejmujące m.in. oddziaływania z grupami aminowymi i tiolowymi. Oddziaływania te mogą wpływać na stabilność, konformację oraz właściwości mechaniczne matrycy białkowej (Yang i in., 2023; Guo i in., 2024). Zjawiska te mają szczególne znaczenie w produktach mięsnych wzbogacanych surowcami roślinnymi bogatymi w polifenole, takimi jak rozmaryn, rokitnik czy dzika róża. W przypadku wariantu z olejem rozmarynowym bardzo wysoką odporność mechaniczną można ostrożnie wiązać z obecnością związków fenolowych, w tym kwasu karnozowego, karnozolu oraz kwasu rozmarynowego, które wykazują zdolność ograniczania procesów oksydacyjnych lipidów i białek oraz wspierania stabilności produktów mięsnych (Ribeiro i in., 2019; Sojić i in., 2021; Bellucci i in., 2022).

Również wariant z soplówką jeżowatą przekroczył zakres pomiarowy, co może wskazywać na istotne wzmocnienie struktury produktu. Efekt ten można wiązać z obecnością polisacharydów,  $\beta$ -glukanów, błonnika oraz frakcji białkowo-polisacharydowych charakterystycznych dla grzybów jadalnych. Jak wskazują Das i in. (2021), grzyby stanowią wartościowe dodatki funkcjonalne do produktów mięsnych ze względu na zawartość błonnika, polisacharydów, białek oraz związków bioaktywnych. Składniki te mogą wpływać na zdolność wiązania wody, wypełnianie przestrzeni w matrycy białkowej oraz jej wzmocnienie. Podobne mechanizmy oddziaływania frakcji polisacharydowych i błonnikowych na właściwości żeli białkowych opisano również w układach modelowych białek miofibrylarnych oraz matryc białkowo-polisacharydowych (Zhang i in., 2023; Jiang i in., 2024; Zou i in., 2024).

Wysoka odporność mechaniczna wariantu z rokitnikiem zwyczajnym może być związana z obecnością błonnika, kwasów organicznych, polifenoli, karotenoidów oraz innych składników bioaktywnych. Rokitnik jest opisywany jako surowiec o wysokim potencjale funkcjonalnym, zdolny do poprawy stabilności oksydacyjnej i jakości produktów mięsnych (Kozhakhieva i in., 2018; Jaśniewska i Diowks, 2021; Wang i in., 2022). Należy jednak zaznaczyć, że w badaniach własnych nie identyfikowano bezpośrednio mechanizmów odpowiedzialnych za formowanie struktury, dlatego obserwowane przekroczenie zakresu pomiarowego należy interpretować jako efekt instrumentalny, a nie dowód konkretnych interakcji chemicznych.

Spośród wariantów mieszczących się w zakresie pomiarowym najniższą twardość odnotowano dla próbki z dodatkiem oleju CBD, która jednocześnie charakteryzowała się najwyższą sprężystością oraz większą spójnością w porównaniu z próbą kontrolną. Może to wskazywać na uplastycznienie matrycy białkowo-tłuszczowej przez frakcję lipidową dodatku. Oleje roślinne, szczególnie bogate w nienasycone kwasy tłuszczowe, mogą

modyfikować właściwości teksturalne produktów mięsnych poprzez wpływ na oddziaływania hydrofobowe, rozmieszczenie fazy tłuszczowej oraz zwiększenie mobilności składników matrycy białkowej. W tym ujęciu dodatek CBD należy interpretować przede wszystkim jako czynnik technologiczny wpływający na zmiękczenie i sprężystość produktu, a nie jako składnik o potwierdzonym działaniu biologicznym w analizowanej matrycy (Charles i in., 2025).

Wariant z dodatkiem dzikiej róży wykazywał pośrednią twardość — niższą niż próba kontrolna, lecz wyższą niż w przypadku dodatku oleju CBD — przy jednoczesnym wzroście sprężystości i spójności względem kontroli. Efekt ten można wiązać z obecnością pektyn, błonnika oraz związków fenolowych, które wpływają na organizację matrycy białkowo-tłuszczowej. Pektyny, jako rozpuszczalne frakcje błonnika, wykazują właściwości żelujące, stabilizujące i emulgujące, sprzyjając utrzymaniu ciągłości struktury oraz poprawie spójności układów żywnościowych. Analogiczne oddziaływania przypisuje się innym frakcjom błonnikowym i polisacharydowym, które uczestniczą w wiązaniu wody oraz stabilizacji sieci białkowej w produktach mięsnych (Salehi, 2021; Das i in., 2021; Zhang i in., 2023).

Należy również uwzględnić parametr żujności, który jest funkcją twardości oraz innych składowych profilu tekstury. W badaniach własnych najwyższą wartość żujności spośród wariantów mieszczących się w zakresie pomiarowym odnotowano w próbie kontrolnej, podczas gdy warianty z dodatkiem oleju CBD oraz dzikiej róży charakteryzowały się jej niższymi wartościami. W związku z tym nie jest zasadne wnioskowanie o wzroście żujności pod wpływem dodatku dzikiej róży. Bardziej adekwatna interpretacja wskazuje, że dodatek ten przyczyniał się do zwiększenia sprężystości i spójności przy jednoczesnym zmniejszeniu twardości względem próby kontrolnej, co może świadczyć o ukształtowaniu bardziej elastycznej struktury produktu. Wariant z olejem CBD, pomimo najniższej twardości, wykazywał najwyższą sprężystość, co potwierdza jego odmienny, uplastyczniający wpływ na matrycę białkowo-tłuszczową.

Uzyskane wyniki analizy TPA wskazują, że zastosowane dodatki funkcjonalne umożliwiały ukierunkowane kształtowanie właściwości mechanicznych fermentowanych, surowo dojrzewających przekąsek mięsnych. Dodatki takie jak soplówka jeżowata, olej rozmarynowy oraz rokitnik zwyczajny prowadziły do powstawania struktur o bardzo wysokiej twardości, przekraczających zakres pomiarowy aparatu, natomiast zastosowanie oleju CBD skutkowało wyraźnym obniżeniem twardości oraz zwiększeniem sprężystości produktu. Wariant z dodatkiem dzikiej róży reprezentował charakter pośredni, łącząc niższą twardość względem kontroli z podwyższoną sprężystością i spójnością. Interpretując

powyższe wyniki, należy jednak uwzględnić ograniczenia metody TPA, w tym efekt cenzurowania danych, oraz fakt, że postulowane mechanizmy oddziaływania dodatków funkcjonalnych z matrycą białkową mają charakter hipotetyczny i wymagają dalszego potwierdzenia eksperymentalnego.

**Tabela 15. Parametry barwy wewnętrznej i zewnętrznej części fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wzbogacanych składnikami funkcjonalnymi.**

Wariant produktu	Składnik funkcjonalny	L*		b*		L*	
		wewn.	a* wewn.	wewn.	zewn.	a* zewn.	b* zewn.
Próba kontrolna	brak dodatku funkcjonalnego	46,82 ± 4,31 <sup>b</sup>	4,52 ± 2,51	9,03 ± 2,35 <sup>b</sup>	34,10 ± 3,05 <sup>a</sup>	3,98 ± 1,10	6,80 ± 1,90 <sup>b</sup>
	Przekąska z soplówką jeżowatą	<i>Hericium erinaceus</i>	38,13 ± 7,23 <sup>a</sup>	4,68 ± 1,31	10,67 ± 1,95 <sup>b</sup>	29,50 ± 0,98 <sup>a</sup>	3,51 ± 0,63
Przekąska z olejem CBD	olej CBD	34,37 ± 2,51 <sup>a</sup>	3,81 ± 0,98	3,33 ± 0,99 <sup>a</sup>	33,89 ± 4,22 <sup>a</sup>	3,26 ± 0,66	5,15 ± 1,51 <sup>a</sup>
Przekąska z olejem rozmarynowym	<i>Rosmarinus officinalis</i>	37,04 ± 5,29 <sup>a</sup>	4,69 ± 1,51	4,20 ± 1,69 <sup>a</sup>	31,45 ± 1,94 <sup>a</sup>	2,54 ± 1,34	3,16 ± 1,37 <sup>a</sup>
Przekąska z rokitnikiem	<i>Hippophae rhamnoides</i>	32,50 ± 3,98 <sup>a</sup>	3,66 ± 1,12	5,05 ± 0,86 <sup>a</sup>	30,79 ± 1,01 <sup>a</sup>	3,56 ± 0,67	4,44 ± 0,99 <sup>a</sup>
Przekąska z dziką różą	<i>Rosa canina</i>	36,42 ± 2,09 <sup>a</sup>	6,55 ± 2,42	16,67 ± 5,46 <sup>c</sup>	35,14 ± 2,69 <sup>a</sup>	5,26 ± 1,24	10,06 ± 2,92 <sup>b</sup>

**Objaśnienia:** L\* — jasność barwy; a\* — udział składowej czerwono-zielonej; b\* — udział składowej żółto-niebieskiej; wewn. – barwa wewnątrz produktu; zewn. – barwa na zewnątrz produktu (powierzchnia) Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe. Różne litery w tej samej kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ . Brak liter w kolumnie oznacza brak istotnych różnic statystycznych.

Barwa jest jednym z głównych atrybutów jakości produktów mięsnych, silnie wpływającym na ich akceptację przez konsumentów. W badanych przekąskach określono wartości parametrów L\*, a\* i b\* zarówno w części wewnętrznej, jak i zewnętrznej. Próba kontrolna charakteryzowała się najwyższą jasnością wewnętrzną, natomiast wszystkie warianty z dodatkami funkcjonalnymi wykazywały obniżone wartości L\*, co wskazuje na przyciemnienie struktury wewnętrznej pod wpływem dodatków roślinnych i grzybowych.

Najbardziej wyraźne zmiany w zakresie parametru b\*, odpowiedzialnego za komponent żółto-pomarańczowy, zaobserwowano w wariancie z dziką różą. Jest to zgodne z obecnością naturalnych barwników, w tym karotenoidów i innych związków charakterystycznych dla owoców dzikiej róży. Warianty z olejem CBD, olejem rozmarynowym oraz rokitnikiem wykazywały niższe wartości b\*, co odzwierciedla odmienny wpływ tych dodatków na percepcję barwy. Zaobserwowane różnice mogły wynikać zarówno z własnej barwy surowców, jak i z ich interakcji z białkami, tłuszczem oraz pigmentami mięśniowymi w trakcie fermentacji i dojrzewania.

W interpretacji parametrów barwy konieczne jest rozróżnienie pomiędzy bezpośrednim wpływem barwy własnej dodatków a ich potencjalnym oddziaływaniem na procesy oksydacyjne oraz organizację matrycy produktu. Najwyższe wartości parametru b\* w wariancie z dodatkiem dzikiej róży można wiązać z obecnością naturalnych barwników owocowych, w szczególności karotenoidów oraz innych związków nadających odcień żółto-pomarańczowy. Doniesienia literaturowe potwierdzają wysoką zawartość związków bioaktywnych w dzikiej róży oraz możliwość jej zastosowania jako składnika funkcjonalnego w produktach wieprzowych, jednak zmiany parametrów L\*, a\* i b\* obserwowane w niniejszym badaniu stanowią wyniki własne i nie powinny być bezpośrednio ekstrapolowane (Vossen i in., 2012; Negrean i in., 2024).

Wariant z dodatkiem rokitnika zwyczajnego, pomimo obecności karotenoidów charakterystycznych dla tego surowca, nie wykazywał równie wysokich wartości parametru b\* jak wariant z dziką różą. Zjawisko to może wynikać z różnic w formie

zastosowanego dodatku, jego dyspersji w matrycy białkowo-tłuszczowej, interakcji ze składnikami produktu oraz przemian zachodzących w trakcie dojrzewania. Jaśniewska i Diowksza (2021) oraz Wang i in. (2022) wskazują, że rokitnik stanowi bogate źródło karotenoidów, tokoferoli, witaminy C oraz związków fenolowych, jednak jego wpływ na parametry barwy jest zależny od właściwości matrycy, poziomu dodatku oraz warunków technologicznych. Brak wyraźnych różnic w parametrze  $a^*$  sugeruje natomiast, że zastosowane dodatki funkcjonalne w większym stopniu oddziaływały na jasność oraz składową żółto-niebieską barwy niż na komponent czerwony.

**Tabela 16. Aktywność wody fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wzbogacanych składnikami funkcjonalnymi.**

Wariant produktu	Składnik funkcjonalny	Aktywność wody $a_w$
Próba kontrolna	brak dodatku funkcjonalnego	$0,679 \pm 0,000^a$
Przekąska z soplówką jeżowatą	<i>Hericium erinaceus</i>	$0,805 \pm 0,002^b$
Przekąska z olejem CBD	olej CBD	$0,800 \pm 0,002^b$
Przekąska z olejem rozmarynowym	<i>Rosmarinus officinalis</i>	$0,789 \pm 0,005^b$
Przekąska z rokitnikiem	<i>Hippophae rhamnoides</i>	$0,826 \pm 0,007^c$
Przekąska z dziką różą	<i>Rosa canina</i>	$0,796 \pm 0,010^b$

**Objaśnienia:**  $a_w$  — aktywność wody. Wyniki przedstawiono jako średnia  $\pm$  odchylenie standardowe. Różne litery w kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ .

Aktywność wody ( $a_w$ ) stanowi jeden z kluczowych parametrów warunkujących trwałość i bezpieczeństwo produktów surowo dojrzewających. We wszystkich badanych wariantach wartości  $a_w$  były niższe niż 0,90, co jest korzystne z punktu widzenia ograniczania wzrostu wielu niepożądanych mikroorganizmów. Próba kontrolna cechowała się najniższą aktywnością wody, natomiast we wszystkich wariantach z dodatkami funkcjonalnymi wartości  $a_w$  były wyższe. Pomimo obserwowanego wzrostu aktywności wody względem próby kontrolnej, wszystkie analizowane warianty utrzymywały wartości poniżej poziomu 0,90 co sprzyja stabilności mikrobiologicznej produktów, jednak nie powinno być traktowane jako jedyne kryterium ich bezpieczeństwa. Bezpieczeństwo fermentowanych wyrobów mięsnych wynika bowiem z synergicznego działania wielu barier technologicznych,

obejmujących m.in. aktywność wody, wartość pH, zawartość soli, temperaturę dojrzewania, warunki pakowania oraz obecność konkurencyjnej mikroflory. McQuestin i in. (2009) wykazali, że przeżywalność *Escherichia coli* w fermentowanych produktach mięsnych jest determinowana łącznym wpływem temperatury, pH oraz aktywności wody, natomiast Taormina i Sofos (2014) podkreślają znaczenie koncepcji technologii płótkowej w produktach o obniżonej aktywności wody.

Podwyższone wartości  $a_w$  w wariantach zawierających rokitnik, soplówkę jeżowatą oraz dziką różę można wiązać z obecnością składników o zdolności do wiązania i retencji wody, takich jak błonnik, pektyny,  $\beta$ -glukany, polisacharydy oraz kwasy organiczne. Das i in. (2021) wskazują na istotną rolę grzybów jako źródła błonnika i polisacharydów, natomiast Salehi (2021) opisuje wpływ dodatków pochodzenia roślinnego na właściwości fizykochemiczne i teksturalne żywności. W przeprowadzonych badaniach najwyższa wartość aktywności wody w wariantcie z dodatkiem rokitnika była zgodna z najwyższą zawartością wilgoci w tym produkcie, co potwierdza zależność między tymi parametrami.

**Tabela 17. Skład podstawowy fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wzbogacanych składnikami funkcjonalnymi.**

Wariant produktu	Składnik funkcjonalny	Białko [%]	Tłuszcz [%]	Wilgotność [%]	Kolagen [%]
Próba kontrolna	brak dodatku funkcjonalnego	40,50 ± 0,21 <sup>d</sup>	19,50 ± 0,14 <sup>b</sup>	31,00 ± 0,17 <sup>ab</sup>	0,95 ± 0,01 <sup>a</sup>
Przekąska z soplówką jeżowatą	<i>Hericium erinaceus</i>	34,93 ± 0,10 <sup>b</sup>	15,48 ± 0,08 <sup>a</sup>	31,37 ± 0,13 <sup>bc</sup>	1,07 ± 0,01 <sup>b</sup>
Przekąska z olejem CBD	olej CBD	36,43 ± 0,11 <sup>c</sup>	24,87 ± 0,16 <sup>c</sup>	31,76 ± 0,14 <sup>c</sup>	1,07 ± 0,01 <sup>b</sup>
Przekąska z olejem rozmarynowym	<i>Rosmarinus officinalis</i>	46,72 ± 0,17 <sup>f</sup>	17,59 ± 0,11 <sup>b</sup>	30,45 ± 0,13 <sup>a</sup>	1,07 ± 0,01 <sup>b</sup>
Przekąska z rokitnikiem	<i>Hippophae rhamnoides</i>	24,14 ± 0,14 <sup>a</sup>	31,52 ± 0,17 <sup>d</sup>	35,96 ± 0,16 <sup>c</sup>	1,07 ± 0,01 <sup>b</sup>
Przekąska z dziką różą	<i>Rosa canina</i>	45,08 ± 0,20 <sup>e</sup>	15,79 ± 0,11 <sup>a</sup>	32,55 ± 0,14 <sup>d</sup>	1,07 ± 0,01 <sup>b</sup>

**Objaśnienia:** Wyniki przedstawiono jako średnia  $\pm$  odchylenie standardowe. Różne litery w tej samej kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ . Pozostała część składu do 100% obejmuje głównie popiół, węglowodany oraz błonnik pokarmowy. Wyniki należy traktować jako dane porównawcze uzyskane metodą szybkiej analizy instrumentalnej.

Analiza składu podstawowego wykazała, że dodatki funkcjonalne modyfikowały zawartość białka, tłuszczu, wody oraz kolagenu. Najwyższy udział białka stwierdzono w wariantach z olejem rozmarynowym oraz z dziką różą, natomiast najniższy – w wariacie z rokitnikiem. Niższa zawartość białka w tym wariacie była związana z wyższym udziałem tłuszczu i wilgoci, które zmniejszały procentowy udział frakcji białkowej w produkcie.

Najwyższą zawartość tłuszczu odnotowano w wariacie z rokitnikiem, co wynika z obecności frakcji lipidowej charakterystycznej dla tego surowca. Podwyższony poziom tłuszczu stwierdzono również w próbce z olejem CBD, co jest zgodne z charakterem zastosowanego dodatku. Wilgotność była najwyższa w wariacie z rokitnikiem, co korespondowało z najwyższą aktywnością wody. Zawartość kolagenu w większości wariantów z dodatkami funkcjonalnymi pozostawała na zbliżonym poziomie. Należy zaznaczyć, że analizy składu podstawowego wykonano metodą szybkiej analizy instrumentalnej, więc wyniki należy traktować jako dane porównawcze i przesiewowe.

Wariant z dodatkiem rokitnika zwyczajnego charakteryzował się najwyższą zawartością wilgoci oraz najwyższą aktywnością wody, co wskazuje na spójny kierunek zmian, prawdopodobnie związany ze zdolnością składników owocowych do retencji wody. Rokitnik stanowi surowiec bogaty w związki bioaktywne, frakcje błonnikowe oraz składniki lipidowe, które mogą wpływać na właściwości produktu końcowego (Jaśniewska i Diowks, 2021; Wang i in., 2022).

Wariant z dodatkiem oleju CBD wyróżniał się zwiększoną zawartością tłuszczu, co było zgodne z charakterem zastosowanego składnika i jednocześnie pozostawało w zgodzie z obserwowanym zmniejszeniem twardości oraz zwiększeniem sprężystości. W interpretacji wyników dla tego wariantu należy jednak ograniczyć się do aspektu technologicznego, traktując olej CBD jako źródło frakcji lipidowej wpływającej na strukturę produktu, bez odnoszenia się do potencjalnych efektów biologicznych lub zdrowotnych kannabidiolu.

**Tabela 18. Gęstość fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wzbogacanych składnikami funkcjonalnymi.**

Wariant produktu	Składnik funkcjonalny	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]
Próba kontrolna	brak dodatku funkcjonalnego	1,1950 ± 0,0091 <sup>a</sup>
Przekąska z soplówką jeżowatą	<i>Hericium erinaceus</i>	1,5216 ± 0,0424 <sup>c</sup>
Przekąska z olejem CBD	olej CBD	1,1732 ± 0,0068 <sup>a</sup>
Przekąska z olejem rozmarynowym	<i>Rosmarinus officinalis</i>	1,1624 ± 0,0118 <sup>a</sup>
Przekąska z rokitnikiem	<i>Hippophae rhamnoides</i>	1,2150 ± 0,0120 <sup>b</sup>
Przekąska z dziką różą	<i>Rosa canina</i>	1,2184 ± 0,0028 <sup>b</sup>

**Objaśnienia:** Wyniki przedstawiono jako średnia ± odchylenie standardowe. Różne litery w kolumnie oznaczają różnice istotne statystycznie przy  $p < 0,05$ .

Gęstość jest ważnym parametrem technologicznym, ponieważ odzwierciedla zwartość struktury, stopień upakowania matrycy oraz zdolność produktu do wiązania wody. Najwyższe wartości gęstości uzyskano w wariacie z soplówką jeżowatą, co sugeruje silne zagęszczenie struktury i znaczący wpływ polisacharydów grzybowych na matrycę mięsno-białkową. Warianty z dziką różą i rokitnikiem również wykazywały wyższą gęstość niż próba kontrolna, co można powiązać z obecnością błonnika, pektyn oraz kwasów organicznych.

Najniższą gęstość stwierdzono w wariantach z olejem CBD i olejem rozmarynowym. Może to świadczyć o częściowym rozluźnieniu struktury na skutek dodatku składników lipidowych, które wpływały na rozmieszczenie tłuszczu i białka w produkcie. Obserwacje te są spójne z wynikami analizy tekstury, ponieważ próbka z olejem CBD charakteryzowała się mniejszą twardością i większą sprężystością.

Wyniki oznaczeń gęstości stanowią istotne uzupełnienie interpretacji właściwości teksturalnych i reologicznych, jednak nie powinny być traktowane jako ich bezpośredni odpowiednik. Najwyższą gęstość odnotowano w wariacie z dodatkiem soplówki jeżowatej, co pozostaje zgodne z wysokimi wartościami modułów  $G'$  i  $G''$  oraz przekroczeniem zakresu pomiarowego w analizie TPA, wskazując na znaczne zagęszczenie matrycy. Zjawisko to można wiązać z obecnością polisacharydów,  $\beta$ -glukanów oraz frakcji błonnikowych charakterystycznych dla grzybów jadalnych (Das i in., 2021). Analogiczne znaczenie dodatków polisacharydowych w kształtowaniu właściwości układów białkowych wykazano

również w badaniach nad matrycami białkowo-polisacharydowymi (Zhang i in., 2023; Jiang i in., 2024; Zou i in., 2024).

Warianty zawierające dziką różę oraz rokitnik zwyczajny również charakteryzowały się wyższą gęstością w porównaniu z próbą kontrolną, jednak mechanizmy odpowiedzialne za te zmiany były odmienne. W przypadku dzikiej róży dominujący wpływ dotyczył modyfikacji barwy oraz umiarkowanych zmian właściwości teksturalnych, natomiast rokitnik wiązał się z najwyższą aktywnością wody oraz bardzo wysoką odpornością mechaniczną produktu. Najniższą gęstość stwierdzono w wariancie z dodatkiem oleju CBD, co pozostaje spójne z jego niższą twardością oraz wyższą sprężystością. Wariant z olejem rozmarynowym wymaga bardziej złożonej interpretacji, ponieważ pomimo relatywnie niskiej gęstości wykazywał wysokie wartości  $G'$  i  $G''$  oraz przekroczenie zakresu pomiarowego w analizie TPA. Wskazuje to, że gęstość nie zawsze koreluje bezpośrednio z twardością ani parametrami lepkosprężystymi, a zależności między tymi cechami mają charakter wieloczynnikowy.

**Tabela 19. Jakość mikrobiologiczna fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wzbogacanych składnikami funkcjonalnymi.**

Parametr	Próba kontrolna	Przekąska z soplówką jeżowatą	Przekąska z olejem CBD	Przekąska z olejem rozmarynowym	Przekąska z rokitnikiem	Przekąska z dziką różą
Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych mezofilnych [jtk/g]	$6,5 \times 10^6$ [ $3,5 \times 10^6$ – $1,2 \times 10^7$ ]	$3,8 \times 10^7$ [ $2,0 \times 10^7$ – $7,2 \times 10^7$ ]	$3,6 \times 10^7$ [ $1,9 \times 10^7$ – $6,9 \times 10^7$ ]	$8,9 \times 10^6$ [ $4,9 \times 10^6$ – $1,6 \times 10^7$ ]	$4,2 \times 10^7$ [ $2,2 \times 10^7$ – $8,0 \times 10^7$ ]	$1,6 \times 10^8$ [ $9,0 \times 10^7$ – $2,8 \times 10^8$ ]
Drożdże i pleśnie [jtk/g]	$3,7 \times 10^3$ [ $1,9 \times 10^3$ – $7,4 \times 10^3$ ]	$1,8 \times 10^3$ [ $9,7 \times 10^2$ – $3,4 \times 10^3$ ]	$2,2 \times 10^3$ [ $1,2 \times 10^3$ – $4,1 \times 10^3$ ]	$2,8 \times 10^3$ [ $1,4 \times 10^3$ – $5,7 \times 10^3$ ]	$9,9 \times 10^3$ [ $5,2 \times 10^3$ – $1,9 \times 10^4$ ]	$1,1 \times 10^4$ [ $5,8 \times 10^3$ – $2,1 \times 10^4$ ]
Enterobacteriaceae, 37°C [jtk/g]	$<4,0 \times 10^1$	$6,9 \times 10^2$ [ $3,6 \times 10^2$ – $1,3 \times 10^3$ ]	$2,6 \times 10^3$ [ $1,3 \times 10^3$ – $5,3 \times 10^3$ ]	$1,1 \times 10^2$ [ $4,7 \times 10^1$ – $2,6 \times 10^2$ ]	$1,5 \times 10^3$ [ $6,9 \times 10^2$ – $3,3 \times 10^3$ ]	$2,9 \times 10^3$ [ $1,5 \times 10^3$ – $5,8 \times 10^3$ ]
Przypuszczalne <i>Pseudomonas</i> spp. [jtk/g]	$<1,0 \times 10^1$	$2,9 \times 10^3$ [ $1,2 \times 10^3$ – $6,8 \times 10^3$ ]	$6,7 \times 10^3$ [ $2,9 \times 10^3$ – $1,5 \times 10^4$ ]	$9,7 \times 10^2$ [ $4,3 \times 10^2$ – $2,2 \times 10^3$ ]	$7,8 \times 10^3$ [ $3,4 \times 10^3$ – $1,8 \times 10^4$ ]	$6,6 \times 10^3$ [ $2,9 \times 10^3$ – $1,5 \times 10^4$ ]
$\beta$ -glukuronidazododatnie	$<1,0 \times 10^1$	$<4,0 \times 10^1$	$<4,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$

Parametr	Próba kontrolna	Przekąska z soplówką jeżowatą	Przekąska z olejem CBD	Przekąska z olejem rozmarynowym	Przekąska z rokitnikiem	Przekąska z dziką różą
<i>Escherichia coli</i>						
[jtk/g]						
Przypuszczalne						
<i>Bacillus cereus</i> , 30°C [jtk/g]	<1,0 × 10 <sup>1</sup>	<1,0 × 10 <sup>1</sup>	<1,0 × 10 <sup>1</sup>	<1,0 × 10 <sup>1</sup>	<1,0 × 10 <sup>1</sup>	<1,0 × 10 <sup>1</sup>
<i>Listeria monocytogenes</i> [w 25 g]						
	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto
<i>Salmonella spp.</i> [w 25 g]						
	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto

**Objaśnienia:** jtk — jednostki tworzące kolonie. Wyniki ilościowe przedstawiono jako jtk/g. Wartości w nawiasach kwadratowych oznaczają zakres niepewności/zakres raportowany w badaniu. Wartości „<” oznaczają wynik poniżej granicy oznaczalności zastosowanej metody. Analizy mikrobiologiczne wykonano po zakończeniu II etapu dojrzewania, tj. po 14 dniach procesu, dla próbek pakowanych próżniowo i przechowywanych w temperaturze ≤4°C.

Ocena mikrobiologiczna fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych wykazała, że wszystkie analizowane warianty spełniały wymagania bezpieczeństwa w zakresie braku *Salmonella spp.* oraz *Listeria monocytogenes* w 25 g produktu, mimo zastosowania świeżej, niepasteryzowanej kwaśnej serwatki krowiej jako składnika technologicznego i potencjalnego źródła naturalnej mikroflory fermentacyjnej. Brak detekcji tych patogenów wskazuje, że przy przyjętych warunkach dojrzewania, pakowania próżniowego i chłodniczego przechowywania możliwe było uzyskanie produktów bezpiecznych w odniesieniu do analizowanych kryteriów mikrobiologicznych, co jest zgodne z doniesieniami, iż bezpieczeństwo fermentowanych wyrobów mięsnych wynika z łącznego działania kilku czynników, w tym aktywności wody, zakwaszenia, dodatku soli, aktywności mikroflory fermentacyjnej oraz parametrów dojrzewania (Kumar i in., 2017).

Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych mezofilnych była zróżnicowana pomiędzy wariantami; najniższą wartość odnotowano w próbie kontrolnej, natomiast najwyższą w przekąsce z dodatkiem dzikiej róży. Podwyższona ogólna liczba drobnoustrojów w tego typu produktach nie musi świadczyć o pogorszeniu jakości, ponieważ znaczną część

mikrobioty mogą stanowić drobnoustroje związane z procesem fermentacji. W niniejszych badaniach nie prowadzono jednak identyfikacji bakterii fermentacji mlekowej, dlatego wartości ogólnej liczby drobnoustrojów należy interpretować opisowo, bez jednoznacznego przypisywania ich obecności korzystnej mikroflorze fermentacyjnej. Z literatury wynika, że kultury starterowe i mikroflora towarzysząca mogą odgrywać istotną rolę w kształtowaniu bezpieczeństwa, aromatu i stabilności fermentowanych produktów mięsnych, jednak ich funkcja powinna być potwierdzana ukierunkowanymi analizami mikrobiologicznymi (Laranjo i in., 2019; Leroy i in., 2006).

Najwyższą liczebność drożdży i pleśni stwierdzono w wariantach z dodatkiem dzikiej róży oraz rokitnika zwyczajnego, co może być związane z obecnością surowców roślinnych wprowadzających do matrycy mięsnej składniki odżywcze, błonnik, cukry, kwasy organiczne oraz własną mikroflorę. Nie można jednak jednoznacznie stwierdzić, czy wzrost tej grupy mikroorganizmów wynikał wyłącznie z dodatku roślinnego, czy był konsekwencją złożonych interakcji pomiędzy składnikiem funkcjonalnym, aktywnością wody i warunkami dojrzewania. Drożdże i pleśnie mogą pełnić zarówno funkcje pożądane, szczególnie w wyrobach dojrzewających, jak i niepożądane, jeżeli ich rozwój nie jest kontrolowany, dlatego interpretacja ich obecności powinna uwzględniać wyniki oceny sensorycznej, poziom aktywności wody, sposób pakowania oraz ewentualną szczegółową identyfikację mikrobiologiczną.

Bakterie z rodziny *Enterobacteriaceae* występowały w zróżnicowanych ilościach, przy czym najniższy poziom spośród wariantów z dodatkami funkcjonalnymi odnotowano w przekąsce z dodatkiem olejku rozmarynowego. Może to pozostawać w zgodzie z doniesieniami dotyczącymi przeciwdrobnoustrojowych właściwości olejków eterycznych, w tym rozmarynowego, opisywanych jako naturalne dodatki ograniczające rozwój wybranych mikroorganizmów w fermentowanych produktach mięsnych (Sojić i in., 2021). Na podstawie uzyskanych wyników nie można jednak przypisywać tego efektu wyłącznie obecności rozmarynu, gdyż badanie miało charakter porównawczy i nie obejmowało badań mechanistycznych ani tzw. challenge tests.

Wyniki dotyczące  $\beta$ -glukuronidazo-dodatnich *Escherichia coli* oraz przypuszczalnych *Bacillus cereus* były korzystne – we wszystkich próbkach wartości pozostawały poniżej lub blisko granicy oznaczalności zastosowanych metod. Również liczebność przypuszczalnych *Pseudomonas spp.* była niska lub umiarkowana, przy czym w próbie kontrolnej nie przekraczała granicy oznaczalności. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowana technologia, obejmująca etap dojrzewania, pakowanie próżniowe oraz chłodnicze przechowywanie,

sprzyjała ograniczeniu rozwoju wybranych mikroorganizmów wskaźnikowych i potencjalnie niepożądanych.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych kluczowe było powiązanie wyników mikrobiologicznych z oznaczoną aktywnością wody. Wszystkie warianty charakteryzowały się aktywnością wody poniżej 0,90, co wspiera stabilność mikrobiologiczną produktu, lecz nie może być traktowane jako jedyny czynnik gwarantujący bezpieczeństwo. W literaturze podkreśla się, że przeżywalność patogenów, takich jak *E. coli*, w fermentowanych produktach mięsnych zależy od łącznego oddziaływania temperatury, pH i aktywności wody (McQuestin i in., 2009), a koncepcja tzw. technologii płatkowej zakłada, że bezpieczeństwo produktów o niskiej aktywności wody jest wynikiem synergistycznego działania kilku barier, a nie pojedynczego parametru (Taormina i Sofos, 2014).

Przeprowadzone badania mikrobiologiczne potwierdziły, że fermentowane surowo dojrzewające przekąski mięsne z dodatkiem serwatki oraz wybranych składników roślinnych i grzybowych nie wykazywały obecności najważniejszych badanych patogenów, tj. *Salmonella spp.* i *Listeria monocytogenes*. Jednocześnie zróżnicowanie ogólnej liczby drobnoustrojów, drożdży i pleśni oraz *Enterobacteriaceae* wskazuje, że rodzaj dodatku funkcjonalnego może modyfikować profil mikrobiologiczny produktu. Zasadne wydaje się, aby dalsze badania obejmowały oznaczenie bakterii kwasu mlekowego, monitorowanie pH, aktywności wody i zawartości soli w fazie wodnej, ocenę zawartości amin biogennych oraz badania trwałości w zróżnicowanych warunkach przechowywania.

Podsumowując, przeprowadzone badania wykazały, że świeża kwaśna serwatka krowia może być z powodzeniem wykorzystana jako składnik technologiczny w produkcji fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych standardu „human grade”. Zastosowanie dodatków roślinnych i grzybowych pozwoliło na ukierunkowane kształtowanie właściwości reologicznych, teksturalnych, barwy, aktywności wody, gęstości oraz składu podstawowego produktów. Najsilniejsze usztywnienie struktury obserwowano w wariantach z olejem rozmarynowym, soplówką jeżowatą i rokitnikiem, natomiast dodatek oleju CBD wiązał się z efektem zmiękczenia.

Z perspektywy bezpieczeństwa szczególnie istotne było uzyskanie aktywności wody poniżej 0,90 we wszystkich wariantach oraz brak wykrycia *Salmonella spp.* i *Listeria monocytogenes* w 25 g produktu. Wyniki te potwierdzają, że wzbogacenie przekąsek mięsnych naturalnymi składnikami funkcjonalnymi, przy zachowaniu odpowiednio dobranych parametrów procesu, nie narusza podstawowych kryteriów bezpieczeństwa

mikrobiologicznego. Wyniki uzyskane w **Publikacji III** poszerzają tym samym zakres rozprawy doktorskiej poza matrycę fermentowanych napojów serwatkowych i dowodzą, że serwatka może być efektywnie wykorzystana również w bardziej złożonych układach żywnościowych, takich jak fermentowane produkty mięsne, potwierdzając jej szeroki potencjał jako surowca technologicznego i funkcjonalnego w projektowaniu prozdrowotnej, ekologicznej żywności o cechach funkcjonalnych.

## 7. Stwierdzenia i wnioski

1. Serwatka, będąca produktem ubocznym przemysłu mleczarskiego, może stanowić wartościowy surowiec technologiczny i funkcjonalny do otrzymywania prozdrowotnej żywności ekologicznej o cechach funkcjonalnych.
2. Zastosowanie ekologicznej serwatki koziej i krowiej, zarówno kwaśnej, jak i słodkiej, pozwoliło otrzymać fermentowane napoje serwatkowe o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych, reologicznych, lepkością i mikrobiologicznych, istotnie zależnych od rodzaju i pochodzenia serwatki.
3. Rodzaj zastosowanej serwatki oraz dodatek soków owocowych istotnie różnicowały właściwości reologiczne analizowanych napojów. Warianty wzbogacone sokiem z rokitnika zwyczajnego lub dzikiej róży wykazywały niższe wartości lepkości oraz parametrów lepkością w porównaniu z próbami kontrolnymi, co można uznać za korzystne z punktu widzenia napojów, sprzyjając uzyskaniu bardziej płynnej i akceptowalnej konsystencji. Dodatek ekologicznych soków z dzikiej róży i rokitnika zwyczajnego wyraźnie wpływał na pH i kwasowość miareczkową napojów, przy czym wszystkie warianty charakteryzowały się pH poniżej 4,6, co sprzyja stabilności i bezpieczeństwu mikrobiologicznemu produktów fermentowanych.
4. Fermentowane napoje serwatkowe otrzymane z wykorzystaniem ekologicznej serwatki spełniały badane kryteria bezpieczeństwa mikrobiologicznego; nie stwierdzono obecności *Salmonella* spp., a poziom mikroorganizmów wskaźnikowych nie wskazywał na zagrożenie bezpieczeństwa w zakresie przeprowadzonych analiz.
5. Rozszerzona ocena funkcjonalna fermentowanych napojów serwatkowych wykazała, że dodatek dzikiej róży szczególnie zwiększał całkowitą zawartość polifenoli oraz zdolność redukcyjną oznaczaną metodą FRAP, natomiast rokitnik zwyczajny wpływał na wybrane parametry aktywności przeciwutleniającej, zwłaszcza oznaczane metodą DPPH, co potwierdza odmienny mechanizm działania obu dodatków.
6. Profil kwasów tłuszczowych fermentowanych napojów serwatkowych był zdominowany przez nasycone kwasy tłuszczowe charakterystyczne dla matrycy mlecznej. Jednocześnie dodatek soków owocowych modyfikował udział kwasów jedno- i wielonienasyconych, w tym frakcji z rodziny omega-3 i omega-6, wskazując na ich potencjalny wpływ na wartość żywieniową badanych produktów. Fermentowane napoje serwatkowe zawierały istotne

żywnościowo składniki mineralne, zwłaszcza wapń, przy bardzo niskim poziomie arsenu, kadmu, ołowiu i rtęci, co potwierdza ich bezpieczeństwo jako funkcjonalnych produktów ekologicznych.

7. Świeża, niepasteryzowana kwaśna serwatka krowia może być skutecznie wykorzystana jako składnik technologiczny w produkcji fermentowanych surowo dojrzewających przekąskach mięsnych standardu „human grade”, rozumianego jako zastosowanie surowców przeznaczonych do spożycia przez ludzi oraz procesu prowadzonego zgodnie z wymaganiami higienicznymi właściwymi dla żywności.

8. Zastosowane składniki funkcjonalne istotnie różnicowały strukturę fermentowanych surowo dojrzewających przekąsek mięsnych. Olej rozmarynowy, soplówka jeżowata oraz rokitnik zwyczajny sprzyjały uzyskaniu bardziej zwartej i sztywnej matrycy białkowo-tłuszczowej, natomiast olej CBD zmniejszał twardość końcowego produktu. Zastosowane dodatki funkcjonalne modyfikowały barwę przekąsek mięsnych; wszystkie warianty wzbogacone charakteryzowały się niższą jasnością wewnętrzną niż próba kontrolna, a dodatek dzikiej róży szczególnie zwiększał udział składowej żółto-pomarańczowej b\*, co było związane z obecnością naturalnych barwników roślinnych.

9. Wszystkie surowo dojrzewające przekąski mięsne osiągnęły aktywność wody poniżej 0,90, co jest korzystne z punktu widzenia stabilności produktów suszonych i fermentowanych; wnioski dotyczące bezpieczeństwa należy jednak odnosić wyłącznie do zakresu przeprowadzonych analiz, tj. aktywności wody oraz objętych badaniem wskaźników mikrobiologicznych.

10. Ocena mikrobiologiczna przekąsek mięsnych wykazała brak obecności *Salmonella spp.* i *Listeria monocytogenes* w 25 g produktu we wszystkich wariantach, co potwierdza, że zastosowana technologia pozwoliła uzyskać wyroby spełniające badane kryteria bezpieczeństwa mikrobiologicznego.

11. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że serwatka stanowi wartościowy surowiec, który może być efektywnie wykorzystywany zarówno w technologii fermentowanych napojów mlecznych, jak i w bardziej złożonych układach żywnościowych, takich jak fermentowane produkty mięsne surowo dojrzewające. Synergiczne oddziaływanie serwatki, procesów fermentacyjnych oraz dodatku naturalnych składników pochodzenia roślinnego umożliwia wytwarzanie produktów o podwyższonej wartości technologicznej, żywnościowej

oraz funkcjonalnej. Uzyskane wyniki potwierdzają szeroki potencjał aplikacyjny serwatki jako surowca funkcjonalnego w projektowaniu żywności ekologicznej.

## 8. Bibliografia

1. Abd Rabo, F. H. R., Elshaghabee, F., Abdel-Maged, A. M., & Hassan, A. A. M. (2025). Development and evaluation of functional whey mango beverage enriched with novel probiotic bacteria isolated from Egyptian human and cow milks. *Food Science and Technology International*. <https://doi.org/10.1177/10820132251358987>
2. Abella, M., Leano, M., Malig, J., Martin, G., Cruz, C. D., & Leon, A. D. (2016). Formulation of a sports drink from fermented whey. *International Journal of Science and Technology*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.22137/ijst.2016.v1n1.01>
3. Adab, S. E., & Hassouna, M. (2016). Proteolysis, lipolysis and sensory characteristics of a Tunisian dry fermented poultry meat sausage with oregano and thyme essential oils. *Journal of Food Safety*, 36(1), 19–32. <https://doi.org/10.1111/jfs.12209>
4. Aksu, M. I., Erdemir, E., Oz, F., Turan, E., & Gürses, M. (2020). Effects of cemen paste with lyophilized red cabbage water extract on the quality characteristics of beef pastırma during processing and storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44, e14897. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14897>
5. Alkaisy, Q. H., Al-Saadi, J. S., Al-Rikabi, A. K. J., Altemimi, A. B., Hesarinejad, M. A., & Abedelmaksoud, T. G. (2023). Exploring the health benefits and functional properties of goat milk proteins. *Food Science & Nutrition*, 11, 5641–5656. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3531>
6. Aly, E., Darwish, A., & Tawfek, M. A. (2019). Quality characteristics of sweet whey-based fruits beverages fermented with *Lactobacillus plantarum*. *Egyptian Journal of Food Science*, 47, 141–154. <https://doi.org/10.21608/ejfs.2019.17601.1024>
7. Amaral, D. A. (2021). Whey in the industry: Environmental and valorization impacts. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. <https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/environmental-engineering-en/whey>
8. Amiot, M. J., Latgé, C., Plumey, L., & Raynal, S. (2021). Intake estimation of phytochemicals in a French well-balanced diet. *Nutrients*, 13(10), 3628. <https://doi.org/10.3390/nu13103628>

9. AOAC International. (2019). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (21st ed.). AOAC International.
10. Apak, R., Özyürek, M., Güçlü, K., & Çapanoğlu, E. (2016). Antioxidant activity/capacity measurement. 1. Classification, physicochemical principles, mechanisms, and electron transfer (ET)-based assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(5), 997–1027. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04739>
11. Aquilani, C., Sirtori, F., Flores, M., Bozzi, R., Lebet, B., & Pugliese, C. (2018). Effect of natural antioxidants from grape seed and chestnut in combination with hydroxytyrosol, as sodium nitrite substitutes in Cinta Senese dry-fermented sausages. *Meat Science*, 145, 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.019>
12. Argemí-Armengol, I., Bañón, S., Álvarez-Rodríguez, J., Teixeira, A., & Ripoll, G. (2026). Reduced nitrates/nitrites and natural additives in organic fermented dry-cured sausages. *Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70985>
13. Argan, B. E., Güneşer, O., Toklucu, A. K., & Yüceer, Y. K. (2015). Production of whey powder added fruit beverages and some quality characteristics. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, 3(8), 651–658. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v3i8.651-658.425>
14. Arshad, U.-e.-T., Hassan, A., Ahmad, T., Naeem, M., Chaudhary, M., Syed, Q., Randhawa, M., Pimentel, T. C., Cruz, A. G., & Aadil, R. M. (2023). A recent glance on the valorisation of cheese whey for industrial prerogative: High-value-added products development and integrated reutilising strategies. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(4), 2001–2013. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16168>
15. Bakhtiar, Z., Eghlima, G., Hatami, M., & Mirjalili, M. H. (2023). Quantification of fatty acids in seed oil and important phytochemical compounds and antioxidant activity of eleven Iranian rosehip (*Rosa canina* L.) ecotypes. *Scientific Reports*, 13, 22721. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50135-y>
16. Bal-Prylypko, L., Kanishchev, O., Mushtruk, M., & Leonova, B. (2024). Development of technology for extended-shelf-life meat products. *Animal Science and Food Technology*, 15(4), 132–143. <https://doi.org/10.31548/animal.4.2024.132>
17. Bandara, T. A., Munasinghe-Arachchige, S. P., & Gamlath, C. J. (2023). Fermented whey beverages: A review of process fundamentals, recent developments and nutritional potential. *International Journal of Dairy Technology*, 76(4), 737–757. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12993>

18. Barth, C. A., & Behnke, U. (1997). Nutritional physiology of whey and whey components. *Die Nahrung*, 41(1), 2–12. <https://doi.org/10.1002/food.19970410103>
19. Barukčić, I., Lisak Jakopović, K., & Božanić, R. (2019). Valorisation of whey and buttermilk for production of functional beverages—An overview of current possibilities. *Food Technology and Biotechnology*, 57(4), 448–460. <https://doi.org/10.17113/ftb.57.04.19.6460>
20. Behera, S. S., Ray, R. C., & Zdolec, N. (2018). *Lactobacillus plantarum* with functional properties: An approach to increase safety and shelf-life of fermented foods. *BioMed Research International*, 2018, 9361614. <https://doi.org/10.1155/2018/9361614>
21. Bellucci, E. R. B., Bis-Souza, C. V., Domínguez, R., Bermúdez, R., & Barretto, A. C. S. (2022). Addition of natural extracts with antioxidant function to preserve the quality of meat products. *Biomolecules*, 12(10), 1506. <https://doi.org/10.3390/biom12101506>
22. Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
23. Berechet, G., Moise, A.-E., & Enache, I. F. (2025). Application challenges of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) juices: Case study Romania. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*. <https://doi.org/10.59463/japt2025.2.14>
24. Bobková, A., Demianová, A., Belej, L., Harangozo, L., Bobko, M., Jurčaga, L., Poláková, K., Božiková, M., Bilčík, M., & Árvay, J. (2021). Detection of changes in total antioxidant capacity, the content of polyphenols, caffeine, and heavy metals of teas in relation to their origin and fermentation. *Foods*, 10(8), 1821. <https://doi.org/10.3390/foods10081821>
25. Boruah, B., & Ray, S. (2024). Current progress in the valorization of food industrial by-products for the development of functional food products. *Food Science and Applied Biotechnology*, 7(2). <https://doi.org/10.30721/fsab2024.v7.i2.349>
26. Bratu, M. M., Birghila, S., Popescu, A., Negreanu-Pirjol, B. S., & Negreanu-Pirjol, T. (2018). Correlation of antioxidant activity of dried berry infusions with the polyphenols and selected microelements contents. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 32(1), 1–12. <https://doi.org/10.4314/bcse.v32i1.1>
27. Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E., & Hebishy, E. (2023). Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives.

*International Journal of Dairy Technology*, 76(2), 291–312.  
<https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>

28. Carneiro, C., Ramos, C. L., & Schwan, R. F. (2024). Lactic acid bacteria in fermented meat products: Technological and functional properties. *Foods*, 13(19), 3170. <https://doi.org/10.3390/foods13193170>
29. Carneiro, K. O., Campos, G. Z., Lima, J. M. S., Rocha, R. S., Vaz-Velho, M., & Todorov, S. D. (2024). The role of lactic acid bacteria in meat products, not just as starter cultures. *Foods*, 13(19), 3170. <https://doi.org/10.3390/foods13193170>
30. Castro, W. F., Cruz, A. G., Bisinotto, M. S., Guerreiro, L. M. R., Faria, J. A. F., Bolini, H. M. A., Cunha, R. L., & Deliza, R. (2013). Development of probiotic dairy beverages: Rheological properties and application of mathematical models in sensory evaluation. *Journal of Dairy Science*, 96(1), 16–25. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5590>
31. Chagua-Rodríguez, P., Malpartida-Yapias, R. J., Torres-Gutiérrez, E. R., Quispe-Santivañez, G. W., Linares, G., & Rojas, M. L. (2023). Development of a functional beverage based on fermented whey, goldenberry (*Physalis peruviana* L.), and tumbo (*Passiflora mollissima*). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 76(3), 10505–10516. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n3.105693>
32. Chandrapala, J., Duke, M. C., Gray, S. R., Zisu, B., Weeks, M., Palmer, M., & Vasiljevic, T. (2015). Properties of acid whey as a function of pH and temperature. *Journal of Dairy Science*, 98(7), 4352–4363. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9435>
33. Charles, A. P. R., Chen, B., & Rao, J. (2024). Cannabidiol (CBD) as an emerging nutraceutical ingredient from industrial hemp: Regulation, production, extraction, nutraceutical properties, and functionality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(28), 6072–6094. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2436130>
34. Chaves, N., Santiago, A., & Alías, J. C. (2020). Quantification of the antioxidant activity of plant extracts: Analysis of sensitivity and hierarchization based on the method used. *Antioxidants*, 9(1), 76. <https://doi.org/10.3390/antiox9010076>
35. Chen, Y., Hu, Y., Xie, Y., Cui, M., Jiang, J., Li, Y., Guo, J., Xiang, M., Tian, Z., Niu, J., Cheng, W., & Gao, F. (2025). A comprehensive review of lactic acid bacteria-fermented plant-based beverages: Substrate types, nutritional quality, probiotic characteristics, metabolic pathways and future development trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2589965>

36. Cheong, K. W., Mirhosseini, H., Leong, W. F., Hamid, N. S. A., Osman, A., Basri, M., & Tan, C. P. (2015). Rheological properties of modified starch–whey protein isolate stabilized soursop beverage emulsion systems. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 1490–1503. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1490-3>
37. Çoklar, H., Akbulut, M., Aygun, A., & Akbulut, M. T. (2025). Valorization of dairy by-products, sweet whey, and acid whey, in the production of fermented black carrot juice: A comparative study of the phytochemical, physicochemical, microbiological, and sensorial aspects. *Foods*, 14(2), 218. <https://doi.org/10.3390/foods14020218>
38. Crujisen, H., Poitevin, E., & Brunelle, S. L. (2019). Determination of minerals and trace elements in milk, milk products, infant formula, and adult nutrition: Collaborative study 2011.14 method modification. *Journal of AOAC International*, 102(6), 1845–1863. <https://doi.org/10.1093/jaoac/102.6.1845>
39. Czarniecka-Skubina, E., Pielak, M., Neffe-Skocińska, K., Kajak-Siemaszko, K., Karp-Paździarska, S., Głuchowski, A., Moczowska-Wyrwicz, M., Rosiak, E., Rutkowska, J., Antoniewska-Krzeska, A., & Zielińska, D. (2025). Whey—A valuable technological resource for the production of new functional products with added health-promoting properties. *Foods*, 14(24), 4258. <https://doi.org/10.3390/foods14244258>
40. Darewicz, M., Dziuba, B., Minkiewicz, P., & Dziuba, J. (2011). The preventive potential of milk and colostrum proteins and protein fragments. *Food Reviews International*, 27(4), 357–388. <https://doi.org/10.1080/87559129.2011.563396>
41. Das, A. K., Nanda, P. K., Dandapat, P., Bandyopadhyay, S., Gullón, P., Sivaraman, G. K., McClements, D. J., Gullón, B., & Lorenzo, J. M. (2021). Edible mushrooms as functional ingredients for development of healthier and more sustainable muscle foods: A flexitarian approach. *Molecules*, 26(9), 2463. <https://doi.org/10.3390/molecules26092463>
42. Demir, N., Yildiz, O., Alpaslan, M., & Hayaloglu, A. A. (2014). Evaluation of volatiles, phenolic compounds and antioxidant activities of rose hip (*Rosa L.*) fruits in Turkey. *LWT – Food Science and Technology*, 57(1), 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.038>
43. Domínguez, R., Barba, F. J., Gómez, B., Putnik, P., Kovačević, D. B., Pateiro, M., Santos, E. M., & Lorenzo, J. M. (2019). A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*, 8(10), 429. <https://doi.org/10.3390/antiox8100429>

44. El-Aidie, S. A. M., & Khalifa, G. (2024). Innovative applications of whey protein for sustainable dairy industry: Environmental and technological perspectives—A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(2), e13319. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13319>
45. Faria-Oliveira, F., Diniz, R. H. S., Godoy-Santos, F., Mezdari, H., Castro, I., & Brandão, R. L. (2015). The role of yeast and lactic acid bacteria in the production of fermented beverages in South America. In *Food Production and Industry*. <https://doi.org/10.5772/60877>
46. Foegeding, E. A., & Davis, J. P. (2011). Food protein functionality: A comprehensive approach. *Food Hydrocolloids*, 25(8), 1853–1864. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.05.008>
47. Gök, V., Obuz, E., & Akkaya, L. (2011). The effects of some natural antioxidants on the color, chemical and microbiological properties of sucuk (Turkish dry-fermented sausage). *Journal of Food Quality*, 34(6), 376–382. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00517.x>
48. Gomes, J. J. L., Duarte, A. M., Batista, A. S. M., Figueiredo, R. M. F., Sousa, E. P., Souza, E. L., & Queiroga, R. C. R. E. (2013). Physicochemical and sensory properties of fermented dairy beverages made with goat's milk, cow's milk and a mixture of the two milks. *LWT – Food Science and Technology*, 54(1), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.04.022>
49. Gruszecki, R., Mysiak, B., & Walasek-Janusz, M. E. (2024). Effect of drying temperature on the bioactive compounds content of rose hips (*Rosa canina* L.). *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 23(3), 57–66. <https://doi.org/10.24326/asphc.2024.5348>
50. Guo, X., Wei, Y., Liu, P., Deng, X., Zhu, X., Wang, Z., & Zhang, J. (2024). Study of four polyphenol–*Coregonus peled* myofibrillar protein interactions on protein structure and gel properties. *Food Chemistry: X*, 21, 101063. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101063>
51. Hameed, A., Anwar, M. J., Perveen, S., Amir, M., Naeem, I., Imran, M., Hussain, M., Ahmad, I., Afzal, M., Inayat, S., & Awuchi, C. G. (2023). Functional, industrial and therapeutic applications of dairy waste materials. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1470–1496. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2213854>
52. Han, Z., Liu, S., Cao, J., Yue, X., & Shao, J. H. (2023). A review of oil and water retention in emulsified meat products: The mechanisms of gelation and emulsification,

- the application of multi-layer hydrogels. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(24), 8308–8324. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2199069>
53. Hossain, M. S., Wazed, M. A., Preya, M. S. A., Sultana, Z., Kamal, M. M., Ahmad, T., & Shimul, I. M. (2025). A comprehensive review of biotechnological innovations in valorization of food waste: Enhancing nutritional, techno-functional properties, and process optimization for sustainable product development. *Food Frontiers*. <https://doi.org/10.1002/fft2.70194>
54. Idyryshev, B., Muratbayev, A., Tashybayeva, M., Spanova, A., Amirkhanov, S., Serikova, A., Serikov, Z. T., Bakirova, L., Jumazhanova, M., & Bepeyeva, A. (2025). Development and characterization of emulsion gels with pine nut oil, inulin, and whey proteins for reduced-fat meat products. *Foods*, 14(6), 962. <https://doi.org/10.3390/foods14060962>
55. Igual, M., García-Herrera, P., Cámara, R. M., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., & Cámara, M. (2022). Bioactive compounds in rosehip (*Rosa canina*) powder with encapsulating agents. *Molecules*, 27(15), 4737. <https://doi.org/10.3390/molecules27154737>
56. Igual, M., García-Segovia, P., & Martínez-Monzó, J. (2022). Bioactive compounds in rosehip (*Rosa canina*) powder with encapsulating agents. *Foods*, 11(15), 2327. <https://doi.org/10.3390/molecules27154737>
57. ISO 12966-2:2017. *Animal and vegetable fats and oils — Gas chromatography of fatty acid methyl esters — Part 2: Preparation of methyl esters of fatty acids*. International Organization for Standardization.
58. ISO 12966-4:2015. *Animal and vegetable fats and oils — Gas chromatography of fatty acid methyl esters — Part 4: Determination by capillary gas chromatography*. International Organization for Standardization.
59. ISO 21424:2018. *Milk, milk products, infant formula and adult nutritionals — Determination of minerals and trace elements — Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method*. International Organization for Standardization.
60. Jaśniewska, A., & Diowksz, A. (2021). Wide spectrum of active compounds in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) for disease prevention and food production. *Antioxidants*, 10(8), 1279. <https://doi.org/10.3390/antiox10081279>
61. Ji, M., Gong, X., Li, X., Wang, C., & Li, M. (2020). Advanced research on the antioxidant activity and mechanism of polyphenols from *Hippophae* species—A review. *Molecules*, 25(4), 917. <https://doi.org/10.3390/molecules25040917>

62. Jiang, C., Yang, X., Lin, S., Yang, Y., Yu, J., Du, X., & Tang, Y. (2024). Impact of corn starch molecular structures on texture, water dynamics, microstructure, and protein structure in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gel. *Foods*, 13(5), 675. <https://doi.org/10.3390/foods13050675>
63. Jiménez, M. E., O'Donovan, C., de Ullivarri, M. F., & Cotter, P. D. (2022). Microorganisms present in artisanal fermented food from South America. *Frontiers in Microbiology*, 13, 941866. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.941866>
64. Jovanović, S., & Vučić, T. (2020). Dairy by-products: Characteristics and modern ways of utilization. In *Sustainable Development and Natural Resources Management of the Republic of Srpska*. <https://doi.org/10.7251/EORU2002315J>
65. Kadyan, S., Rashmi, H. M., Pradhan, D., Kumari, A., Chaudhari, A., & Deshwal, G. K. (2021). Effect of lactic acid bacteria and yeast fermentation on antimicrobial, antioxidative and metabolomic profile of naturally carbonated probiotic whey drink. *LWT – Food Science and Technology*, 142, 111059. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111059>
66. Kania-Dobrowolska, M., Baraniak, J., & Siger, A. (2023). Sea buckthorn plant as a functional food ingredient, with antioxidant and anti-inflammatory properties. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 22(1), 5–18. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.1198>
67. Karwowska, M., Kononiuk, A., & Stasiak, D. (2022). Effect of acid whey in combination with sodium ascorbate on selected parameters related to proteolysis in uncured dry-fermented sausages. *Applied Sciences*, 12(16), 8316. <https://doi.org/10.3390/app12168316>
68. Kotsaki, P., Aspri, M., & Papademas, P. (2025). Novel whey fermented beverage enriched with a mixture of juice concentrates: Evaluation of antimicrobial, antioxidant, and angiotensin I converting enzyme inhibitory (ACE) activities before and after simulated gastrointestinal digestion. *Microorganisms*, 13(7), 1490. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13071490>
69. Kozhakhieva, M., Dragoev, S., & Stoyanova, M. (2018). Improving of the oxidative stability and quality of new cooked and smoked sausages by using *Hippophae rhamnoides* fruit powder. *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences*, 71(1), 122–128. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2018.01.18>

70. Królczyk, J. B., Dawidziuk, T., Janiszewska-Turak, E., & Sołowiej, B. (2016). Use of whey and whey preparations in the food industry — A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 66(3), 157–165. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2015-0052>
71. Kumar, P., Chatli, M. K., Verma, A. K., Mehta, N., Malav, O. P., Kumar, D., & Sharma, N. (2017). Quality, functionality, and shelf life of fermented meat and meat products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(13), 2844–2856. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1074533>
72. Kumar, Y., Yadav, D. N., Ahmad, T., & Narsaiah, K. (2015). Recent trends in the use of natural antioxidants for meat and meat products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(6), 796–812. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12156>
73. Laranjo, M., Potes, M. E., & Elias, M. (2019). Role of starter cultures on the safety of fermented meat products. *Frontiers in Microbiology*, 10, 853. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00853>
74. Leroy, F., Verluyten, J., & De Vuyst, L. (2006). Functional meat starter cultures for improved sausage fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 106(3), 270–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.06.027>
75. Li, S., Liu, X., Wang, L., Wang, K., Li, M., Wang, X., Yuan, Y., Yue, T., Cai, R., & Wang, Z. (2024). Innovative beverage creation through symbiotic microbial communities inspired by traditional fermented beverages: Current status, challenges and future directions. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64, 10456–10483. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2225191>
76. Liu, C.-Y., Kong, L., Yu, P., Wen, R., Yu, X.-B., Xu, X., & Peng, X. (2022). Whey protein hydrolysates improved the oxidative stability and water-holding capacity of pork patties by reducing protein aggregation during repeated freeze–thaw cycles. *Foods*, 11(14), 2133. <https://doi.org/10.3390/foods11142133>
77. Lorenzo, J. M., González-Rodríguez, R. M., Sánchez, M., Amado, I. R., & Franco, D. (2013). Effects of natural (grape seed and chestnut extract) and synthetic antioxidants (butylated hydroxytoluene, BHT) on the physical, chemical, microbiological and sensory characteristics of dry-cured sausage “chorizo”. *Food Research International*, 54(1), 611–620. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.064>
78. Lorenzo, J. M., Munekata, P. E. S., Gómez, B., Barba, F. J., Mora, L., Pérez-Santaescolástica, C., & Toldrá, F. (2018). Bioactive peptides as natural antioxidants in food products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 79, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.003>

79. Łopusiewicz, Ł., Dmytrów, I., Mituniewicz-Małek, A., Kwiatkowski, P., Kowalczyk, E., Sienkiewicz, M., & Drożdowska, E. (2022). Natural gum from flaxseed by-product as a potential stabilizing and thickening agent for acid whey fermented beverages. *Applied Sciences*, 12(20), 10281. <https://doi.org/10.3390/app122010281>
80. Malos, I. G., Ghizdareanu, A., Vidu, L., Matei, C. B., & Pasarin, D. (2025). The role of whey in functional microorganism growth and metabolite generation: A biotechnological perspective. *Foods*, 14(9), 1488. <https://doi.org/10.3390/foods14091488>
81. Martínez-Zamora, L., Peñalver, R., Ros, G., & Nieto, G. (2021). Innovative natural functional ingredients from olive and citrus extracts in Spanish-type dry-cured sausage “Fuet”. *Antioxidants*, 10(2), 180. <https://doi.org/10.3390/antiox10020180>
82. Máté, M., Selimaj, G., Simon, G., Szalóki-Dorkó, L., & Ficzek, G. (2022). Assessment of berries of some sea buckthorn genotypes by physicochemical properties and fatty acid content of the seed. *Plants*, 11(24), 3412. <https://doi.org/10.3390/plants11243412>
83. Mazorra-Manzano, M. A., Robles-Porchas, G. R., González-Velázquez, D. A., Torres-Llanez, M. J., Martínez-Porchas, M., García-Sifuentes, C. O., González-Córdova, A. F., & Vallejo-Cordoba, B. (2020). Cheese whey fermentation by its native microbiota: Proteolysis and bioactive peptides release with ACE-inhibitory activity. *Fermentation*, 6(1), 19. <https://doi.org/10.3390/fermentation6010019>
84. McQuestin, O. J., Shadbolt, C. T., & Ross, T. (2009). Quantification of the relative effects of temperature, pH, and water activity on inactivation of *Escherichia coli* in fermented meat by meta-analysis. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(22), 6963–6972. <https://doi.org/10.1128/AEM.00291-09>
85. Medveckienė, B., Kulaitienė, J., Jarienė, E., Vaitkevičienė, N., & Hallmann, E. (2020). Carotenoids, polyphenols, and ascorbic acid in organic rosehips (*Rosa* spp.) cultivated in Lithuania. *Applied Sciences*, 10(15), 5337. <https://doi.org/10.3390/app10155337>
86. Mehra, R., Kumar, H., Kumar, N., Ranvir, S., Jana, A., Buttar, H. S., Telessy, I. G., Awuchi, C. G., Okpala, C. O. R., Korzeniowska, M., & Guiné, R. P. F. (2021). Whey proteins processing and emergent derivatives: An insight perspective from constituents, bioactivities, functionalities to therapeutic applications. *Journal of Functional Foods*, 87, 104760. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104760>

87. Mirzakulova, A., Sarsembaeva, T., Suleimenova, Z., Kowalski, Ł., Gajdzik, B., Wolniak, R., & Bembenek, M. (2025). Whey: Composition, processing, application, and prospects in functional and nutritional beverages—A review. *Foods*, 14(18), 3245. <https://doi.org/10.3390/foods14183245>
88. Moldovan, C., Babotă, M., Mocan, A., Menghini, L., Cesa, S., Gavan, A. D., Vodnar, D. C., Ferreira, I. C. F. R., Crișan, G., & Barros, L. (2021). Optimization of the drying process of autumn fruits rich in antioxidants: A study focusing on rosehip (*Rosa canina* L.) and sea buckthorn (*Elaeagnus rhamnoides* (L.) A. Nelson) and their bioactive properties *Food & Function*, 12(9), 3939–3953. <https://doi.org/10.1039/D0FO02783A>
89. Molero, M., & Briñez, W. (2018). Probiotics consumption increment through the use of whey-based fermented beverages. In *Probiotics – Current Knowledge and Future Prospects*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72362>
90. Morell, P., Hernando, I., Llorca, E., & Fiszman, S. (2015). Yogurts with an increased protein content and physically modified starch: Rheological, structural, oral digestion and sensory properties related to enhanced satiating capacity. *Food Research International*, 70, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.024>
91. Mota, J., Moura-Alves, M., Teixeira, A. F., Nóbrega, R., Lameirão, D., & Gonçalves, C. (2026). From cheese whey to functional ingredients: Upcycling whey proteins for cardiovascular and immunomodulatory health—Evidence mapping and perspectives from Portugal. *Foods*, 15(5), 908. <https://doi.org/10.3390/foods15050908>
92. Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Tomasevic, I., Domínguez, R., Barretto, A. C. S., Santos, E. M., & Lorenzo, J. M. (2021). Functional fermented meat products with probiotics—A review. *Journal of Applied Microbiology*, 133(1), 103–121. <https://doi.org/10.1111/jam.15337>
93. Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7), 3380. <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>
94. Murariu, O. C., Lipșa, F. D., Cârlescu, P. M., Frunză, G., Ciobanu, M. M., Cara, I. G., Murariu, F., Stoica, F., Albu, A., Tallarita, A. V., & others. (2024). The effect of including sea buckthorn berry by-products on white chocolate quality and bioactive characteristics under a circular economy context. *Plants*, 13(19), 2799. <https://doi.org/10.3390/plants13192799>

95. Mutaliyeva, B., Turkeyeva, E., Madybekova, G., Živković, L., Talluri, V. P., Vinceković, M., Papademas, P., Aspri, M., Araujo, H., & Issayeva, A. (2025). Acid whey valorization: Novel approaches for probiotic and functional products development. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1630925. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1630925>
96. Negrean, O. R., Farcas, A. C., Nemes, S. A., Cic, D. E., & Socaci, S. A. (2024). Recent advances and insights into the bioactive properties and applications of *Rosa canina* L. and its by-products. *Heliyon*, 10, e30816. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30816>
97. Olas, B. (2016). Sea buckthorn as a source of important bioactive compounds in cardiovascular diseases. *Food and Chemical Toxicology*, 97, 199–204. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2016.09.008>
98. Oomah, B. D., Séry, G., Godfrey, D. V., & Beveridge, T. H. J. (1999). Rheology of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(9), 3546–3550. <https://doi.org/10.1021/jf981312c>
99. Paramithiotis, S., Patra, J., Kotseridis, Y., & Dimopoulou, M. (2024). Fermented beverages revisited: From terroir to customized functional products. *Fermentation*, 10(1), 57. <https://doi.org/10.3390/fermentation10010057>
100. Park, Y. W. (2017). Goat milk—Chemistry and nutrition. In *Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals* (2nd ed., pp. 42–83). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119110316.ch2>
101. Pateiro, M., Gómez, B., Munekata, P. E. S., Barba, F. J., Putnik, P., Kovačević, D. B., & Lorenzo, J. M. (2021). Plant extracts obtained with green solvents as natural antioxidants in fresh meat products. *Antioxidants*, 10(2), 181. <https://doi.org/10.3390/antiox10020181>
102. Peña, F., Bastías-Montes, J. M., Vergara, C., Díaz, M. J., Bittner, M., & Shene, C. (2023). Bioactive compounds and antioxidant activity in the fruit of rosehip (*Rosa canina* L. and *Rosa rubiginosa* L.). *Molecules*, 28(8), 3544. <https://doi.org/10.3390/molecules28083544>
103. Pereira, A., Silva, G. D. S., Almeida, R. D., Salles, H. O., Santos, K., Florentino, E. R., & Buriti, F. C. A. (2018). Instrumental texture and sensory evaluation of fermented dairy beverages processed with reconstituted goat whey powder and a co-culture of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus casei*. *Mljekarstvo*, 68(1), 21–29. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2018.0103>

104. Pérez, M., Domínguez-López, I., & Lamuela-Raventós, R. M. (2023). The chemistry behind the Folin–Ciocalteu method for the estimation of (poly)phenol content in food: Total phenolic intake in a Mediterranean dietary pattern. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(46), 17543–17553. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04022>
105. Pescuma, M., de Valdez, G. F., & Mozzi, F. (2015). Whey-derived valuable products obtained by microbial fermentation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 6183–6196. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6766-z>
106. Pires, A. F., Marnotes, N. G., Rubio, O. D., Garcia, A. C., & Pereira, C. D. (2021). Dairy by-products: A review on the valorization of whey and second cheese whey. *Foods*, 10(5), 1067. <https://doi.org/10.3390/foods10051067>
107. Plessas, S. (2021). Advancements in the use of fermented fruit juices by lactic acid bacteria as functional foods: Prospects and challenges of *Lactiplantibacillus plantarum* subsp. *plantarum* application. *Fermentation*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.3390/fermentation8010006>
108. PN-A-86061:2002. *Mleko i przetwory mleczne — Mleko fermentowane*. Polski Komitet Normalizacyjny.
109. PN-A-86122:1968. *Mleko i przetwory mleczarskie — Oznaczanie kwasowości miareczkowej*. Polski Komitet Normalizacyjny.
110. PN-EN ISO 11290-1:2017-07. *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the detection and enumeration of Listeria monocytogenes and Listeria spp. — Part 1: Detection method*. Polski Komitet Normalizacyjny.
111. PN-EN ISO 11290-2:2017-07. *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the detection and enumeration of Listeria monocytogenes and Listeria spp. — Part 2: Enumeration method*. Polski Komitet Normalizacyjny.
112. PN-EN ISO 13720:2010. *Meat and meat products — Enumeration of presumptive Pseudomonas spp.* Polski Komitet Normalizacyjny.
113. PN-EN ISO 21528-2:2017-08. *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the detection and enumeration of Enterobacteriaceae — Part 2: Colony-count technique*. Polski Komitet Normalizacyjny.
114. PN-EN ISO 4833-1:2013-12 + A1:2022-06. *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the enumeration of microorganisms — Part 1: Colony count at 30°C by the pour plate technique*. Polski Komitet Normalizacyjny.

115. PN-EN ISO 6579-1:2017-04 + A1:2020-09. *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the detection, enumeration and serotyping of Salmonella — Part 1: Detection of Salmonella spp.* Polski Komitet Normalizacyjny.
116. PN-EN ISO 6888-2:2001/A1:2004. *Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of coagulase-positive staphylococci — Part 2: Technique using rabbit plasma fibrinogen agar medium.* Polski Komitet Normalizacyjny.
117. PN-EN ISO 7932:2005 + A1:2020-09. *Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of presumptive Bacillus cereus — Colony-count technique at 30°C.* Polski Komitet Normalizacyjny.
118. PN-ISO 16649-2:2004. *Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of  $\beta$ -glucuronidase-positive Escherichia coli — Part 2: Colony-count technique at 44°C using 5-bromo-4-chloro-3-indolyl  $\beta$ -D-glucuronide.* Polski Komitet Normalizacyjny.
119. PN-ISO 21527-2:2009. *Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of yeasts and moulds — Part 2: Colony count technique in products with water activity less than or equal to 0.95.* Polski Komitet Normalizacyjny.
120. Prestes, A. A., Silveira, M. F., Canella, M. H. M., Helm, C. V., Andrade, D. R. M., Ferreira, A. L. A., Amboni, R. D. M. C., Fedrigo, I. M. T., Hernández, E., & Prudencio, E. S. (2023). Whey block freeze concentration aiming a functional fermented lactic beverage with the addition of probiotic and guabiroba pulp (*Campomanesia xanthocarpa* O. Berg), a native Brazilian fruit. *Food Science and Technology*, 43, e26923. <https://doi.org/10.5327/fst.26923>
121. Purkiewicz, A., & Pietrzak-Fiećko, R. (2021). Antioxidant properties of fruit and vegetable whey beverages and fruit and vegetable mousses. *Molecules*, 26(11), 3126. <https://doi.org/10.3390/molecules26113126>
122. Rao, M. J., & Zheng, B. (2025). The role of polyphenols in abiotic stress tolerance and their antioxidant properties to scavenge reactive oxygen species and free radicals. *Antioxidants*, 14(1), 74. <https://doi.org/10.3390/antiox14010074>
123. Rébak, G., Cantero, R. V., & Obregón, G. R. E. (2025). Spontaneous fermentation of regional fruit beverages using buffalo yogurt whey. *Journal of Buffalo Science*, 14. <https://doi.org/10.6000/1927-520X.2025.14.14>

124. Rebouillat, S., & Ortega-Requena, S. (2015). Potential applications of milk fractions and valorization of dairy by-products: A review of the state-of-the-art available data, outlining the innovation potential from a bigger data standpoint. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 6(3), 176–203. <https://doi.org/10.4236/jbnb.2015.63018>
125. Recio, I., Ramos, M., & Pilosof, A. M. R. (2008). Engineered food/protein structure and bioactive proteins and peptides from whey. In A. M. R. Pilosof & G. B. Bartholomai (Eds.), *Characterization of Food: Emerging Methods* (pp. 547–574). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-75430-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-0-387-75430-7_30)
126. Reddy, G. B., Surasani, V., Amaravathi, P., Mandal, P., Desai, A., & Sen, A. (2024). Influence of whey protein concentrates as a novel binder on physicochemical, textural and ultrastructural properties of restructured buffalo meat slices. *International Journal of Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16744>
127. Ribeiro, J. S., Santos, M. J. M. C., Silva, L. K. R., Pereira, L. C. L., Santos, I. A., Lannes, S. C. S., & Silva, M. V. (2019). Natural antioxidants used in meat products: A brief review. *Meat Science*, 148, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.10.016>
128. Rozporządzenie Komisji (WE) nr 2073/2005 z dnia 15 listopada 2005 r. w sprawie kryteriów mikrobiologicznych dotyczących środków spożywczych. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L 338, 1–26.
129. Rumpf, J., Burger, R., & Schulze, M. (2023). Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins. *International Journal of Biological Macromolecules*, 233, 123470. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123470>
130. Sa'aid, N., & Tan, J. S. (2025). From probiotic fermentation to functional drinks: A review on fruit juices with lactic acid bacteria and prebiotics. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 55, 915–934. <https://doi.org/10.1080/10826068.2025.2467441>
131. Salehi, F. (2021). Quality, physicochemical, and textural properties of dairy products containing fruits and vegetables: A review. *Food Science & Nutrition*, 9(8), 4666–4686. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2430>.
132. Salek, R. N., Pleva, P., Sumczynski, D., Vinter, Š., Kopečková, J., Rejdlová, A., & Lorencová, E. (2025). Sauerkraut juice fermented with different symbiotic starter cultures: Comprehensive assessment of physicochemical, rheological, antioxidant, and

- microbiological characteristics. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1570465. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1570465>
133. Saricaoglu, F. T., Atalar, I., Yilmaz, V. A., Odabas, H. I., & Gul, O. (2019). Application of multi-pass high pressure homogenization to improve stability, physical and bioactive properties of rosehip (*Rosa canina* L.) nectar. *Food Chemistry*, 282, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.002>
134. Saubenova, M., Oleinikova, Y., Rapoport, A., Maksimovich, S., Yermekbay, Z. N., & Khamedova, E. (2024). Bioactive peptides derived from whey proteins for health and functional beverages. *Fermentation*, 10(7), 359. <https://doi.org/10.3390/fermentation10070359>
135. Schubertová, S., Krepsová, Z., Janotková, L., Potočnáková, M., & Kreps, F. (2021). Exploitation of sea buckthorn fruit for novel fermented foods production: A review. *Processes*, 9(5), 749. <https://doi.org/10.3390/pr9050749>
136. Selmi, H., Presutto, E., Spano, G., Capozzi, V., & Fragasso, M. (2025). Valorising whey: From environmental burden to bio-based production of value-added compounds and food ingredients. *Foods*, 14(21), 3646. <https://doi.org/10.3390/foods14213646>
137. Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects—A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 820–897. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.018>
138. Shehata, M. G., Abd El-Aziz, N. M., Mehany, T., & Simal-Gandara, J. (2023). Taro leaves extract and probiotic lactic acid bacteria: A synergistic approach to improve antioxidant capacity and bioaccessibility in fermented milk beverages. *LWT – Food Science and Technology*, 187, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115280>
139. Silyvridou, A., Bari, A., Georgopoulou, T., Baxevanou, C., & Giannouli, P. (2024). Aqua extracts of lyophilized sea buckthorn modify fermentation and quality properties of set-type yogurt. *Applied Sciences*, 14(17), 7634. <https://doi.org/10.3390/app14177634>
140. Sionek, B., Przybylski, W., Kołożyn-Krajewska, D., & Wójciak, K. M. (2025). Effect of natural marination based on apple vinegar and acid whey on selected quality characteristics of fermented beef ham. *Agriculture*, 15(1), 107. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010107>
141. Sionek, B., Szydłowska, A., Küçükgöz, K., & Kołożyn-Krajewska, D. (2023). Traditional and new microorganisms in lactic acid fermentation of food. *Fermentation*, 9(12), 1019. <https://doi.org/10.3390/fermentation9121019>

142. Sivamaruthi, B. S., Kesika, P., Barwin, S., Chaiyasut, C., & Thangaleela, S. (2025). Lactic acid bacteria in the meat industry: Flavor, function, and food safety. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1703213. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1703213>
143. Skapska, S., Marszałek, K., Woźniak, Ł., Szczepańska, J., Danielczuk, J., & Zawada, K. (2020). The development and consumer acceptance of functional fruit-herbal beverages. *Foods*, 9(12), 1819. <https://doi.org/10.3390/foods9121819>
144. Škrovánková, S., & Mlček, J. (2025). Antioxidant potential and its changes caused by various factors in lesser-known medicinal and aromatic plants. *Horticulturae*, 11(1), 104. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010104>
145. Skryplonek, K., Dmytrów, I., & Mituniewicz-Małek, A. (2019). Probiotic fermented beverages based on acid whey. *Journal of Dairy Science*, 102(9), 7773–7780. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16385>
146. Skrzypczak, K., Gustaw, W., Fornal, E., Kononiuk, A., Michalak-Majewska, M., Radzki, W., & Waško, A. (2020). Functional and technological potential of whey protein isolate in production of milk beverages fermented by new strains of *Lactobacillus helveticus*. *Applied Sciences*, 10(20), 7089. <https://doi.org/10.3390/app10207089>
147. Sojić, B., Tomović, V., Jokanović, M., & Pavlič, B. (2021). Essential oils as natural additives in dry-fermented sausages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 854, 012089. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/854/1/012089>
148. Soltan, O. I., Gazwi, H. S. S., Ragab, A. E., Aljohani, A. S. M., El-Ashmawy, I. M., Batiha, G. E. S., Hafiz, A. A., & Abdel-Hameed, S. M. (2023). Assessment of bioactive phytochemicals and utilization of *Rosa canina* fruit extract as a novel natural antioxidant for mayonnaise. *Molecules*, 28(8), 3350. <https://doi.org/10.3390/molecules28083350>
149. Sołowiej, B., Glibowski, P., Muszyński, S., Wydrych, J., Gawron, A., & Jeliński, T. (2015). The effect of fat replacement by inulin on the physicochemical properties and microstructure of acid casein processed cheese analogues with added whey protein polymers. *Food Hydrocolloids*, 44, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.022>
150. Soumati, B., Atmani, M., Benabderrahmane, A., & Benjelloun, M. (2023). Whey valorization – Innovative strategies for sustainable development and value-added

- product creation. *Journal of Ecological Engineering*, 24(9), 284–296. <https://doi.org/10.12911/22998993/169505>
151. Sytařová, I., Orsavová, J., Snopek, L., Mlček, J., Byczyński, Ł., & Mišurcová, L. (2020). Impact of phenolic compounds and vitamins C and E on antioxidant activity of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) berries and leaves of diverse ripening times. *Food Chemistry*, 310, 125784. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125784>
152. Szafrńska, J. O., Muszyński, S., & Sołowiej, B. G. (2020). Effect of whey protein concentrate on physicochemical properties of acid casein processed cheese sauces obtained with coconut oil or anhydrous milk fat. *LWT – Food Science and Technology*, 127, 109434. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109434>
153. Szafrńska, J. O., Waraczewski, R., Bartoń, M., Wesołowska-Trojanowska, M., & Sołowiej, B. G. (2025). Physicochemical, rheological, and sensory properties of organic goat's and cow's fermented whey beverages with Kamchatka berry, blackcurrant, and apple juices produced at a laboratory and technical scale. *Foods*, 15(1), 16. <https://doi.org/10.3390/foods15010016>
154. Szafrńska, J. O., Waraczewski, R., Wesołowska-Trojanowska, M., Maziejuk, W., Nowak, P., & Sołowiej, B. G. (2024). Effects of organic fruit juices on physicochemical, microbiological, and antioxidative aspects of fermented whey beverages from organic goat and cow milk produced at laboratory and industrial scales. *Journal of Dairy Science*, 107, 10481–10496. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25350>
155. Taheri, S., Khomeiri, M., Aalami, M., & Moayedi, A. (2019). Non-fermented synbiotic drink based on lactic cheese whey which incorporates *Lactobacillus rhamnosus* GG and *Lactobacillus paracasei*. *International Journal of Food Studies*, 8(2), 102–114. <https://doi.org/10.7455/ijfs/8.2.2019.a9>
156. Taormina, P. J., & Sofos, J. N. (2014). Low-water activity meat products. In J. B. Gurtler, M. P. Doyle, & J. L. Kornacki (Eds.), *The Microbiological Safety of Low Water Activity Foods and Spices* (pp. 127–164). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2062-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2062-4_6)
157. Tereshchuk, L., Starovoytova, K., Babich, O., Dyshlyuk, L., Sergeeva, I., Pavsky, V., Ivanova, S., & Prosekov, A. (2020). Sea buckthorn and rosehip oils with chokeberry extract to prevent hypercholesterolemia in mice caused by a high-fat diet in vivo. *Nutrients*, 12(10), 2941. <https://doi.org/10.3390/nu12102941>

158. Tkacz, K., Wojdyło, A., Turkiewicz, I. P., Bobak, Ł., & Nowicka, P. (2019). Antioxidant and anti-enzymatic activities of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) fruits modulated by chemical components. *Antioxidants*, 8(12), 618. <https://doi.org/10.3390/antiox8120618>
159. Tocai, A. C., Moțoc, A. C., Vlaic, R. A., Socaciu, M.-I., Vodnar, D. C., & Socaci, S. A. (2025). Multifunctional roles of medicinal plants in the meat industry. *Plants*, 14(17), 2737. <https://doi.org/10.3390/plants14172737>
160. Toldrá, F., Hui, Y. H., Astiasarán, I., Sebranek, J. G., & Talon, R. (Eds.). (2014). *Handbook of Fermented Meat and Poultry* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118522653>
161. U.S. Environmental Protection Agency. (2007). *Method 7473: Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry*. U.S. EPA.
162. Vélez-Ruiz, J. F., & Hernández, T. (2024). Development, characterization, and stability of a functional beverage from whey. *MOJ Food Processing & Technology*, 12. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2024.12.00310>
163. Verardo, V., Gómez-Caravaca, A. M., & Tabanelli, G. (2020). Bioactive components in fermented foods and food by-products. *Foods*, 9(2), 153. <https://doi.org/10.3390/foods9020153>
164. Vilas-Franquesa, A., Saldo, J., & Juan, B. (2020). Potential of sea buckthorn-based ingredients for the food and feed industry — A review. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, 17. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-00032-y>
165. Vossen, E., Utrera, M., De Smet, S., Morcuende, D., & Estévez, M. (2012). Dog rose (*Rosa canina* L.) as a functional ingredient in porcine frankfurters without added sodium ascorbate and sodium nitrite. *Meat Science*, 92(4), 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.05.010>
166. Wang, H., Wang, C. N., & Guo, M. R. (2019). Effects of addition of strawberry juice pre- or post-fermentation on physiochemical and sensory properties of fermented goat milk. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 4978–4988. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15750>
167. Wang, Z., Zhao, F., Wei, P., Chai, X., Hou, G., & Meng, Q. (2022). Phytochemistry, health benefits, and food applications of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1036295. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1036295>

168. Wójciak, K. M., & Dolatowski, Z. J. (2016). Evaluation of natural preservatives in combination with acid whey for use in fermented sausage. *Scientia Agricola*, 73(2), 125–133. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0087>
169. Wójciak, K. M., Dolatowski, Z. J., & Kołożyn-Krajewska, D. (2015). Use of acid whey and probiotic strains to improve microbiological quality and sensory acceptance of organic fermented sausage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(5), 539–547. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12259>
170. Yan, X., Zhang, Z., Wang, Y., Zhang, W., Zhang, L., Liu, Y., Chen, D., Wang, W., Ma, W., Qian, J. Y., & Gu, R. (2023). Antioxidant capacity, flavor and physicochemical properties of FH06 functional beverage fermented by lactic acid bacteria. *Applied Biological Chemistry*, 66, 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13765-022-00762-2>
171. Yang, F., Zhu, Y., Li, X., Xiang, F., Deng, M., Zhang, W., Song, W., Sun, H., & Tang, C. (2023). Identification of protein–phenol adducts in meat proteins: A molecular probe technology study. *Foods*, 12(23), 4225. <https://doi.org/10.3390/foods12234225>
172. Yiğit, A., Bielska, P., Cais-Sokolińska, D., & Samur, G. (2023). Whey proteins as a functional food: Health effects, functional properties, and applications in food. *Journal of the American Nutrition Association*, 42(8), 758–768. <https://doi.org/10.1080/27697061.2023.2169208>
173. Zamfir, M., Angelescu, I. R., Voaides, C., Cornea, C., Boiu-Siculia, O., & Grosu-Tudor, S. (2022). Non-dairy fermented beverages produced with functional lactic acid bacteria. *Microorganisms*, 10(12), 2314. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122314>
174. Zhang, S. S., Duan, J. Y., Zhang, T. T., Lv, M., & Gao, X. G. (2023). Effect of compound dietary fiber of soybean hulls on the gel properties of myofibrillar protein and its mechanism in recombinant meat products. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1129514. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1129514>
175. Zhou, M., Sun, Y., Luo, L., Pan, H., Zhang, Q., & Yu, C. (2023). Road to a bite of rosehip: A comprehensive review of bioactive compounds, biological activities, and industrial applications of fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 136, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.006>
176. Zorzi, M., Gai, F., Medana, C., Aigotti, R., & Peiretti, P. G. (2020). Identification of polyphenolic compounds in edible wild fruits grown in the North-West of Italy by

means of HPLC-DAD-ESI HRMS. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(3), 420–426.  
<https://doi.org/10.1007/s11130-020-00830-2>

177. Zou, Q., Liu, Y., Luo, L., Chen, Y., Zheng, Y., Ran, G., & Liu, D. (2024). Screening of optimal konjac glucomannan–protein composite gel formulations to mimic the texture and appearance of tripe. *Gels*, 10(8), 528.  
<https://doi.org/10.3390/gels10080528>
178. Žvirdauskienė, R., Jonikė, V., Bašinskienė, L., & Čižeikienė, D. (2025). Fruit and vegetable juices as functional carriers for probiotic delivery: Microbiological, nutritional, and sensory perspectives. *Microorganisms*, 13(6), 1272.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms13061272>

## **9. Kopie opublikowanych prac wchodzących w skład cyklu publikacji**

## Article

# Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices on the Physicochemical, Rheological, and Microbial Properties of Organic Goat or Cow Fermented Whey Beverages

Maciej Barton<sup>1</sup> , Robert Waraczewski  and Bartosz G. Sołowiej <sup>\*</sup> 

Department of Dairy Technology and Functional Foods, Faculty of Food Sciences and Biotechnology, University of Life Sciences in Lublin, Skromna 8, 20-704 Lublin, Poland; maciej.barton@up.lublin.pl (M.B.); robert.waraczewski@up.lublin.pl (R.W.)

\* Correspondence: bartosz.solowiej@up.lublin.pl; Tel.: +48-814623350

**Abstract:** This study was focused on the production of fermented whey beverages (goat—sweet or sour whey, and cow—sweet or sour whey) enriched with organic fruit juices: sea buckthorn or rosehip. Our research included trials with unpasteurized whey and the combination of this whey with organic sea buckthorn and wild rosehip juices, fermented with lactic acid bacteria. Assessments of the physicochemical, rheological, and microbial properties of the above-mentioned beverages were conducted. Our findings indicated that the addition of organic fruit juices significantly improved the properties of the fermented whey beverages. Microbiological safety was ensured, with low levels of pathogenic microorganisms detected. The incorporation of organic cow's and goat's whey, combined with organic fruit juices, not only enhanced the health benefits but also diversified the available range of functional dairy products on the market. The additional goal of this study was to utilize liquid whey, commonly considered a waste in organic farms, and transform it into a valuable product, offering a wider variety of fermented beverages to consumers. This research also addresses the scale limitations of organic farms in whey processing and its potential transformation into functional products. By employing selected strains of lactic acid bacteria, we enhanced the health-promoting properties of the final products, potentially benefiting local producers by reducing waste and aligning with the European Green Deal standards.

**Keywords:** microbiological safety; pH; sustainable production; functional food; whey; organic fruit juice; viscoelastic properties



Academic Editor: Małgorzata Ziarno

Received: 20 October 2024

Revised: 1 December 2024

Accepted: 23 January 2025

Published: 25 January 2025

**Citation:** Barton<sup>1</sup>, M.; Waraczewski, R.; Sołowiej, B.G. Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices on the Physicochemical, Rheological, and Microbial Properties of Organic Goat or Cow Fermented Whey Beverages. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 1240. <https://doi.org/10.3390/app15031240>

**Copyright:** © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Fermented whey beverages frequently contain fruit juices for taste and nutritional benefits and are increasingly drawing attention due to their potential health-promoting effects [1,2]. Recent studies have also been done to improve the sensory attributes and acceptance of these drinks while it has been shown that consumer perceptions might be significantly improved with some fruit juices additions [3,4]. Fermentation with probiotic bacteria has not only improved the organoleptic properties of whey but also increased its nutraceutical values, resulting in a highly functional food [5]. This process improves the functional properties of food by enhancing nutrient bioavailability, producing bioactive peptides, and enriching the product with probiotics. These improvements support digestive health and may offer additional health benefits through the production of organic acids and other bioactive compounds. The fermentation of whey beverages significantly enhances

their functional properties by enriching them with probiotics and bioactive compounds, which support gut health. As noted by Sionek et al., lactic fermentation can lead to an increase in beneficial metabolites and improvements in the sensory profile of the product [6]. Additionally, this process reduces undesirable compounds and improves texture, making the products more appealing to consumers, as highlighted by Verardo et al. [7].

Whey is not only a high-nutrition food but also serves as a medium for cultivating numerous probiotic-fermented products that are significant for good gut health and general well-being. Examples of whey-based products include whey protein concentrates, fermented whey beverages, and whey-based dairy products such as yogurt and kefir. Whey protein concentrates are widely used in sports nutrition and functional foods due to their high protein content and bioactive properties, as highlighted by Yig'it et al. [8]. Fermented whey beverages, often enriched with probiotics, are recognized for their gut health benefits and functional qualities, as noted by Gorachiya et al. [9]. Additionally, whey-based products such as yogurt and kefir provide nutrient-dense, probiotic-rich options for consumers seeking health-promoting dairy products, as described by Królczyk et al. [10]. These probiotics balance the gut microbiota, which is beneficial for immunity, digestion, and psychological health. Additionally, bioactive peptides and other compounds formed during whey fermentation can express anti-inflammatory, antioxidant, and antimicrobial activities, further elevating the overall potential of the health benefits from whey-based products. Additionally, bioactive peptides such as lactoferrin and  $\beta$ -lactoglobulin, known for their antimicrobial and antioxidant activities, enhance the nutraceutical potential of whey-based products. For instance, lactoferrin and its derivatives, such as lactoferricin, exhibit potent antimicrobial activity by disrupting bacterial membranes and providing immune support [11,12]. Similarly,  $\beta$ -lactoglobulin is recognized for its antibacterial and hypotensive properties, which further emphasize its role in functional foods [11]. Whey is a liquid by-product from cheese production that increasingly becomes important in view of its environmental impact and potential for the development of functional foods and health products. Whey, derived from goat milk, is a particularly valuable substrate for the growth of specific strains of lactic acid bacteria (LAB), including *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus acidophilus*, and *Lactobacillus fermentum*. It has been found that these genera of bacteria metabolize complex nutrients in whey, leading to the production of bioactive compounds that may explain their high metabolic and bio-conversion potential [13,14]. The fermentation of whey beverages with lactic acid bacteria brings additional health benefits. Among other things, these bacteria can help increase good intestinal microbiota and thereby improve digestion and the immune system [15].

Rosehip juice (*Rosa canina* L.) is noted for its significant health benefits due to its rich content of antioxidants, phenolic compounds, and vitamins such as vitamin C. It contains 656.4 mg of the total phenolics per gram of dry matter (mg GAE/g DM) and 149.4 mg of flavonoids per gram of dry matter. The vitamin C level surpasses that found in citrus—up to 426 mg of vitamin C per 100 g of fresh wild rose fruit. That helps in combating oxidative stress in the human body—a factor linked to various chronic diseases, such as cancer and cardiovascular conditions. The high content of ellagic acid serves in the neutralization of free radicals by promoting health at the cellular level and reducing the risk of degenerative diseases. The antimicrobial activity of wild rosehip juice has also been confirmed, indicating its benefit in enhancing immune function within diets. The regular consumption of such juices increases the phenolic excretion by humans, thus positively impacting the defense mechanisms of the body against oxidative damage [16,17].

In contrast, buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) juice is abundant in vitamins, including large quantities of vitamin C (up to 10 times more than that found in oranges), vitamin E, and many B group vitamins, which support the immune system, skin regeneration, and

metabolism. It also has antioxidant phytonutrients such as flavonoids and carotenoids, which protect the body from oxidative stress, which may reduce the risk of chronic diseases, including heart disease. Equally, high levels of omega-3, omega-6, and omega-9 fatty acids in sea buckthorn juice help in improving cholesterol levels while at the same time supporting the function of the heart. Additionally, the juice has also been investigated for its anti-inflammatory and antimicrobial properties, which could be beneficial in respect of digestive health and infection protection. However, health claims require more clinical research, particularly in cases of regular consumption as a juice supplement [18,19]. Sea buckthorn and rosehip are renowned for their extensive health-promoting properties, primarily due to their high content of vitamins, flavonoids, and essential fatty acids. Rosehip is rich in vitamin C, carotenoids, and phenolics, which contribute to its potent antioxidant and anti-inflammatory effects. As a functional food, it has been shown to support immune health, reduce oxidative stress, and provide medicinal benefits for managing chronic conditions [20,21]. Similarly, sea buckthorn demonstrates exceptional benefits due to its bioactive compounds, including flavonoids, vitamins, and essential fatty acids. These contribute to cardiovascular health, immune support, and anti-inflammatory effects, making sea buckthorn a vital ingredient in functional beverages and plant-based diets [22,23].

The main purpose of this research was to obtain fermented, organic cow or goat whey (sour and sweet) beverages enriched with sea buckthorn or wild rosehip juice. Microbiological analyzes of the whey and lab fermentations were performed using unpasteurized whey to generate fermented beverages. Moreover, studies to evaluate the influence of raw materials in the formation and quality of fermented beverages, such as through their physicochemical and rheological properties, were also performed. This research also lays weight on the future possibilities of whey as it upholds a synergistic boosting effect for a more sustainable food production and energy in environmental perspectives.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Materials

To produce fermented organic whey beverages enriched with organic fruit juices, the following materials were utilized as follows: unpasteurized sour goat whey, unpasteurized sweet goat whey, unpasteurized sour cow whey, and unpasteurized sweet cow whey (Family Organic Farm "Figa" owned by Waldemar and Tomasz Maziejuk, Mszana, Tylawa, Poland); sea buckthorn juice and wild rosehip juice (Polska Róż'a-Ernest Michalski Ltd., Falenty Nowe, Raszyn, Poland); lyophilized lactic starter cultures for a direct vat inoculation containing Lactoferm ABY Pro-Tek, which includes *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*, *Bifidobacterium bifidum*, *Lactobacillus acidophilus*, and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (Biochem s.r.l., Via La Rinascita, Birori (Nuoro), Italy); and organic brown cane sugar obtained from organic farming (Bio Planet Sp. z o.o., Leszno, Poland).

### The Preparation of Fermented Whey Beverages with the Addition of Organic Fruit Juices

The first preparation phase consisted of portioning out the exact amounts of the ingredients specified in Table 1, at a whey–juice ratio of 1:1 (cow or goat and sweet or sour whey) to juice (sea buckthorn or wild rose). These liquids were then mixed in lab-scale mixing at 140 rpm for 30 s. Upon homogenous mixing, a 0.3 mm (approximately 35 gsm) thick sieve was then utilized to filter the mixture. Next, lyophilized lactic starter culture (Lactoferm ABY Pro-Tek) at a dosage level of 10 g/100 L whey juice or water-soluble extract was added followed by the organic brown cane sugar to contribute 5% in the final formulation. The 'water-soluble extract' refers to the microbial starter culture solution prepared in sterile distilled water at a concentration of 10 g/100 L. This mixture was homogenized at 140 rpm for 30 s. The bottles were then sterilized and filled with the

mixture. The mixture was bottled and incubated for 4 h at 42 °C, followed by a maturation for 14 days at 5 °C before performing the respective analyzes.

**Table 1.** The ingredients and combinations of fermented whey beverages with the addition of organic fruit juices.

Type of Whey	Whey Kind (Sweet/Sour)		Type of Juice
Cow whey (Kr)	Sweet whey (SS)	with	Sea buckthorn juice (R)
	Sour whey (SK)	with	Sea buckthorn juice (R)
	Sweet whey (SS)	with	Wild rosehip juice (DR)
	Sour whey (SK)	with	Wild rosehip juice (DR)
Goat whey (K)	Sweet whey (SS)	with	Sea buckthorn juice (R)
	Sour whey (SK)	with	Sea buckthorn juice (R)
	Sweet whey (SS)	with	Wild rosehip juice (DR)
	Sour whey (SK)	with	Wild rosehip juice (DR)

## 2.2. Rheological Properties of the Obtained Fermented Whey Beverages

### 2.2.1. Apparent Viscosity

The fermented whey beverages with organic juice's apparent viscosity was measured using a Brookfield DV II+ rotational rheometer (Brookfield Engineering Laboratories, Stoughton, MA, USA). These measurements were made with S21 coaxial cylinders with a temperature of 21 °C and a rotation of 0.5 rpm. All of the samples were measured in triplicate.

### 2.2.2. Ultrasonic Viscosity

The dynamic viscosity of the formulated product was measured by Unipan 505 (UNIPAN, Warsaw, Poland). Measurements were carried out at a temperature of 21 °C and the ultrasound signal level was checked before each measurement. The test was carried out with the measuring probe fully immersed into the beverage sample. All of the tests were completed in triplicate and the results are shown as the mPas·g/cm<sup>3</sup>.

## 2.3. Viscoelastic Properties

The rheological properties were tested on a Kinexus lab+ rheometer (Malvern Panalytical, Cambridge, UK) employing serrated plates (PU40X SW1382 SS and PLS40X S2222 SS; plate-to-plate configuration). The storage ( $G'$ ) and loss ( $G''$ ) moduli were measured (1 Hz, 21 °C). The strain was the maximum within the linear viscoelastic region of this material. The strain corresponded to the maximum found within the linear viscoelastic region of the studied material. The results were obtained using the Kinexus Malvern software (rSpace) (v.2.2).

## 2.4. Physicochemical Properties of the Obtained Fermented Whey Beverages

### 2.4.1. pH Measurement

Measuring the pH of the liquid involved determining the concentration of hydrogen ions (Elmetron CP-315; Elmetron, Zabrze, Poland), with an accuracy of  $\pm 0.05$ . The test was repeated ( $n = 3$ ).

### 2.4.2. Determination of Titratable Acidity

Titratable acidity was determined automatically with a sodium hydroxide solution in phenolphthalein according to the Polish standard PN A 86122:1968 [24]. Two drops of phenolphthalein to 100 ml of the sample were added. This was followed by titrating the mixture of 0.25 N aqueous sodium hydroxide solution while maintaining stirring to achieve

a pink color which persisted for at least 30 s. The result was provided in Soxhlet–Henkel degrees ( $\circ$ SH). For milky samples, this test was performed in triplicate.

### 2.5. Microbiological Properties of the Obtained Fermented Whey Beverages

The microbiological testing of the produced beverages included the determination of pathogenic microorganism cross-contamination in whey and the final product. Those are *Listeria monocytogenes* in accordance with the standard PN-EN ISO 11290–2:2017–07 [25] and *Salmonella* according to standards PN-EN ISO 6579–1:2017–04/A1:2020-09 [26], as well as PN-EN ISO equivalents. Moreover, tests were performed on microorganisms associated with process hygiene: coagulase-positive *Staphylococci* (in accordance with PN-EN ISO 6888-2:2001/A1:2004 [27]), *Enterobacteriaceae* family bacteria (PN-ISO 21528-2:2017 [28]), and *Escherichia coli* (PN-ISO 16649–2:2004 [29]). The above analyzes took place in a laboratory approved by ALAB, Warsaw, Poland, according to the Commission Regulation (EC) No 2073/2005.

### 2.6. Statistical Analysis

The collected data were statistically analyzed using an ANOVA of three factors followed by the Tukey test at a 0.05 significance level for the mean comparison. Statistica PL v. 13 (StatSoft, Krakow, Poland) was used as the statistical software package for this purpose.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. Rheological Properties of the Obtained Fermented Whey Beverages

#### 3.1.1. Apparent and Ultrasonic Viscosity

The apparent and dynamic viscosity measurements for each tested sample of fermented drink are detailed in Table 2. The first two columns present the results for laboratory-scale beverage productions. The appearance of manufactured beverages was presented in Figure 1.



**Figure 1.** The appearance of the final product with labels. Own photograph.

Apparent viscosity measurements ranged from 0.21 to 0.93 Pa·s; the lowest value equal to 0.21 Pa·s was recorded for SKKr/R and SSKr/R (both with unpasteurized sour and sweet cow whey with sea buckthorn juice). The lower apparent viscosity of beverages containing sea buckthorn juice compared with that derived from water can be also seen from Table 2. On the contrary, the highest apparent viscosity was found in sample SSK/NP (0.93 Pa·s) and included no fruit juice, since it was sweet goat whey (control sample). These results indicate that the apparent viscosity was affected by the type of whey used and a significant modification abolishing fruit juice.

**Table 2.** Results of the apparent and dynamic viscosity ( $p < 0.05$ ) measurements of fermented whey beverages with the addition of various fruit juices at laboratory scale.

Fermented Whey Beverages	Apparent Viscosity [Pa·s] ± SD	Dynamic Viscosity [mPas × g/cm <sup>-3</sup> ] ± SD
SKKr/R	0.21 a ± 0.01	16.67 d ± 4.71
SSKr/R	0.21 ab ± 0.00	3.67 ab ± 1.16
SSK/R	0.31 c ± 0.00	1.17 a ± 0.24
SKK/R	0.31 c ± 0.00	2.50 ab ± 0.00
SSKr/DR	0.31 c ± 0.00	3.00 ab ± 0.50
SSK/DR	0.30 c ± 0.00	2.00 ab ± 0.00
SKKr/DR	0.21 a ± 0.00	8.50 bc ± 3.20
SKK/DR	0.30 c ± 0.00	2.50 ab ± 0.00
SSKr/NP	0.23 abc ± 0.05	17.66 d ± 1.43
SKKr/NP	0.30 bc ± 0.00	11.67 cd ± 1.12
SSK/NP	0.93 e ± 0.05	26.67 e ± 2.00
SKK/NP	0.80 d ± 0.08	46.33 f ± 3.81

a–f Statistical differences in the various columns are indicated by different letters ( $p < 0.05$ ). SKKr/R—unpasteurized sour cow whey with sea buckthorn juice; SSKr/R—unpasteurized sweet cow whey with sea buckthorn juice; SSK/R—unpasteurized sweet goat whey with sea buckthorn juice; SKK/R—unpasteurized sour goat whey with sea buckthorn juice; SKKr/DR—unpasteurized sour cow whey with rosehip juice; SSKr/DR—unpasteurized sweet cow whey with rosehip juice; SSK/DR—unpasteurized sweet goat whey with rosehip juice; SKK/DR—unpasteurized sour goat whey with rosehip juice; SSKr/NP—unpasteurized sweet cow whey; SKKr/NP—unpasteurized sour cow whey; SSK/NP—unpasteurized sweet goat whey; and SKK/NP—unpasteurized sour goat whey.

In terms of dynamic viscosity, the lowest value was reported for the SKK/R (2.50 mPas·g/cm<sup>3</sup>) blend containing sour goat whey and sea buckthorn juices and the highest one was shown in the control sample SKK/NP (46.33 mPas·g/cm<sup>3</sup>) manufactured with unpasteurized sour goat whey solely without any fruit juice (control sample). On average, all fermented whey beverages without juice showed a higher or not significantly different dynamic viscosity value compared with the same type of beverage with juice and a similar behavior could be distinguished for apparent viscosity. In almost all instances, the cow whey beverages had a lower apparent viscosity compared to other beverages. The variations in the viscosity and texture of the fermented whey beverages are significantly influenced by the composition of whey proteins and the production of exopolysaccharides (EPS) during fermentation. Whey protein hydrolysis by lactic acid bacteria and yeast strains leads to the release of bioactive peptides, enhancing the beverage's rheological properties and nutritional value. Additionally, certain strains produce EPS, improving viscosity, stability, and mouthfeel [30].

Fermentation has also been shown to enhance the bioactive properties of whey proteins. For instance, the process can increase angiotensin-I-converting enzyme (ACE) inhibitory activity, which is associated with antihypertensive effects, highlighting the functional benefits of fermentation [31]. Moreover, research on *Bacillus subtilis* fermentation has demonstrated the simultaneous production of polysaccharides and bioactive surfactin using rehydrated whey powder, further illustrating the multifunctionality of whey as a fermentation substrate [32]. On the other hand, the dynamic viscosity measurements showed a more pronounced change indicating that the addition of fruit juices, especially sea buckthorn and rosehip that are very rich in bioactive compounds (flavoring extracts), have a great impact in both increasing as well lowering viscosity. The addition of sea buckthorn juice generally resulted in higher dynamic viscosity values compared to rosehip juice. For instance, SKKr/DR (8.50 mPas·g/cm<sup>3</sup>) had a significantly lower dynamic viscosity than

SKKr/R ( $16.67 \text{ mPas}\cdot\text{g}/\text{cm}^3$ ), indicating that sea buckthorn juice might contribute more to the thickening of the beverage than rosehip juice. Increases in viscosity may be due to the solids and oil present in the sea buckthorn juice [22,33], which have a higher viscosity than rosehip juice [34], hence a higher viscosity of the whole beverage.

These findings are in line with other research on the rheological properties of fermented dairy products. In the literature, these findings are in accordance with those for the rheological properties of fermented dairy products. Its use has already been tested by León-López et al. [35], where a higher concentration of collagen increased the viscosity and this resulted in higher bioavailability. Also, whey beverages fortified with hydrolyzed collagen modified its viscosity significantly in a dose-dependent manner too. This is in agreement with the results observed in our study, where similar improvements of rheological properties were accomplished upon the addition of fruit juices, and function ingredients other than collagen and fruit juice are able to markedly manipulate the rheological characteristic of fermented beverages. Castro et al. [36] demonstrated that the viscosity and stability of whey-based drinks (more with higher concentrations of the byproduct) were significantly enhanced with oligofructose.

Additionally, Morell et al. [37] studied the influence of hydrocolloids on the texture and structure of yoghurt-type products. They reported that modified starches increase the viscosity and also enhanced the stability of dairy beverages. Moreover, the addition of the physically modified starch (PMS) offered an improved mouthfeel, smoothness, and viscous nature of the product. Such findings indicated the PMS gives potential rheological and sensory enhancers to fermented whey beverages.

Gomes et al. [13] compared fermented beverages from goat and cow milk in relation to their physicochemical and sensory attributes. The data obtained using a statistical analysis indicated that the beverages prepared from goat's milk showed higher viscosity and stability parameters compared to those elaborated with cow's milk. The differences were attributed to the fat and protein compositions of goat's milk, which lead to variations on the rheological characteristics in beverages. The addition of mixes with goat's and cow's milk also had a beneficial effect on the texture and stability of products, which even more enhanced the sensory and textural features preferred by consumer decision.

Moreover, the research by Novelina et al. [38] on the rheological properties of fermented beverages based on pumpkin showed that the addition of pumpkin juice had a significant ( $p < 0.05$ ) effect on the increase in viscosity.

Furthermore, Lobato-Calleros et al. [39] demonstrated that modified starch enhanced the rheological properties depending on fat reduction in yoghurts. The apparent viscosity of dairy products was improved with the help of an added starchy stabilizer. These findings would benefit the production of fermented whey beverages with reduced fat and thus, calories.

### 3.1.2. Viscoelastic Properties

The data in Table 3 shows the strong variations of viscoelasticity for different fermented whey beverages, which are also captured by the data. The storage ( $G'$ ) and loss ( $G''$ ) moduli values provide an assessment of the elastic response and viscous behavior, respectively.

Properties such as the storage modulus ( $G'$ ) and the loss modulus ( $G''$ ) are able to provide an overview of structural features, or the parameters linked to them, within beverages.  $G'$  is related to elasticity and stability against the deformation corresponding to turgidity, indicating the firmness [40]. Among all of the samples, a maximum  $G'$  value was recorded for the SKK/R sample exhibiting a mean value of 5.619 Pa. Conversely, the lowest  $G'$  value was obtained for the SKK/DR (0.062 Pa), indicating that the sample containing sour goat whey and rosehip juice had a significantly softer structure.

**Table 3.** Results of the storage ( $G'$ ) and loss ( $G''$ ) moduli ( $p < 0.05$ ) measurements of fermented whey beverages with the addition of various fruit juices at laboratory scale.

Fermented Whey Beverages	Storage Modulus ( $G'$ ) [Pa] $\pm$ SD	Loss Modulus ( $G''$ ) [Pa] $\pm$ SD
SKKr/R	1.364 f $\pm$ 0.069	4.344 j $\pm$ 0.078
SSKr/R	0.772 d $\pm$ 0.002	2.334 fg $\pm$ 0.002
SSK/R	4.076 h $\pm$ 0.006	4.924 h $\pm$ 0.001
SKK/R	5.619 j $\pm$ 0.128	1.554 e $\pm$ 0.079
SSKr/DR	3.568 g $\pm$ 0.153	3.824 h $\pm$ 0.246
SSK/DR	0.350 c $\pm$ 0.004	2.438 g $\pm$ 0.004
SKKr/DR	4.848 i $\pm$ 0.025	0.127 a $\pm$ 0.017
SKK/DR	0.062 a $\pm$ 0.004	4.124 i $\pm$ 0.005
SSKr/NP	0.158 b $\pm$ 0.016	0.576 d $\pm$ 0.032
SKKr/NP	0.040 a $\pm$ 0.022	0.280 b $\pm$ 0.024
SSK/NP	1.089 e $\pm$ 0.008	2.285 f $\pm$ 0.054
SKK/NP	0.104 a $\pm$ 0.017	0.436 c $\pm$ 0.021

a–j Statistical differences in the various columns are indicated by different letters ( $p < 0.05$ ); SKKr/R—unpasteurized sour cow whey with sea buckthorn juice; SSKr/R—unpasteurized sweet cow whey with sea buckthorn juice; SSK/R—unpasteurized sweet goat whey with sea buckthorn juice; SKK/R—unpasteurized sour goat whey with sea buckthorn juice; SKKr/DR—unpasteurized sour cow whey with rosehip juice; SSKr/DR—unpasteurized sweet cow whey with rosehip juice; SSK/DR—unpasteurized sweet goat whey with rosehip juice; SKK/DR—unpasteurized sour goat whey with rosehip juice; SSKr/NP—unpasteurized sweet cow whey; SKKr/NP—unpasteurized sour cow whey; SSK/NP—unpasteurized sweet goat whey; and SKK/NP—unpasteurized sour goat whey.

The significant variance was in the loss modulus ( $G''$ ) values among different samples, which exhibited the highest  $G''$  of 4.344 Pa and indicated that having a pronounced viscous component in the mouthfeel represented an important sensorial attribute for beverage perception and acceptance. On the other hand, the SKKr/DR sample showed the lowest value of  $G''$  (0.127 Pa), which means it had a slight viscous behavior.

These results are in agreement with other studies on the viscoelastic behavior of fermented whey beverages and dairy related products [41–43]. For instance, Cheong et al. [41] showed that viscoelastic properties of emulsions are strongly correlated with the stiffness and elasticity, which have been reported to be influenced by the concentration of whey protein and starch. Higher concentrations in systems provide greater stiffness and elastic behavior [40]. Similarly, Pushpadass et al. [42], who worked on milk-based beverages, demonstrated that viscoelastic measurements are significant in determining the structural integrity and sensory traits of fermented drinks, with a positive relation between  $G'$  and  $G''$  values against general textural attributes. Ciołkowska et al. [43] presented that the consistency and pseudoplastic behavior of the beverages, which are closely related to the values of  $G'$  and  $G''$ , were significantly increased by increasing the whey protein concentration.

### 3.2. Physicochemical Properties of the Obtained Fermented Whey Beverages

These beverages are recognized for their distinct physicochemical properties, including high protein content, organic acids, and probiotics, which contribute to their sensory and functional appeal [44]. The addition of fruit juices or plant extracts improves flavor and increases antioxidant content, enriching the beverages' nutritional profile [45]. The formation of bioactive peptides and organic acids during fermentation supports digestive and metabolic health [46], but we have avoided overstated claims to align with scientific responsibility. In its elaboration, the preparation method and production conditions generate an impact on the management of a drink.

### pH Measurement and Determination of Titratable Acidity

The pH and titratable acidity are the important parameters, which have some necessary impacts on the quality and stability of fermentative beverages. All of these properties are primarily affected by the fermentation process, and the type of whey and organic fruit juice. Table 4 presents the results of pH and titratable acidity for fermented whey beverages.

**Table 4.** Results of the pH and °SH measurements of fermented whey beverages with the addition of various fruit juices.

Fermented Drink	pH ± SD	Titratable Acidity [°SH] ± SD
SKKr/R	3.90 g ± 0.01	116.25 j ± 1.25
SSKr/R	3.98 h ± 0.02	135.00 l ± 1.25
SSK/R	3.84 f ± 0.01	109.58 i ± 0.72
SKK/R	3.82 e ± 0.01	127.08 k ± 0.72
SSKr/DR	2.91 a ± 0.01	79.58 h ± 0.72
SSK/DR	2.98 b ± 0.01	62.92 e ± 0.72
SKKr/DR	3.09 c ± 0.01	58.75 d ± 1.25
SKK/DR	2.90 a ± 0.01	71.67 f ± 1.91
SSKr/NP	4.19 i ± 0.01	24.65 b ± 0.35
SKKr/NP	3.60 d ± 0.00	52.63 c ± 0.09
SSK/NP	4.31 j ± 0.02	21.00 a ± 0.00
SKK/NP	3.61 d ± 0.01	76.00 g ± 0.82

a–l Statistical differences in the various columns are indicated by different letters ( $p < 0.05$ ). SKKr/R—unpasteurized sour cow whey with sea buckthorn juice; SSKr/R—unpasteurized sweet cow whey with sea buckthorn juice; SSK/R—unpasteurized sweet goat whey with sea buckthorn juice; SKK/R—unpasteurized sour goat whey with sea buckthorn juice; SKKr/DR—unpasteurized sour cow whey with rosehip juice; SSKr/DR—unpasteurized sweet cow whey with rosehip juice; SSK/DR—unpasteurized sweet goat whey with rosehip juice; SKK/DR—unpasteurized sour goat whey with rosehip juice; SSKr/NP—unpasteurized sweet cow whey; SKKr/NP—unpasteurized sour cow whey; SSK/NP—unpasteurized sweet goat whey; and SKK/NP—unpasteurized sour goat whey.

The pH of the fermented beverages were different, according to the whey and fruit juice used. Here, the pH values (between 2.90 and 4.31) represent acidities of beverages. These values satisfy the pH requirement for a dairy fermented drink that is 4.6 or below [41]. Beverages with sour goat whey and rosehip juice (SKK/DR) had the lowest pH value (pH 2.90). The highest pH value has been registered, on the other hand, in the SSK/NP product (4.31), which was comprised of the non-pasteurized sweet goat whey with no addition of any fruit juice (control sample). Such an outcome was expected since sour whey is produced during the making of acid cheeses with an acidic starter culture, while sweet whey is a by-product of rennet cheese-making where no acidification occurs [39,47,48].

The higher pH suggests a lower level of acidity, characteristic of sweet whey. This is an increased acidity, which is the characteristic of sour whey and rosehip juice in general. These data are in alignment with previous findings, highlighting the influence of fruit juice addition on beverage quality, as found by Tomovska et al. [49]—in milk fermentation with *Lactobacillus* strains, pH reduction was also observed with lactic acid production, increasing the acidity of the final product. According to Cheong et al. [41], the addition of acidic fruit juices containing soursop to whey protein isolate emulsions also decreased the pH values and the degree of acidity.

The titratable acidity, expressed in Soxhlet–Henkel degrees (°SH), provides a measure of the total acid content in the beverages. Soxhlet–Henkel degrees (°SH) represent the total titratable acidity, which in whey-based fermented beverages reflects the presence of organic acids formed during fermentation and the release of free fatty acids (FFA) through

enzymatic activity. Fermentation processes and the selection of starter cultures significantly influence FFA levels. For example, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* is known to produce higher levels of FFAs, enhancing the sensory and functional properties of whey-based products [50]. Furthermore, recent research highlights that controlled enzymatic activity, such as the use of walnut lipase, can increase conjugated linoleic acid (CLA) content, offering the potential for optimizing whey beverages [51]. The results indicated a wide range of titratable acidity values, from 21.00 °SH in the SSK/NP sample to 135.00 °SH in the SSKr/R sample. The SKKr/R sample, which used unpasteurized sour cow whey with sea buckthorn juice, exhibited high acidity levels, while the SSK/NP sample, with unpasteurized sweet goat whey without fruit juice, exhibited the lowest acidity levels. According to the Polish norm PN-A-86061:2002 [24], the acidity of fermented milk beverages ranges from 25 °SH to 45 °SH. In this study, every drink exceeds this reference except for SSK/NP (21.00 °SH) and SSKr/NP (24.65 °SH) (control samples). The reason might be that we used the least favorable environment for the starter culture to grow. The elevated °SH values are most likely due to the addition of very acidic fruit juices.

The significant variation in titratable acidity among the samples highlighted the influence of both whey types and the addition of fruit juices. For instance, sea buckthorn juice, known for its high vitamin C and organic acid content, contributed to the higher acidity in the SSKr/R sample. In contrast, the lower acidity in the SSK/NP sample suggests that the absence of fruit juice resulted in a less acidic beverage.

The decreased titratable acidity of these controls may have indicated that the lowest pH was relatively less favorable to initiate a starter culture, possibly because it had little fruit juice and live cultures and the specific whey characteristics could be relevant. This is consistent with previous research indicating that non-fruit-free beverages have low acidity, possibly because fruit acids contribute to rich microbial activities and metabolic process fermentations. In addition, products containing fruit juice ferment to a higher acid over time due to the fermenting bacteria like *Lactobacillus acidophilus* [52].

Higher values for the °SH obtained in other samples could mainly be attributed to the addition of sour fruit juices (sea buckthorn and wild rosehip), which considerably increased the overall acidity. The increase in titratable acidity by the addition of pomegranate or passion fruit juices during storage is likely due to water stress effects, as was observed in similar studies [53]. However, the use of passion fruit flavors in whey-based beverages seems to increase the titratable acidity level up to 0.73%, which resulted in a unique flavor and seemingly consumer acceptance [54]. Acidic fruit juices, especially the utilization of sea buckthorn, could possibly lead to a similar increase in the titratable acidity, as can be observed with samples such as SKKr/R, which further emphasizes on the potential use of acidic additives to enhance the palatability and preservation of whey beverages by virtue of its microbial safety and sensory traits [55].

In general, the results obtained present the positive influence of fruit juices on creating a desirable sensory value in whey-based beverages and determine the titratable acidity that is necessary for safety and consumer acceptance [53,56].

### 3.3. Microbiological Properties of the Obtained Fermented Whey Beverages

The microbiological quality of fermented whey beverages represents a fundamental aspect, which must be kept in control to provide safe and acceptable final products. The presence of pathogens such as *Escherichia coli*, *Enterobacteriaceae*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. is one of the main safety hazards regarding fermented products, especially those produced in large scale. The results of microbiological analyzes performed on the fermented whey beverages supplemented with different fruit juices are in Table 5.

**Table 5.** The amount of bacteria found in fermented whey beverages with the addition of various fruit juices.

Fermented Whey Beverage	Microorganisms	Unit	Methodology	Result
SKKr/R	Count of $\beta$ -glucuronidase-positive <i>Escherichia coli</i>	CFU/g	PN-ISO 16649-2:2004 [29]	<1.0 $\times 10^1$
SSKr/R				<1.0 $\times 10^1$
SSK/R				<4.0 $\times 10^1$
SKK/R				<1.0 $\times 10^1$
SSKr/DR				<1.0 $\times 10^1$
SSK/DR				8.0 $\times 10^1$
SKKr/DR				<1.0 $\times 10^1$
SKK/DR				<1.0 $\times 10^1$
SSKr/NP				<1.0 $\times 10^1$
SKKr/NP				<1.0 $\times 10^1$
SSK/NP.				<1.0 $\times 10^1$
SKK/NP.				<1.0 $\times 10^1$
SKKr/R	<i>Enterobacteriaceae</i> count	CFU/g	PN-ISO 21528-2:2017-08 [28]	<1.0 $\times 10^1$
SSKr/R				<1.0 $\times 10^1$
SSK/R				<4.0 $\times 10^1$
SKK/R				<1.0 $\times 10^1$
SSKr/DR				<4.0 $\times 10^1$
SSK/DR				1.5 $\times 10^2$
SKKr/DR				<1.0 $\times 10^1$
SKK/DR				<1.0 $\times 10^1$
SSKr/NP.				<1.0 $\times 10^1$
SKKr/NP.				<1.0 $\times 10^1$
SSK/NP.				<1.0 $\times 10^1$
SKK/NP.				<1.0 $\times 10^1$
SKKr/R	Coagulase-positive staphylococci count ( <i>Staphylococcus aureus</i> and other species)	CFU/g	PN-EN ISO 6888-2:2001 /A1:2004 [27]	<1.0 $\times 10^1$
SSKr/R				<1.0 $\times 10^1$
SSK/R				<1.0 $\times 10^1$
SKK/R				<1.0 $\times 10^1$
SSKr/DR				<1.0 $\times 10^1$
SSK/DR				<1.0 $\times 10^1$
SKKr/DR				<1.0 $\times 10^1$
SKK/DR				<1.0 $\times 10^1$
SSKr/NP				<1.0 $\times 10^1$
SKKr/NP				<1.0 $\times 10^1$
SSK/NP				<1.0 $\times 10^1$
SKK/NP				<1.0 $\times 10^1$

Table 5. Cont.

Fermented Whey Beverage	Microorganisms	Unit	Methodology	Result
SKKr/R	Count of <i>Listeria monocytogenes</i>	CFU/g	PN-EN ISO 11290-2:2017-07 [25]	$<1.0 \times 10^1$
SSKr/R				$<1.0 \times 10^1$
SSK/R				$<1.0 \times 10^1$
SKK/R				$<1.0 \times 10^1$
SSKr/DR				$<1.0 \times 10^1$
SSK/DR				$<1.0 \times 10^1$
SKKr/DR				$<1.0 \times 10^1$
SKK/DR				$<1.0 \times 10^1$
SSKr/NP				$<1.0 \times 10^1$
SKKr/NP				$<1.0 \times 10^1$
SSK/NP.				$<1.0 \times 10^1$
SKK/NP.				$<1.0 \times 10^1$
SKKr/R	Presence of <i>Salmonella</i> spp.	25 g	PN-EN ISO 6579-1:2017-04/A1:2020-09 [26]	Not detected in 25 g
SSKr/R				Not detected in 25 g
SSK/R				Not detected in 25 g
SKK/R				Not detected in 25 g
SSKr/DR				Not detected in 25 g
SSK/DR				Not detected in 25 g
SKKr/DR				Not detected in 25 g
SKK/DR				Not detected in 25 g
SSKr/NP				Not detected in 25 g
SKKr/NP				Not detected in 25 g
SSK/NP				Not detected in 25 g
SKK/NP				Not detected in 25 g

SKKr/R—unpasteurized sour cow whey with sea buckthorn juice; SSKr/R—unpasteurized sweet cow whey with sea buckthorn juice; SSK/R—unpasteurized sweet goat whey with sea buckthorn juice; SKK/R—unpasteurized sour goat whey with sea buckthorn juice; SKKr/DR—unpasteurized sour cow whey with rosehip juice; SSKr/DR—unpasteurized sweet cow whey with rosehip juice; SSK/DR—unpasteurized sweet goat whey with rosehip juice; SKK/DR—unpasteurized sour goat whey with rosehip juice; SSKr/NP—unpasteurized sweet cow whey; SKKr/NP—unpasteurized sour cow whey; SSK/NP—unpasteurized sweet goat whey; and SKK/NP—unpasteurized sour goat whey.

### 3.4. *Escherichia coli* Positive to $\beta$ -Glucuronidase

The number of  $\beta$ -glucuronidase-positive *Escherichia coli* in the samples, closely related to fecal coliforms, was generally lower than  $1.0 \times 10^1$  CFU/g and only sample SSK/DR presented a value higher than this level ( $8.0 \times 10^1$  CFU/g). The low prevalence of *E. coli* is indicative of an efficient process control as well as of the fermentation bacteria typical from traditional lactic acid fermentations and the addition of organic fruit juices, which may have acted synergistically, inhibiting pathogen growth.

According to several studies, the addition of fruit juices inhibits the propagation of *E. coli*, suggesting an easy and additive-free way of keeping whey beverages safe. The addition of date juice reduced the counts of *Escherichia coli* in fermented whey beverages and caused an increase in antimicrobial activity as was reported by Negara et al. [57].

Furthermore, Qian et al. [58] showed that the mixture of whey protein and blueberry juice was identified as a significant inhibitor against *E. coli* during storage.

The results comply with the microbiological safety standards established by PN-ISO 16649-2:2004 [29].

### 3.5. Enterobacteriaceae Count

The count of Enterobacteriaceae was similarly low, with most samples recording values below  $1.0 \times 10^1$  CFU/g. However, the SSK/DR sample showed a slightly higher count of  $1.5 \times 10^2$  CFU/g, suggesting that specific formulations may have a higher susceptibility to contamination by this family of bacteria. Research supports the idea that fermentation processes effectively reduce Enterobacteriaceae populations in fermented whey beverages [59].

The results were validated using PN-ISO 21528-2:2017-08 [28].

### 3.6. Coagulase-Positive Staphylococci (*Staphylococcus aureus* and Other Species)

All of the tested samples had coagulase-positive *Staphylococcus* counts below  $1.0 \times 10^1$  CFU/g, indicating that the production process minimized contamination by these potentially harmful bacteria. Moreover, research by Kar and Misra [60] demonstrated that adding bioactive ingredients can further help in minimizing the *Staphylococcus aureus* contamination in dairy products.

The analysis followed PN-EN ISO 6888-2:2001/A1:2004 [27].

### 3.7. *Listeria monocytogenes* Count

The count of *Listeria monocytogenes* was also low across all samples, with values below  $1.0 \times 10^1$  CFU/g. This suggests that fermentation and the use of antimicrobial fruit juices contributed to inhibiting *Listeria monocytogenes* growth, a finding consistent with previous studies on lactic acid bacteria [59].

The analysis followed PN-EN ISO 11290-2:2017-07 [25], confirming the microbiological safety of the fermented whey beverages.

### 3.8. Presence of *Salmonella* spp.

No *Salmonella* spp. was detected in any of the tested samples, further ensuring the microbiological safety of the products. The absence of *Salmonella* is critical for the acceptability of fermented dairy beverages, as contamination with this pathogen is a significant food safety concern. The results were verified using PN-EN ISO 6579-1:2017-04/A1:2020-09 [26].

Additionally, previous studies have demonstrated that certain fruit juices can improve the microbiological safety of fermented beverages by inhibiting the growth of pathogens like *Escherichia coli* and *Salmonella* spp. [59].

## 4. Conclusions

Processing whey on site provides the ideal solution, particularly for small farms and plants where transport to and processing at a processing facility is cost prohibitive. This not only helps to reduce waste in cheese manufacturing, where whey is a by-product—but it also promotes sustainability. The goal of this study was to manufacture organic fermented whey beverages enriched with the organic fruit juices sea buckthorn or rosehip. Utilizing whey from both cow's and goat's milk, obtained as by-products from the production of curd and aged cheeses, we developed a technology to produce beverages using both unpasteurized sweet or sour whey. The addition of organic fruit juices (sea buckthorn or rosehip juice) improved the physicochemical (higher acidity), and rheological (lower viscosity) properties. Microbiological safety was ensured, with low levels of pathogenic

microorganisms detected. All of the tested beverages had a pH lower than 4.6, which is required for fermented dairy beverages. The viscosity of all the fermented beverages was lower than the control samples, as required for such beverages. The incorporation of organically derived fruit juices including sea buckthorn and rosehip has considerable impact in terms of properties, giving the opportunity to modulate beverages rheological properties and mouthfeel, which can lead to consumer satisfaction while optimizing their functional food status. The pH and titratable acidity values offer evidence on the physicochemical characteristics of fermented whey beverages. The fermented whey beverages produced in the present study were fully microbiologically characterized to ensure that they are safe when consumed and effective as a functional food. The results highlighted the need for careful ingredient selection when designing functional dairy beverages with appealing rheological properties and consumer acceptance. The results of this study showed that the manufactured fermented whey beverages have a potential utilization as new products containing fruit juices, that could provide consumers with pleasure and healthful properties when compared to conventional drinks. This line of stock is prepared in response to an increased demand on the part of the consumer for functional foods that provide health benefits beyond basic nutrition. In addition to that, the use of whey output from the production of ripened or cottage cheese makes the most economic and environmentally friendly option. The program would be in line with the destinations of the European Green Deal by helping sustainable production, and the creation of new, health-friendly foodstuffs.

The authors suggest further research on interaction effects between the type of whey and the addition of fruit juice in determining the physicochemical properties mentioned in this study.

**Author Contributions:** M.B.: writing—original draft preparation, conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, resources, data curation, visualization; R.W.: investigation, data curation, visualization; B.G.S.: writing—review and editing, conceptualization, software, methodology, validation, formal analysis, data curation, supervision, project administration, funding acquisition. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This work was financially supported by the grants of the Ministry of Science and Higher Education in Poland (grant number DWD/6/0210/2022: “Implementation doctorate” and grant number MEiN/2023/DPI/2862: “Research network of life sciences universities for the development of the Polish dairy sector—research project”).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors on request.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Perumal, A.K.; Chunduri, J. Characterization and development of Novel Whey-based Fermented Fruit Beverages. *Int. J. Agric. Sci. Vet. Med.* **2023**, *11*, 184–192. [[CrossRef](#)]
2. Argan, B.E.; Güneşer, O.; Toklucu, A.K.; Yüceer, Y. Production of Whey Powder Added Fruit Beverages and Some Quality Characteristics. *Turk. J. Agric. Food Sci. Technol.* **2015**, *3*, 651–658. [[CrossRef](#)]
3. Wang, H.; Wang, C.-J.; Guo, M.R. Effects of addition of strawberry juice pre- or postfermentation on physiochemical and sensory properties of fermented goat milk. *J. Dairy Sci.* **2019**, *102*, 4765–4774. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Kolotiy, T.B.; Kovalenko, Z. Drinks based on milk whey using fruit syrup from wild plants. *New Technol.* **2021**, *17*, 33–39. [[CrossRef](#)]

5. Kadyan, S.; Rashmi, H.M.; Pradhan, D.; Kumari, A.; Chaudhari, A.; Deshwal, G.K. Effect of lactic acid bacteria and yeast fermentation on antimicrobial, antioxidative and metabolomic profile of naturally carbonated probiotic whey drink. *LWT* **2021**, *145*, 111059. [\[CrossRef\]](#)
6. Sionek, B.; Szydłowska, A.; Küçüköz, K.; Kołozyn-Krajewska, D. Traditional and New Microorganisms in Lactic Acid Fermentation of Food. *Fermentation* **2023**, *9*, 1019. [\[CrossRef\]](#)
7. Verardo, V.; Gómez-Caravaca, A.; Tabanelli, G. Bioactive Components in Fermented Foods and Food By-Products. *Foods* **2020**, *9*, 153. [\[CrossRef\]](#)
8. Yigit, A.; Bielska, P.; Cais-Sokolinska, D.; Samur, G. Whey proteins as a functional food: Health effects, functional properties, and applications in food. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2023**, *42*, 758–768. [\[CrossRef\]](#)
9. Gorachiya, P.; Bais, B.; Kumar, D.; Singh, S. Study of Formulation, Sensory Evaluation and Microbiological Study of Whey Beverage from Camel and Buffalo Milk. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* **2018**, *7*, 2758–2765. [\[CrossRef\]](#)
10. Królczyk, J.; Dawidziuk, T.; Janiszewska-Turak, E.; Sołowiej, B. Use of Whey and Whey Preparations in the Food Industry—A Review. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* **2016**, *66*, 21–29. [\[CrossRef\]](#)
11. Darewicz, M.; Dziuba, B.; Minkiewicz, P.; Dziuba, J. The preventive potential of milk and colostrum proteins and protein fragments. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2011**, *51*, 375–389. [\[CrossRef\]](#)
12. Leboffe, L.; Giansanti, F.; Antonini, G. Antifungal and antiparasitic activities of lactoferrin. *Protein Pept. Lett.* **2009**, *16*, 930–939. [\[CrossRef\]](#)
13. Gomes, J.J.L.; Duarte, A.M.; Batista, A.; Figueirêdo, R.M.F.; Sousa, E.P.; Souza, E.L.; Queiroga, R. Physicochemical and sensory properties of fermented dairy beverages made with goat's milk, cow's milk, and a mixture of the two milks. *LWT-Food Sci./Technol.* **2013**, *54*, 18–24. [\[CrossRef\]](#)
14. Biadała, A.; Szablewski, T.; Cegielska-Radziejewska, R.; Lasik-Kurdys, M.; Adzahan, N.M. The Evaluation of Activity of Selected Lactic Acid Bacteria for Bioconversion of Milk and Whey from Goat Milk to Release Biomolecules with Antibacterial Activity. *Molecules* **2023**, *28*, 3696. [\[CrossRef\]](#)
15. Rosa, L.; Santos, M.L.; Abreu, J.; Rocha, R.; Esmerino, E.; Freitas, M.Q.; Mársico, E.; Campelo, P.; Pimentel, T.C.; Silva, M.C.; et al. Probiotic fermented whey-milk beverages: Effect of different probiotic strains on the physicochemical characteristics, biological activity, and bioactive peptides. *Food Res. Int.* **2022**, *164*, 112396. [\[CrossRef\]](#)
16. Karczmarz, K.; Szmagara, A.; Stefaniak, E.A. Ellagic acid content in selected wild species of fruit roses. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2019**, *18*, 131–140. [\[CrossRef\]](#)
17. Nowak, D.; Gośliński, M.; Kłębukowska, L. Antioxidant and antimicrobial properties of selected fruit juices. *Plant Foods Hum. Nutr.* **2022**, *77*, 427–435. [\[CrossRef\]](#)
18. Yang, B.; Kallio, H. Composition and physiological effects of sea buckthorn (*Hippophae*) lipids. *Trends Food Sci. Technol.* **2002**, *13*, 160–167. [\[CrossRef\]](#)
19. Geetha, S.; Ram, M.S.; Mongia, S.S.; Singh, V.; Ilavazhagan, G.; Sawhney, R.C. Evaluation of antioxidant activity of leaf extract of Seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) on chromium (VI) induced oxidative stress in albino rats. *J. Ethnopharmacol.* **2003**, *87*, 247–251. [\[CrossRef\]](#)
20. Çınar, I.; Çolakoglu, A.S. Potential Health Benefits of Rose Hip Products. *Acta Hort.* **2005**, *690*, 251–257. [\[CrossRef\]](#)
21. Patel, S. Rose hip as an underutilized functional food: Evidence-based review. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, *63*, 62–69. [\[CrossRef\]](#)
22. Dong, K.; Fernando, W.M.A.D.B.; Durham, R.; Stockmann, R.; Jayasena, V. Nutritional Value, Health-Promoting Benefits and Food Application of Sea Buckthorn. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2021**, *61*, 2122–2137. [\[CrossRef\]](#)
23. Gätlan, A.-M.; Gutt, G. Sea Buckthorn in Plant-Based Diets. An Analytical Approach of Sea Buckthorn Fruits Composition: Nutritional Value, Applications, and Health Benefits. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 8986. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
24. PN-A-86061:2002; Mleko i Przetwory Mleczne—Mleko Fermentowane. PKN: Warsaw, Poland, 2002.
25. PN-EN ISO 11290-2:2017-07; Mikrobiologia Łańcucha Żywnościowego—Horyzontalna Metoda Wykrywania i Oznaczania Liczby *Listeria monocytogenes* i Innych *Listeria* spp.—Cześć 2: Metoda Oznaczania Liczby. PKN: Warsaw, Poland, 2017.
26. PN-EN ISO 6579-1:2017-04/A1:2020-09; Mikrobiologia Łańcucha Żywnościowego—Horyzontalna Metoda Wykrywania, Oznaczania Liczby i Serotypowania *Salmonella*—Cześć 1: Wykrywanie *Salmonella* spp. PKN: Warsaw, Poland, 2020.
27. PN-EN ISO 6888-2:2001/A1:2004; Mikrobiologia Żywności i Pasz—Horyzontalna Metoda Oznaczania Liczby Gronkowców Koagulazo-Dodatnich (*Staphylococcus aureus* i Innych Gatunków)—Cześć 2: Metoda z Zastosowaniem Pożywki Agarowej z Plazma Królicza i Fibryngenem. PKN: Warsaw, Poland, 2004.
28. PN-EN ISO 21528-2:2017-08; Mikrobiologia Łańcucha Żywnościowego—Horyzontalna Metoda Wykrywania i Oznaczania Liczby Enterobacteriaceae—Cześć 2: Metoda Liczenia Kolonii. PKN: Warsaw, Poland, 2017.
29. PN-ISO 16649-2:2004; Mikrobiologia Żywności i Pasz—Horyzontalna Metoda Oznaczania Liczby Beta-Glukuronidazo-Dodatnich *Escherichia coli*—Cześć 2: Metoda Płytkowa w Temperaturze 44 °C z Zastosowaniem 5-Bromo-4-Chloro-3-Indolilo Beta-D-Glukuronidu. PKN: Warsaw, Poland, 2004.


30. Pescuma, M.; Font de Valdez, G.; Mozzi, F. Whey-derived valuable products obtained by microbial fermentation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2015**, *99*, 6183–6196. [[CrossRef](#)]
31. Vermeirssen, V.; Van Camp, J.; Decroos, K.; Van Wijmelbeke, L.; Verstraete, W. The Impact of Fermentation and In Vitro Digestion on the Formation of Angiotensin-I-Converting Enzyme Inhibitory Activity from Pea and Whey Protein. *J. Dairy Sci.* **2003**, *86*, 2267–2274. [[CrossRef](#)]
32. Cagri-Mehmetoglu, A.; Kusakli, S.; van de Venter, M. Production of Polysaccharide and Surfactin by *Bacillus subtilis* ATCC 6633 Using Rehydrated Whey Powder as the Fermentation Medium. *J. Dairy Sci.* **2012**, *95*, 7038–7044. [[CrossRef](#)]
33. Oomah, B.D.; Séry, G.; Godfrey, D.V.; Beveridge, T.H. Rheology of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) juice. *J. Agric. Food Chem.* **1999**, *47*, 3546–3550. [[CrossRef](#)]
34. Saricaoglu, F.T.; Atalar, I.; Yilmaz, V.A.; Odabas, H.I.; Gul, O. Application of multi pass high pressure homogenization to improve stability, physical and bioactive properties of rosehip (*Rosa canina* L.) nectar. *Food Chem.* **2019**, *282*, 67–75. [[CrossRef](#)]
35. León-López, A.; Pérez-Marroquín, X.A.; Campos-Lozada, G.; Campos-Montiel, R.; Aguirre-Álvarez, G. Characterization of Whey-Based Fermented Beverages Supplemented with Hydrolyzed Collagen: Antioxidant Activity and Bioavailability. *Foods* **2020**, *9*, 1106. [[CrossRef](#)]
36. Castro, W.F.; Cruz, A.G.; Bisinotto, M.S.; Guerreiro, L.M.R.; Faria, J.A.F.; Bolini, H.M.A.; Cunha, R.L.; Deliza, R. Development of probiotic dairy beverages: Rheological properties and application of mathematical models in sensory evaluation. *J. Dairy Sci.* **2013**, *96*, 16–25. [[CrossRef](#)]
37. Morell, P.; Hernando, I.; Llorca, E.; Fiszman, S.M. Modification of textural and structural properties of yoghurt and yoghurt-like products with the addition of hydrocolloids: A review. *Food Res. Inter.* **2015**, *72*, 62–72. [[CrossRef](#)]
38. Novelina, N.; Nazir, N.; Fiana, R.M.; Yarni, D.F. Characteristics of Pumpkin (*Cucurbita moschata*) Fermented Beverage Products with the Addition of a Powder Milk Mixture. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2020**, *515*, 012054. [[CrossRef](#)]
39. Lobato-Calleros, C.; Rodriguez, E.; Sandoval-Castilla, O.; Perez-Alonso, C.; Vernon-Carter, E.J. Effect of modified starch and carrageenan on the rheological properties of reduced-fat stirred yogurt. *J. Food Eng.* **2014**, *89*, 201–207. [[CrossRef](#)]
40. Almdal, K.; Dyre, J.; Hvidt, S.; Kramer, O. Towards a phenomenological definition of the term ‘gel’. *Polym. Gels Netw.* **1993**, *1*, 5–17. [[CrossRef](#)]
41. Cheong, K.W.; Mirhosseini, H.; Leong, W.F.; Hamid, N.S.A.; Osman, A.; Basri, M.; Tan, C.P. Rheological Properties of Modified Starch-Whey Protein Isolate Stabilized Soursop Beverage Emulsion Systems. *Food Bioprocess Technol.* **2015**, *8*, 1490–1503. [[CrossRef](#)]
42. Pushpadass, H.A.; Emerald, F.M.; Balasubramanyam, B.V.; Patel, S.S. Rheological Properties of Milk-Based Beverages. In *Milk-Based Beverages*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 373–377. [[CrossRef](#)]
43. Ciołkowska, A.; Gustaw, W.; Skrzypczak, K.; Sołowiej, B.; Sławińska, A. Właściwości reologiczne modelowych napojów fermentowanych otrzymanych z wybranych preparatów białek serwatkowych z dodatkiem inuliny. *Zywnosć. Nauka. Technologia. Jakość.* **2016**, *4*, 92–101. [[CrossRef](#)]
44. Bandara, T.A.; Munasinghe-Arachchige, S.P.; Gamlath, C.J. Fermented whey beverages: A review of process fundamentals, recent developments, and nutritional potential. *Int. J. Dairy Technol.* **2023**, *76*, 123–135. [[CrossRef](#)]
45. Kanchana, N.; Veeranan Arun, G.V.; Vijayalakshmi, R. Development and evaluation of whey-based herbal beverages as health drinks. *Madras Agric. J.* **2020**, *107*, 1–4. [[CrossRef](#)]
46. Bulatović, M.; Krunic, T.; Vukašinović-Šekulić, M.; Zarić, D.; Rakin, M. Quality attributes of a fermented whey-based beverage enriched with milk and a probiotic strain. *RSC Adv.* **2014**, *4*, 49094–49100. [[CrossRef](#)]
47. Kayihura, J.F.; Huppertz, T.; Vasiljevic, T. Application of small amplitude oscillatory rheology measurements for estimating residual rennet activity in rennet whey. *Int. Dairy J.* **2022**, *134*, 105451. [[CrossRef](#)]
48. Aranda-Jaramillo, B.; León-Becerril, E.; Aguilar-Juárez, O.; Castro-Muñoz, R.; García-Depraect, O. Feasibility study of biohydrogen production from acid cheese whey via lactate-driven dark fermentation. *Fermentation* **2023**, *9*, 644. [[CrossRef](#)]
49. Tomovska, J.; Gjorgievski, N.; Makarijoski, B. Examination of pH, Titratable Acidity, and Antioxidant Activity in Fermented Milk. *J. Mater. Sci. Eng.* **2016**, *6*, 326–333. [[CrossRef](#)]
50. Tomaino, R.; Parker, J.; Larick, D. Analysis of free fatty acids in whey products by solid-phase microextraction. *J. Agric. Food Chem.* **2001**, *49*, 2519–2525. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
51. Moslemi, M.; Moayedi, A.; Khomeiri, M.; Maghsoudlou, Y. Development of a whey-based beverage with enhanced levels of conjugated linoleic acid (CLA) as facilitated by endogenous walnut lipase. *Food Chem. X* **2022**, *14*, 100547. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Skryplonek, K.; Dmytrów, I.; Mituniewicz-Małek, A. Probiotic fermented beverages based on acid whey. *J. Dairy Sci.* **2019**, *102*, 7689–7699. [[CrossRef](#)]
53. Maheswarlu, M.; Anitha, L.; Sucharitha, K.; Leelavathi, M. Qualitative changes in whey based pomegranate (*Punica granatum*) beverage during storage period. *Int. J. Agric. Sci.* **2010**, *11*, 28–35.
54. Gimhani, K.; Liyanage, A. Development and quality evaluation of ready to drink fruit flavoured whey beverage. *Int. J. Sci. Res. Publ.* **2019**, *9*, 107–113. [[CrossRef](#)]

55. Rivero, R.C.; Morel, C.; Sosa, N. Development of a Beverage Based on Citric Juice with the Addition of Whey. *Braz. J. Food Technol.* **2020**, *23*, e2018191. [[CrossRef](#)]
56. Emmons, D.; Beckett, D.C. Effect of gas-producing cultures on titratable acidity and pH in making cottage cheese. *J. Dairy Sci.* **1984**, *67*, 2195–2202. [[CrossRef](#)]
57. Negara, J.K.; Arifin, M.; Taufik, E.; Suryati, T. Penambahan Sari Kurma sebagai Substrat Antibakteri pada Minuman Whey Fermentasi. *J. Ilmu Produksi Dan Teknol. Has. Peternak.* **2021**, *9*, 36–41. [[CrossRef](#)]
58. Qian, Y.; Lu, G.; Wang, W.; Tang, C.C.; Gu, R. The Mechanism of Whey Protein and Blueberry Juice Mixed System Fermented with *Lactobacillus* Inhibiting *Escherichia coli* During Storage. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 33888. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
59. Jitpakdee, J.; Kantachote, D.; Kanzaki, H.; Nitoda, T. Potential of Lactic Acid Bacteria to Produce Functional Fermented Whey Beverage with Putative Health Promoting Attributes. *LWT—Food Sci. Technol.* **2022**, *160*, 113269. [[CrossRef](#)]
60. Kar, T.; Misra, A. Therapeutic Properties of Whey Used as Fermented Drink. *Rev. Microbiol.* **1999**, *30*, 151–155. [[CrossRef](#)]

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

## Article

# Assessment of Fatty Acid Profile, Mineral Composition, and Antioxidant Activity of Fermented Whey Beverages from Organic Cow and Goat Whey with the Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices

Maciej Barton<sup>1</sup>, Anna Stepiñowska<sup>2</sup>, Katarzyna Ognik<sup>2</sup>  and Bartosz G. Sołowiej<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Dairy Technology and Functional Foods, Faculty of Food Sciences and Biotechnology, University of Life Sciences in Lublin, Skromna 8, 20-704 Lublin, Poland; maciej.barton@up.edu.pl

<sup>2</sup> Department of Biochemistry and Toxicology, Faculty of Animal Sciences and Bioeconomy, University of Life Sciences in Lublin, Akademicka 13, 20-950 Lublin, Poland; anna.stepniowska@up.edu.pl (A.S.); katarzyna.ognik@up.edu.pl (K.O.)

\* Correspondence: bartosz.solowiej@up.edu.pl

## Abstract

This study examined the chemical composition and functional properties of fermented whey beverages produced from organic cow and goat whey, including both acid and sweet variants, enriched with organic sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) or rosehip (*Rosa canina*) juices. In contrast to earlier research primarily addressing physicochemical and technological aspects, the present work offers a comprehensive evaluation of fatty acid composition, mineral and trace element content, antioxidant activity, and total polyphenol levels in these beverage formulations. Both the type of whey and the fruit additive significantly influenced the compositional profile and antioxidant capacity of the beverages. Samples fortified with rosehip demonstrated the highest antioxidant potential, as evidenced by enhanced DPPH radical scavenging activity, elevated FRAP values, and increased total polyphenol content. In comparison, beverages enriched with sea buckthorn juice exhibited higher concentrations of selected minerals, particularly Fe and Ni, while maintaining toxic element levels within permissible limits. The fatty acid profile was predominantly composed of saturated fatty acids, notably C16:0, along with short-chain fatty acids typical of whey. Beverages derived from goat whey contained higher levels of SFA and MUFA than those produced from cow whey, whereas the addition of rosehip contributed to increased proportions of PUFA and omega-3 fatty acids. Collectively, these findings indicate that organic fermented whey beverages enriched with rosehip or sea buckthorn juice may serve as promising functional products with enhanced antioxidant properties and favorable mineral and fatty acid profiles.



Academic Editors: Svetlana Simova and Dessislava Gerginova

Received: 4 April 2026

Revised: 19 May 2026

Accepted: 28 May 2026

Published: 1 June 2026

**Copyright:** © 2026 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\) license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**Keywords:** fermented whey beverages; polyphenols; minerals and trace elements; fatty acid methyl esters; functional foods

## 1. Introduction

Fermented dairy beverages have attracted growing scientific and industrial interest in recent years because of their functional potential, bioactive properties, and relevance to sustainable food production and circular economy principles [1–5]. Among various substrates used for their manufacture, whey—a by-product of cheese production—remains an underutilized yet valuable material rich in high-quality proteins, bioactive peptides,

essential amino acids, lactose, and minerals [1–3]. Utilizing whey in the form of fermented beverages may help reduce environmental burdens associated with whey disposal while expanding the portfolio of functional products within the dairy industry [1,5–7]. Organic cow and goat whey are particularly attractive raw materials for minimally processed beverage formulations produced without synthetic additives. Goat whey, characterized by higher concentrations of short- and medium-chain fatty acids, exhibits superior digestibility, faster energy release, and distinct sensory and nutritional properties compared with cow whey [2,3]. Recent advances in functional beverage development have focused on enriching dairy matrices with plant-derived bioactive compounds, particularly fruit juices abundant in polyphenols, carotenoids, and vitamin C. Among these, sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) and rosehip (*Rosa canina*) are promising fruit ingredients due to their high content of polyphenols, carotenoids, vitamin C, and lipid-soluble bioactive compounds [7,8]. Incorporating such fruit components into fermented whey beverages not only enhances antioxidant activity, sensory attributes, and consumer appeal but also improves the nutritional and functional profile of the final product [9,10]. Furthermore, minerals and trace elements as calcium, iron, zinc, and selenium contribute to key metabolic and immune processes, while low levels of toxic elements ensure product safety in accordance with European Union food safety regulations concerning contaminants in food [11,12]. The antioxidant capacity of fermented whey beverages—typically evaluated using DPPH, ABTS, and FRAP assays—serves as a reliable indicator of their bioactivity and oxidative stability [1,5,6]. A similarly comprehensive analytical approach, combining physicochemical, rheological, microbiological and antioxidant assessments of fermented functional beverages, was reported by Salek et al. [13], who demonstrated that fermentation with symbiotic starter cultures significantly enhances bioactive potential and oxidative stability. The integration of organic whey with functional fruit ingredients such as sea buckthorn and rosehip (*R. canina*) thus presents a promising strategy for developing sustainable, health-promoting beverages with improved physicochemical and bioactive characteristics.

Among the plant-based additives considered for the fortification of fermented whey beverages, *R. canina* and *H. rhamnoides* stand out as particularly rich natural sources of bioactive compounds. *R. canina* fruits contain abundant phenolic acids, flavonoids, carotenoids, tocopherols, and vitamin C, which collectively contribute to their strong antioxidant, anti-inflammatory, and hepatoprotective activities [14]. Concentrations of ascorbic acid as high as 419.7 mg/100 g DW, along with substantial levels of carotenoids and polyphenols identified across different ecotypes, highlight the exceptional antioxidant capacity of this species [15]. Furthermore, encapsulated or powdered rosehip preparations effectively retain vitamins and minerals, making them valuable functional ingredients in fruit-enriched or dairy-based beverages [16]. In a whey-based matrix, synergistic interactions among flavonoids, carotenoids, vitamin C, and whey-derived proteins or peptides may be relevant because they can influence antioxidant activity, oxidative stability, and the functional quality of fermented beverages [17].

Similarly, *H. rhamnoides* berries are recognized as a potent reservoir of bioactive constituents, including carotenoids, tocopherols, phenolic acids, and unsaturated fatty acids, alongside exceptionally high levels of vitamin C—reported to reach up to 2740 mg/100 g [18]. Incorporation of sea buckthorn into food systems enhances nutritional value, sensory quality, and antioxidant activity, aligning with principles of sustainable and circular food production [19]. Recent developments in eco-efficient extraction technologies, such as ultrasound-assisted methods, have further improved the recovery of phenolic compounds, carotenoids, and essential fatty acids, reinforcing the multifunctional potential of this plant in nutraceutical and food applications [20]. Additionally, dairy products or beverages enriched with sea buckthorn pulp or oil exhibit improved oxidative stability and

nutrient retention, thereby enhancing both the functional and technological attributes of fermented milk matrices [21]. In this context, sea buckthorn emerges as a promising raw material for innovative fermented food products, enabling the simultaneous improvement of nutritional quality, oxidative stability, and technological performance [22].

This study builds upon and functionally extends our previous research on organic fermented whey beverages fortified with sea buckthorn or rosehip juice. In the earlier investigation, we assessed key technological and sensory-related properties of comparable beverages, including apparent and dynamic viscosity, rheological and viscoelastic characteristics, pH, titratable acidity, and microbiological safety. These parameters are intrinsically linked to texture, mouthfeel, product stability, and overall technological suitability. The current study advances this framework by examining the fatty acid profile, mineral and trace element composition, total polyphenol content, and antioxidant activity.

Despite the growing interest in fermented whey beverages enriched with fruit-derived bioactive compounds, most existing studies have predominantly focused on physicochemical, rheological, microbiological, or general antioxidant characteristics. In contrast, there is a lack of comprehensive data addressing the combined effects of whey origin, whey type, and fruit juice supplementation on fatty acid composition, mineral and trace element content, total polyphenol levels, and antioxidant activity in organic fermented whey beverages. Accordingly, the present study builds upon and functionally extends our earlier work on organic fermented whey beverages enriched with sea buckthorn or rosehip juice, in which key technological and sensory-related parameters—such as viscosity, rheological and viscoelastic properties, pH, titratable acidity, and microbiological safety—were evaluated.

Therefore, the objective of this study was to assess the fatty acid composition, mineral and trace element profile, total polyphenol content, and antioxidant activity of fermented beverages produced from organic cow and goat whey, including both acid and sweet whey, fortified with sea buckthorn or rosehip juice. This work contributes to the ongoing research on dairy-based functional foods by providing new insights into how whey type and plant-based fortification influence the bioactive composition and nutritional quality of these products.

## 2. Results and Discussion

### 2.1. Antioxidant Activity and Polyphenolic Profile of Fermented Whey Beverages Enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides*

Among the plant-derived ingredients incorporated into fermented whey beverages, *R. canina* and *H. rhamnoides* are recognized as outstanding sources of natural antioxidants. In the present study, samples fortified with rosehip juice—specifically SKK/DR, SKKr/DR, SSK/DR, and SSKr/DR—show the strongest antioxidant performance, with DPPH inhibition values ranging from 81 to 95%, ABTS inhibition ranging from 33 to 42%, FRAP levels between 0.98 and 1.16 mmol TE/L, and total polyphenol contents reaching 327–422 mg/100 g. In contrast, NP and samples fortified with sea buckthorn juice samples, namely SKK/NP, SKKr/NP, SSK/NP, SSKr/NP, SKK/R, SKKr/R, and SSK/R, exhibit the lowest antioxidant potential, with DPPH inhibition values ranging from 3.01 to 61.57%, ABTS inhibition between 3.01 and 29.55%, FRAP values not exceeding 0.77 mmol TE/L, and total polyphenol contents of 21.2–41.9 mg/100 g. These findings are consistent with earlier research indicating that *R. canina* fruits are rich in phenolic acids, flavonoids, carotenoids, tocopherols, and vitamin C, all of which contribute to substantial antioxidant activity [23]. The antioxidant properties and polyphenol content of the analyzed fermented whey beverages are presented in Table 1.

**Table 1.** Antioxidant properties and polyphenol content of fermented whey beverages obtained from organic goat and cow whey with the addition of sea buckthorn or rosehip (*R. canina*) juices.

Sample	DPPH [% Inhibition]	ABTS [% Inhibition]	FRAP [mmol TE/L]	Polyphenols (mg/100 g)
SKK/DR	80.99 <sup>e</sup> ± 0.94	36.40 <sup>i</sup> ± 0.44	1.022 <sup>h</sup> ± 0.018	351.7 <sup>c</sup> ± 1.91
SKK/NP	61.57 <sup>d</sup> ± 0.63	45.14 <sup>k</sup> ± 0.15	0.761 <sup>e</sup> ± 0.012	21.2 <sup>a</sup> ± 1.50
SKK/R	41.52 <sup>a</sup> ± 0.68	14.44 <sup>c</sup> ± 0.20	0.599 <sup>c</sup> ± 0.009	39.1 <sup>a</sup> ± 2.89
SKKr/DR	91.00 <sup>g</sup> ± 1.78	34.95 <sup>h</sup> ± 0.24	0.979 <sup>g</sup> ± 0.011	421.6 <sup>e</sup> ± 13.30
SKKr/NP	48.77 <sup>b</sup> ± 0.72	13.18 <sup>b</sup> ± 0.14	0.449 <sup>a</sup> ± 0.004	28.5 <sup>a</sup> ± 0.44
SKKr/R	94.62 <sup>h</sup> ± 0.66	3.10 <sup>a</sup> ± 0.04	0.815 <sup>f</sup> ± 0.006	41.9 <sup>a</sup> ± 2.81
SSK/DR	49.51 <sup>b</sup> ± 0.32	42.05 <sup>j</sup> ± 0.61	1.162 <sup>j</sup> ± 0.011	327.5 <sup>b</sup> ± 19.90
SSK/NP	57.23 <sup>c</sup> ± 0.27	29.55 <sup>f</sup> ± 0.37	0.691 <sup>d</sup> ± 0.002	23.2 <sup>a</sup> ± 1.82
SSK/R	43.73 <sup>a</sup> ± 0.51	3.01 <sup>a</sup> ± 0.02	0.536 <sup>b</sup> ± 0.006	41.4 <sup>a</sup> ± 1.10
SSKr/DR	92.55 <sup>g</sup> ± 1.10	32.87 <sup>g</sup> ± 0.18	1.122 <sup>i</sup> ± 0.017	379.3 <sup>d</sup> ± 8.62
SSKr/NP	58.42 <sup>c</sup> ± 0.68	25.88 <sup>e</sup> ± 0.42	0.772 <sup>e</sup> ± 0.009	26.5 <sup>a</sup> ± 1.61
SSKr/R	86.28 <sup>f</sup> ± 0.29	19.05 <sup>d</sup> ± 0.31	0.519 <sup>b</sup> ± 0.005	41.4 <sup>a</sup> ± 2.46

<sup>a-k</sup> Statistical differences in the various columns are indicated by different letters ( $p < 0.05$ ). SKKr/R—unpasteurized acid cow whey with sea buckthorn juice; SSKr/R—unpasteurized sweet cow whey with sea buckthorn juice; SSK/R—unpasteurized sweet goat whey with sea buckthorn juice; SKK/R—unpasteurized acid goat whey with sea buckthorn juice; SKKr/DR—unpasteurized acid cow whey with rosehip juice; SSKr/DR—unpasteurized sweet cow whey with rosehip juice; SSK/DR—unpasteurized sweet goat whey with rosehip juice; SKK/DR—unpasteurized acid goat whey with rosehip juice; SSKr/NP—unpasteurized sweet cow whey; SKKr/NP—unpasteurized acid cow whey; SSK/NP—unpasteurized sweet goat whey; and SKK/NP—unpasteurized acid goat whey.

Numerous studies have emphasized strong correlations between total polyphenol levels and antioxidant capacity in rosehip-based formulations, confirming that phenolic compounds largely determine the reducing and radical-scavenging power of the product [24]. Synergistic effects among flavonoids, carotenoids, and ascorbic acid have also been shown to enhance oxidative stability, thereby strengthening the antioxidant potential of rosehip extracts. Moreover, fermentation processes may further intensify polyphenol content and antioxidant response, as demonstrated in microbial transformations of *Rosa rugosa*, where both DPPH and FRAP increased following fermentation [25].

Sea buckthorn whey beverages analyzed in this study also exhibit notable antioxidant properties. Across all *H. rhamnoides* samples (R variants), DPPH inhibition ranges from 41.52 to 94.62%, ABTS inhibition ranges from 3.01 to 19.05%, and FRAP values range from 0.519 to 0.815 mmol TE/L. The highest FRAP value among beverages enriched with sea buckthorn juice is observed in samples of SKKr/R (0.815 mmol TE/L). These observations agree with reports describing the robust antioxidant potential of *H. rhamnoides*, attributed to its abundant polyphenols, flavonoids, and carotenoids acting through hydrogen-donating and electron-transfer mechanisms [26]. The results obtained from DPPH, ABTS, and FRAP analyses correspond with literature showing strong positive correlations between total phenolic content and antioxidant capacity in sea buckthorn juices and their derivatives [27]. Similarly, probiotic or co-fermented beverages containing *H. rhamnoides* have demonstrated DPPH inhibition exceeding 90% and elevated polyphenol levels, indicating that controlled fermentation can further enhance the functional potential of fruit-based beverages [28].

The differences between beverages enriched with rosehip juice and those enriched with sea buckthorn juice likely stem from the distinct bioactive compositions of these fruits. Rosehip supplementation results in higher total polyphenol concentrations and stronger reducing power, whereas sea buckthorn addition provides balanced radical-scavenging

activity and moderate FRAP values, reflecting its complex carotenoid–polyphenol matrix [20].

## 2.2. Analysis of Antioxidant Indices Ratios and Their Interpretation in Relation to the Polyphenolic Profile of Fermented Beverages Enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides*

Ratio analysis of antioxidant indices reveals distinct antioxidant behaviors between the beverages enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides*. The highest DPPH/FRAP values ( $108.3 \pm 43.4$ ) are observed in sea buckthorn beverages, indicating that the radical-scavenging activity measured by DPPH is relatively high compared with the reducing power measured by FRAP. This pattern suggests that *H. rhamnoides* beverages contain antioxidant compounds with strong hydrogen-donating capacity but a more moderate electron-transfer potential. Such characteristics are consistent with the known activity of sea buckthorn flavonoids and carotenoids, which participate in radical quenching through hydrogen atom transfer mechanisms [29]. The ratios between antioxidant indices for fermented whey beverages enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides* are presented in Table 2.

**Table 2.** Ratios between antioxidant indices (mean values) for fermented whey beverages enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides*.

Type of Beverage	DPPH/FRAP (Mean $\pm$ SD)	FRAP/ABTS (Mean $\pm$ SD)	TPC/DPPH (Mean $\pm$ SD)
<i>R. canina</i>	$74.3 \pm 21.9$	$0.029 \pm 0.003$	$4.9 \pm 1.1$
<i>H. rhamnoides</i>	$108.3 \pm 43.4$	$0.127 \pm 0.113$	$0.7 \pm 0.3$

In contrast, the rosehip beverages display much lower DPPH/FRAP ratios ( $74.3 \pm 21.9$ ) and exceptionally low FRAP/ABTS values ( $0.029 \pm 0.003$ ), indicating that *R. canina* polyphenols exert stronger reducing capacity relative to their ABTS and DPPH radical scavenging responses. This finding aligns with previous evidence demonstrating that gallic acid, catechin, quercetin, and other phenolics abundant in rosehip exhibit high electron-donating potential and strong reducing power [30].

The TPC/DPPH ratio further differentiates the two fruit matrices. Rosehip beverages exhibit a markedly higher TPC/DPPH value ( $4.9 \pm 1.1$ ) compared with sea buckthorn beverages ( $0.7 \pm 0.3$ ), highlighting the substantially greater contribution of total polyphenols to antioxidant activity in *R. canina* formulations. This observation aligns with earlier studies confirming strong correlations between phenolic abundance and antioxidant activity in rosehip-derived systems [31]. In contrast, the lower TPC/DPPH ratio in sea buckthorn beverages suggests that non-phenolic antioxidants, such as carotenoids and vitamin C, may contribute more significantly to their radical-scavenging efficiency.

Strong correlations between total polyphenol content and antioxidant capacity in the present study reinforce the view that phenolic compounds remain the principal determinants of antioxidant performance in fermented matrices enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides*. Similar associations have been reported in whey and yogurt systems fortified with plant-derived bioactive compounds [4].

The distinct antioxidant behaviors of rosehip and sea buckthorn beverages reflect the differences in their bioactive profiles. Rosehip supplementation leads to higher polyphenol concentrations and greater reducing power, whereas sea buckthorn addition results in stronger DPPH/FRAP responses and more balanced radical-scavenging mechanisms, consistent with its complex carotenoid–flavonoid composition [20]. These findings agree with previous research demonstrating complementary antioxidant mechanisms arising from the interaction of polyphenols, carotenoids, and vitamin C in *H. rhamnoides* [29].

Further supporting evidence indicates that ultrasonic and enzymatic extraction techniques enhance the recovery of bioactive compounds from *R. canina* and *H. rhamnoides*, resulting in improved antioxidant yields in fermented systems [32]. The synergistic interactions among polyphenols, carotenoids, and ascorbic acid contribute to the oxidative stability of these beverages, reinforcing their functional potential [33].

### 2.3. Fatty Acid Composition of Fermented Whey Beverages Enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides*

The fatty acid profiles of fermented whey beverages enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides* display distinct modifications determined by both the type of fruit juice and the origin of the whey matrix. In all samples, saturated fatty acids (SFAs) represent the dominant fraction, mainly palmitic acid (C16:0) together with short-chain fatty acids (C4:0–C10:0) typical of dairy-derived lipids. Nevertheless, supplementation with rosehip or sea buckthorn juice significantly modifies the lipid composition by increasing the proportions of unsaturated and polyunsaturated fatty acids (PUFA), thereby improving both the nutritional quality and functional value of the beverages.

To enhance the nutritional interpretation of the fatty acid profile, the n–6/n–3 ratio was calculated and is reported in Table 3. This ratio exhibits substantial variability among the samples, reflecting the combined influence of whey origin, whey type, and fruit juice addition. The lowest values are recorded for SKKr/DR and SKKr/NP, at 0.67 and 0.82, respectively. In several beverages based on goat whey and those enriched with rosehip juice, the ratio ranges from 1.36 to 1.58, suggesting a relatively balanced proportion of omega-6 to omega-3 fatty acids. In contrast, beverages enriched with sea buckthorn juice generally display higher n–6/n–3 ratios, ranging from 4.43 to 5.73, while pure sea buckthorn juice reaches a value of 12.40. For the SKK/DR sample, the ratio is not determined, due to the absence of detectable omega-3 fatty acids.

**Table 3.** (a) Fatty acid composition of fermented whey beverages produced from organic goat and cow whey with the addition of sea buckthorn or rosehip (*R. canina*) juices [g/100 g]. (b) Omega-6, omega-3, and n–6/n–3 ratio in fermented whey beverages and fruit juices.

	SKK/R	SKK/DR	SSKr/NP	SKKr/DR	SKKr/NP	SSKr/R	SKK/NP	SSK/NP	SSK/DR	SKKr/R	SSK/R	Rosehip Juice	Sea Buckthorn Juice
C4:0	0.125	0.136	0.017	0.059	0.192	0.048	0.513	0.068	0.017	0.023	0.148	0.0007	0.051
C6:0	0.173	0.040	0.027	0.016	0.038	0.040	0.091	0.060	0.015	0.026	0.031	0.0007	0.054
C8:0	0.026	0.039	0.028	0.008	0.019	0.022	0.098	0.033	0.008	0.012	0.030	0.00023	ND
C10:0	0.082	0.115	0.087	0.017	0.041	0.050	0.298	0.073	0.018	0.024	0.088	ND	ND
C11:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.00023	ND
C12:0	0.031	0.047	0.034	0.020	0.046	0.055	0.123	0.083	0.020	0.026	0.036	ND	ND
C13:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0053	ND
C14:0	0.099	0.130	0.091	0.067	0.156	0.193	0.321	0.284	0.069	0.101	0.091	ND	ND
C14:1n5	ND	ND	ND	0.004	0.012	0.010	ND	0.016	0.005	0.006	0.010	0.0003	ND
C15:0	0.013	0.012	0.009	0.008	0.022	0.022	0.036	0.039	0.009	0.012	ND	ND	ND
C15:1n5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0268	ND
C16:0	0.869	0.385	0.268	0.178	0.421	0.790	0.946	0.754	0.188	0.581	0.536	0.0031	0.222
C16:1n7	0.656	0.007	0.006	0.007	0.011	0.346	0.016	0.033	0.008	0.345	0.304	0.0003	0.237
C17:0	0.006	0.010	0.007	0.003	0.015	0.012	0.030	0.019	0.005	ND	0.005	ND	ND
C17:1n7	ND	ND	0.001	ND	ND	ND	ND	0.005	0.002	ND	ND	0.0111	ND
C18:0	0.187	0.246	0.156	0.080	0.199	0.235	0.562	0.357	0.091	0.133	0.158	0.0238	0.013
C18:1n9c	0.298	0.280	0.200	0.106	0.248	0.371	0.711	0.514	0.124	0.209	0.234	0.0037	0.034
C18:2n6c	0.229	0.065	0.028	0.006	0.028	0.124	0.084	0.067	0.015	0.103	0.105	ND	0.058

Table 3. Cont.

(a)													
	SKK/R	SKK/DR	SSKr/NP	SKKr/DR	SKKr/NP	SSKr/R	SKK/NP	SSK/NP	SSK/DR	SKKr/R	SSK/R	Rosehip Juice	Sea Buckthorn Juice
C18:3n6	ND	0.024	0.012	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0021	ND
C18:3n3	0.040	ND	ND	0.009	ND	0.028	0.053	0.046	0.011	0.018	0.021	ND	0.005
C20:0	0.002	ND	0.005	ND	0.023	ND	0.001	ND	ND	ND	0.003	ND	ND
C20:1n15	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0004	ND
C20:1n9	0.009	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.004	ND	0.001
C20:2n6	ND	ND	ND	ND	0.000	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.004
C20:3n6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C21:0	0.004	ND	0.001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.001	ND	ND
C20:4n6	ND	ND	ND	ND	0.005	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C20:3n3	ND	ND	0.001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0007	ND
C20:5n3	ND	ND	0.002	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C22:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C22:1n9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C22:2n6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.001	0.0006	ND
C23:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0006	ND
C24:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0003	ND
C22:6n3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C24:1n9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
SFA	1.491	1.025	0.713	0.396	0.963	1.418	2.505	1.702	0.424	0.916	0.979	0.0506	0.289
MUFA	0.963	0.287	0.207	0.117	0.271	0.727	0.726	0.567	0.138	0.560	0.553	0.0273	0.271
PUFA	0.268	0.089	0.043	0.015	0.063	0.152	0.137	0.114	0.025	0.122	0.127	0.0072	0.066
OMEGA <sub>3</sub>	0.040	0.000	0.003	0.009	0.034	0.028	0.053	0.046	0.011	0.018	0.021	0.0028	0.005
OMEGA <sub>6</sub>	0.229	0.089	0.040	0.006	0.028	0.124	0.084	0.067	0.015	0.103	0.106	0.0044	0.062
OMEGA <sub>9</sub>	0.307	0.280	0.200	0.106	0.248	0.371	0.711	0.514	0.124	0.209	0.238	0.0242	0.035
(b)													
Sample	Omega-6			Omega-3			n-6/n-3 Ratio						
SKK/R	0.229			0.040			5.73						
SKK/DR	0.089			0.000			NC						
SSKr/NP	0.040			0.003			13.33						
SKKr/DR	0.006			0.009			0.67						
SKKr/NP	0.028			0.034			0.82						
SSKr/R	0.124			0.028			4.43						
SKK/NP	0.084			0.053			1.58						
SSK/NP	0.067			0.046			1.46						
SSK/DR	0.015			0.011			1.36						
SKKr/R	0.103			0.018			5.72						
SSK/R	0.106			0.021			5.05						
Rosehip juice	0.0044			0.0028			1.57						
Sea buckthorn juice	0.062			0.005			12.40						

ND—not detected, because omega-3 fatty acids were not detected or were equal to zero. Sample codes are explained in Section 3.

Beverages fortified with *R. canina* juice—particularly SKK/DR, SKKr/DR, and SSKr/DR—show elevated PUFA content, with linoleic (C18:2 n-6) and  $\alpha$ -linolenic (C18:3 n-3) acids as the predominant components. A comparison between SKK/DR and its cow whey equivalent SKKr/DR indicates that the acid goat whey matrix may also contribute to the increased PUFA content. SKK/DR contains 0.089 g/100 g PUFA, whereas SKKr/DR

contains 0.015 g/100 g PUFA, despite both samples being enriched with rosehip juice. This suggests that the final PUFA level is determined not only by the fruit additive but also by the whey origin and its interaction with the fruit-derived lipid fraction. This composition mirrors the fatty acid profile of rosehip oil, which typically contains 45–55% linoleic acid and 20–30%  $\alpha$ -linolenic acid, contributing to a favorable omega-6/omega-3 balance and supporting cardiovascular and anti-inflammatory functions. The incorporation of rosehip juice thus contributes to the enrichment of the lipid fraction of fermented whey with essential fatty acids, supporting the bioactive potential of the resulting beverages [21].

In samples containing *H. rhamnoides* juice, the lipid profiles are characterized by increased levels of monounsaturated fatty acids (MUFAs), notably palmitoleic (C16:1 n7) and oleic (C18:1 n9) acids. These compounds are well-established markers of sea buckthorn lipids derived from seed and pulp fractions, known for their roles in metabolic regulation and tissue regeneration. The presence of palmitoleic acid (omega-7) is particularly important, as it exhibits anti-inflammatory and regenerative activities that complement the antioxidant mechanisms of sea buckthorn polyphenols. Comparable fatty acid distributions, distinguished by high MUFA and moderate PUFA levels, have been reported for diverse sea buckthorn genotypes, confirming its value as a plant source of bioactive lipids [11]. Moreover, compositional studies indicate that sea buckthorn berries may contain up to 76% C18 fatty acids, dominated by linoleic acid (29–50%) within the polyunsaturated fraction [20].

The origin of the whey matrix further influences the final lipid composition. Beverages prepared from goat whey contain greater quantities of short- and medium-chain fatty acids, including butyric (C4:0), caproic (C6:0), and capric (C10:0) acids, which are associated with antimicrobial and gut-health benefits. In contrast, cow whey-based beverages display higher proportions of long-chain unsaturated fatty acids. These differences reflect the metabolic distinctions between milk sources and the specific interactions among whey proteins, microbial cultures, and fruit lipids during fermentation [1].

From a functional standpoint, the incorporation of *R. canina* and *H. rhamnoides* juices into the fermented whey system contributes to a more diverse lipid profile that combines dairy-derived fatty acids with bioactive plant lipid fractions. The presence of omega-3, omega-6, and omega-7 fatty acids supports the nutritional relevance of these beverages; however, their interpretation should consider the calculated n-6/n-3 ratio presented in Table 3 (Part b). These outcomes align with recent advances in functional dairy research, where the inclusion of sea buckthorn and rosehip lipids has been shown to enhance both the nutraceutical value and oxidative stability of fermented milk products [21].

#### 2.4. Heavy Metal Content in Fermented Whey Beverages Enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides*

The determination of heavy metal content in fermented whey beverages enriched with *R. canina* and *H. rhamnoides* juices demonstrates that all toxic elements—arsenic (As), cadmium (Cd), lead (Pb), and mercury (Hg)—remain well below the permissible limits established by European food safety regulations, confirming the toxicological safety and ecological integrity of the products. Among the analyzed elements, iron (Fe), zinc (Zn), and manganese (Mn) predominated in the mineral fraction, whereas toxic metals are detected only in trace concentrations. Measured As levels range from 0.004 to 0.016 mg/kg, Cd from <0.001 to 0.007 mg/kg, and Pb from 0.032 to 0.11  $\mu$ g/kg, while Hg concentrations remain below the quantification limit. These values are significantly lower than the maximum levels allowed under Commission Regulation (EC) No. 1881/2006, as amended by Commission Regulation (EU) 2023/915, which stipulate threshold concentrations of Cd ( $\leq 0.01$  mg/kg) and Pb ( $\leq 0.02$  mg/kg) for milk and dairy products [12,34].

Sea buckthorn beverages show generally higher Fe and Ni contents, whereas Mn levels are highly elevated in pure rosehip juice, reflecting natural variability in fruit mineral profiles. This trend reflects the natural mineral composition of sea buckthorn fruit, known for its abundance of essential transition metals serving as cofactors in antioxidant enzymes such as superoxide dismutase and catalase. Previous research has shown that despite relatively high Fe and Mn concentrations in sea buckthorn biomass, Cd, Hg, and Pb levels remain well below EU safety thresholds, highlighting the species' low capacity for heavy metal bioaccumulation [35]. Furthermore, the incorporation of sea buckthorn into fermented dairy matrices has been linked to enhanced antioxidant stability and nutritional quality without elevating heavy metal content [4,7].

Conversely, beverages fortified with *R. canina* juice (SKK/DR, SKKr/DR, Rosehip juice) exhibit slightly lower Fe and Mn levels but comparable or marginally higher As and Cd concentrations. This distribution aligns with the intrinsic mineral composition of rosehip fruits, characterized by balanced levels of Fe, Cu, and Zn, and minimal amounts of toxic trace elements. The high polyphenol and carotenoid content typical of *R. canina* contributes to pronounced metal-chelating activity, facilitating the binding or immobilization of trace metals during fermentation and storage [36].

In general, essential elements such as Fe, Zn, and Mn predominate over toxic elements, although their exact distribution varies depending on whey origin, whey type, and fruit juice addition. This sample-specific variability is particularly evident in rosehip-based samples and pure rosehip juice, where Mn levels are elevated compared with other variants. Overall, the predominance of essential elements and the trace-level presence of toxic metals are consistent with patterns reported for other fermented dairy and plant-based beverages [37]. These findings confirm that the fermentation process and supplementation with *R. canina* or *H. rhamnoides* juices did not promote heavy metal accumulation. Moreover, the trace levels of toxic elements are consistent with those reported for functional dairy products containing sea buckthorn and rosehip, all of which comply with current EU food safety and environmental sustainability requirements [33].

From a nutritional and functional standpoint, the presence of Fe, Mn, and Zn augments the biological value of fermented whey beverages by supporting antioxidant enzymatic systems and maintaining redox balance. These beneficial microelements coexist with negligible amounts of toxic metals, confirming that plant juice supplementation and fermentation improved the nutritional quality of the beverages without compromising safety. The antioxidant and metal-chelating activities of *R. canina* and *H. rhamnoides* further stabilize trace element composition, ensuring both functional efficacy and toxicological safety of the final products. The trace and microtrace element contents in the analyzed fermented whey beverages are presented in Table 4.

**Table 4.** Trace and microtrace element content in fermented whey beverages produced from organic goat and cow whey with the addition of sea buckthorn or rosehip (*R. canina*) juices [mg/kg].

Type of Sample	Ca [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mn [mg/kg]	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Pb [μg/kg]	Se [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Co [mg/kg]	Hg [mg/kg]
SKK/R	639	8.76	6.15	1.4	0.012	0.007	0.072	0.274	0.066	0.004	<LOQ = 0.005
SKK/DR	859	0.753	3.65	2.34	0.011	0.004	0.044	0.251	0.007	0.003	<LOQ = 0.005
SSKr/NP	297	<LOQ = 0.1	4.41	<LOQ = 0.005	0.012	<LOQ = 0.001	0.047	0.274	<LOQ = 0.005	0.001	<LOQ = 0.005
SKKr/DR	812	1.88	4.51	2.29	0.011	0.004	0.04	0.24	<LOQ = 0.005	0.003	<LOQ = 0.005
SKKr/NP	961	7.3	5.83	<LOQ = 0.005	0.014	<LOQ = 0.001	0.047	0.27	<LOQ = 0.005	0.004	<LOQ = 0.005
SKkr/R	347	3.78	4.3	0.361	0.007	<LOQ = 0.001	0.032	0.196	0.081	0.002	<LOQ = 0.005
SKK/NP	1050	<LOQ = 0.1	5.63	<LOQ = 0.005	0.016	<LOQ = 0.001	0.058	0.311	<LOQ = 0.005	0.003	<LOQ = 0.005
SSK/NP	312	<LOQ = 0.1	1.57	<LOQ = 0.005	0.063	<LOQ = 0.001	0.072	0.291	<LOQ = 0.005	0.002	<LOQ = 0.005

Table 4. Cont.

Type of Sample	Ca [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mn [mg/kg]	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Pb [μg/kg]	Se [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Co [mg/kg]	Hg [mg/kg]
SSK/DR	322	0.894	2.51	2.59	0.008	0.005	0.05	0.241	<LOQ = 0.005	0.003	<LOQ = 0.005
SKKr/R	562	<LOQ = 0.1	4.43	<LOQ = 0.005	0.011	<LOQ = 0.001	0.054	0.254	0.072	0.003	<LOQ = 0.005
SSK/R	165	4.71	4.44	0.574	0.012	0.007	0.056	0.26	0.061	0.002	<LOQ = 0.005
rosehip ( <i>R. canina</i> ) juice	641	1.59	3.03	6.49	0.009	0.01	0.054	0.237	0.042	0.004	<LOQ = 0.005
Sea buckthorn juice	75.1	13.1	2.64	2.13	0.004	0.016	0.11	0.23	0.218	0.003	<LOQ = 0.005

### 3. Materials and Methods

#### 3.1. Materials

For the preparation of fermented organic whey beverages enriched with organic fruit juices, the following materials were used: unpasteurized acid and sweet goat whey, as well as unpasteurized acid and sweet cow whey, all sourced from the Family Organic Farm “Figa” (owned by Waldemar and Tomasz Maziejuk, Mszana, Tylawa, Poland). Organic sea buckthorn and rosehip (*R. canina*) juices were obtained from Polska Róża–Ernest Michalski Ltd. (Falenty Nowe, Raszyn, Poland). The fermentation process was initiated using lyophilized direct-vat-inoculation starter cultures Lactoferm ABY Pro-Tek (Biochem s.r.l., Via La Rinascita, Birori, Nuoro, Italy), containing *Streptococcus thermophilus*, *Bifidobacterium bifidum*, *Lactobacillus acidophilus*, and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. Organic brown cane sugar from certified organic farming was supplied by Bio Planet Sp. z o.o. (Leszno, Poland).

#### 3.2. Production Process

In the initial stage of production, the ingredients listed in Table 1 were precisely measured to achieve a whey-to-juice ratio of 1:1, using either cow or goat whey (sweet or acid) and sea buckthorn or rosehip (*R. canina*) juice. The whey-to-fruit juice ratio (1:1) was adopted in accordance with our previously established technological protocol for organic fermented whey beverages enriched with sea buckthorn or rosehip juice. This ratio was selected to integrate the nutritional and technological attributes of the whey matrix with a substantial contribution of bioactive compounds derived from the fruit component. Organic brown cane sugar was added only when required to adjust the total sugar content of the formulation to 5%, taking into account the naturally occurring sugars in both whey and fruit juice. This standardization aimed to facilitate lactic acid fermentation and ensure consistent fermentation conditions across all beverage variants. The respective liquids were blended under laboratory conditions at 140 rpm for 30 s with a Heidolph MR 3002S magnetic stirrer (Heidolph Instruments GmbH & Co. KG, Schwabach, Germany) to ensure homogeneity, and the obtained mixture was subsequently passed through a sieve with a pore size of 0.3 mm (approximately 35 gsm) to remove coarse particles. Following filtration, a lyophilized lactic acid starter culture was added at a concentration of 10 g per 100 L of the whey–juice mixture or its aqueous extract. Organic brown cane sugar was then incorporated to reach 5% of the total formulation. The whey-to-fruit juice ratio (1:1), starter culture dosage (10 g/100 L), and fermentation and maturation conditions were defined based on our previously published technological protocol for organic fermented whey beverages enriched with sea buckthorn or rosehip juice. Organic brown cane sugar was incorporated only when necessary to standardize the total sugar content of the formulation at 5%, considering the intrinsic sugars present in both whey and fruit juice. The starter culture suspension was obtained by rehydrating the lyophilized direct-vat inoculum in

sterile distilled water prior to its addition to the whey–juice system, ensuring homogeneous distribution of the microorganisms within the matrix. The resulting mixture was then homogenized at 140 rpm for 30 s using a Heidolph MR 3002S magnetic stirrer (Heidolph Instruments GmbH & Co. KG, Schwabach, Germany). This mild homogenization step, performed under laboratory conditions, enabled uniform dispersion of the fruit juice, sugar, and starter culture throughout the whey matrix, while limiting aeration and preventing structural disruption of the beverage. Fermentation was initiated by inoculating the whey–juice mixture with the lyophilized direct-vat starter culture Lactoferm ABY Pro-Tek, comprising *Streptococcus thermophilus*, *Bifidobacterium bifidum*, *Lactobacillus acidophilus*, and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. Following inoculation and homogenization, the beverages were incubated at 42 °C for 4 h to facilitate lactic acid fermentation. The samples were then cooled and stored at 5 °C for a 14-day maturation period prior to conducting analyses of chemical composition, mineral and trace elements, fatty acid profile, total polyphenol content, and antioxidant activity. Finally, sterilized bottles were filled with the prepared mixture, sealed, and incubated for 4 h at 42 °C, followed by maturation at 5 °C for 14 days prior to analytical determinations. The sample codes used in this study are presented in Table 5.

**Table 5.** Sample codes used for fermented whey beverages produced from organic goat and cow whey with the addition of sea buckthorn or rosehip (*R. canina*) juices.

Whey Origin	Whey Type	Fruit Juice Type	Sample Code
Cow	Sweet	Sea buckthorn	SSKr/R
Cow	Sweet	rosehip ( <i>R. canina</i> )	SSKr/DR
Cow	Sweet	Control (No Plant)	SSKr/NP
Cow	acid	Sea buckthorn	SKKr/R
Cow	acid	rosehip ( <i>R. canina</i> )	SKKr/DR
Cow	acid	Control (No Plant)	SKKr/NP
Goat	Sweet	Sea buckthorn	SSK/R
Goat	Sweet	rosehip ( <i>R. canina</i> )	SSK/DR
Goat	Sweet	Control (No Plant)	SSK/NP
Goat	acid	Sea buckthorn	SKK/R
Goat	acid	rosehip ( <i>R. canina</i> )	SKK/DR
Goat	acid	Control (No Plant)	SKK/NP

### 3.3. Determination of Antioxidant Properties by the DPPH Method

The antioxidant activity of the fermented whey beverages was assessed using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay according to Szafran' ska et al. [10], with minor modifications. A 0.2 mL aliquot of each sample was combined with an ethanolic solution of 0.1 mM DPPH (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA). The mixture was vortexed thoroughly and left to react for 15 min in darkness at room temperature to prevent photodegradation of the reagent. Absorbance values were recorded at 520 nm using a UV–VIS spectrophotometer (Evolution 201 UV–Visible Spectrophotometer, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). L-Ascorbic acid served as a reference antioxidant. The scavenging activity of the samples was calculated according to the following equation:

DPPH radical-scavenging activity (%) =

$$[1 - (\text{sample absorbance at 520 nm} / \text{control absorbance at 520 nm})] \times 100$$

#### 3.4. Determination of Antioxidant Properties by the FRAP Method

The ferric reducing antioxidant power (FRAP) of the beverages was evaluated following the method proposed by Benzie and Strain [38], with minor modifications. The FRAP reagent was freshly prepared by mixing 300 mM acetate buffer (pH 3.6) with a 10 mM solution of 2,4,6-tris(2-pyridyl)-1,3,5-triazine (TPTZ; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) in 40 mM HCl, and 20 mM FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O (POCH, Gliwice, Poland) in a 10:1:1 volume ratio. A 0.1 mL aliquot of each beverage sample was added to 1.9 mL of the freshly prepared FRAP reagent. The mixture was vortexed and incubated for 15 min at 37 °C to ensure reaction completion. Absorbance readings were recorded at 593 nm using a UV–VIS spectrophotometer. Results are expressed as the concentration of Fe<sup>2+</sup> ions generated by the reduction of Fe<sup>3+</sup>, indicating the sample's total reducing power.

#### 3.5. Determination of Antioxidant Properties by the ABTS Method

The total antioxidant capacity of the samples was determined using the 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) radical cation decolorization assay according to Szafran'aska et al. [10], with minor modifications. The working ABTS solution was prepared by mixing 1 mL of ABTS reagent with 80 mL of methanol and adjusting its absorbance to 0.700 ± 0.002 at 734 nm using a UV–VIS spectrophotometer. To initiate the reaction, 30 µL of each fermented whey beverage was added to 3 mL of the ABTS solution. Blanks were prepared in parallel by replacing the sample volume with methanol. The reaction mixtures were kept in the dark for 5 min at room temperature, after which the decrease in absorbance at 734 nm was recorded. The antioxidant activity is expressed as the percentage of ABTS radical inhibition relative to the control.

#### 3.6. Determination of Total Polyphenols (Folin–Ciocalteu Method)

Total polyphenol content was determined using the Folin–Ciocalteu colorimetric method according to Pérez et al. [39], with minor modifications. Methanolic extracts of the samples were combined with Folin–Ciocalteu reagent, followed by sodium carbonate solution. After a 30-min incubation, absorbance was read at 725 nm using a Shimadzu UV-1800 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan). Quantification was performed using caffeic acid calibration solutions, and results are expressed as mg CAE/100 g.

#### 3.7. Determination of Fat Content (Soxhlet Method)

The fat content of the samples was determined using solvent extraction in accordance with the Soxhlet gravimetric procedure based on AOAC methods [40]. Homogenized material was weighed into cellulose extraction thimbles and subjected to hexane extraction using hexane (Avantor Performance Materials Poland S.A., Gliwice, Poland) in a Soxtec Avanti® system (Tecator AB, Höganäs, Sweden). Following the completion of the boiling and rinsing phases, the solvent was recovered and the extraction cups were dried to constant weight in a MEMMERT oven (Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Germany). Fat content was calculated gravimetrically and is expressed as g/100 g of sample.

#### 3.8. Preparation of Fatty Acid Methyl Esters (FAME)

Fatty acid methyl esters were prepared from approximately 100 mg of extracted fat according to ISO 12966-2:2017 [41], with minor modifications. Samples were subjected to saponification with methanolic KOH and subsequently esterified using boron trifluoride

in methanol. After heating in a water bath and rapid cooling, FAMEs were extracted into hexane, washed with saturated sodium chloride solution, dried over anhydrous sodium sulfate, and transferred to chromatographic vials. All reagents were obtained from Avantor Performance Materials Poland S.A. (Gliwice, Poland), according to the analytical protocol used in the laboratory.

### 3.9. Gas Chromatographic Analysis of Fatty Acids

FAMEs were analyzed using a Varian 450-GC gas chromatograph, equipped with a CP-8400 autosampler, a 1177 split/splitless injector, a Select™ Biodiesel for FAME capillary column, and a flame ionization detector (Varian Inc., Palo Alto, CA, USA), according to ISO 12966-4:2015 [42], with minor modifications. Helium served as the carrier gas. Chromatograms were processed using the Galaxie™ Chromatography Data System, and fatty acids were identified and quantified using certified FAME reference standards.

### 3.10. Determination of Mineral and Trace Elements (ICP–MS)

Mineral and trace element contents were assessed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP–MS). Approximately 0.5 g of homogenized sample was weighed with 0.0001 g accuracy and mineralized with Suprapur HNO<sub>3</sub> (Merck KGaA, Darmstadt, Germany) in a CEM Mars Xpress microwave digestion system (CEM Corporation, Matthews, NC, USA) at 210 °C. The resulting digests were diluted to 50 mL with demineralized water (0.055 µS/cm) and analyzed using a Varian MS-820 ICP–MS (Varian Inc., Palo Alto, CA, USA) under standard argon plasma conditions. Quantification was based on external calibration with Ultra Scientific standards (Ultra Scientific, North Kingstown, RI, USA), and analytical performance was verified using blanks, duplicates, and certified reference material NIST-1577c [43,44].

### 3.11. Determination of Mineral Elements (FAAS)

Selected macro- and microelements were determined by flame atomic absorption spectrometry (FAAS) following the same mineralization protocol as for ICP–MS and according to validated procedures for mineral and trace element determination in dairy matrices [43], with minor modifications. Measurements were performed using a Varian SpectrAA 280 FS spectrometer (Varian Inc., Palo Alto, CA, USA) under element-specific instrumental conditions with an acetylene–air flame. Schinkel buffer was added to minimize ionization interferences. Calibration curves were prepared using certified standard solutions, and results are expressed as mg/kg.

### 3.12. Determination of Mercury Content (AMA 254 Analyzer)

Mercury was determined directly using an AMA 254 mercury analyzer (Altec Ltd., Prague, Czech Republic) according to EPA Method 7473 [45], with minor modifications. Samples were thermally decomposed in a combustion furnace, and the released mercury vapor was trapped on a gold amalgamator. Subsequent thermal desorption allowed quantification at 253.64 nm by atomic absorption. The method required no wet mineralization and was applied to both solid and liquid samples.

### 3.13. Statistical Analysis

The obtained results were subjected to a three-way analysis of variance (ANOVA) (whey origin, whey type, juice type) and differences between mean values were evaluated using Tukey's post hoc test at a significance level of  $p \leq 0.05$ . All statistical analyses were performed using Statistica PL version 13 (StatSoft, Krakow, Poland).

## 4. Conclusions

The present study demonstrates that fermented whey beverages produced from organic goat and cow whey and supplemented with *R. canina* and *H. rhamnoides* juices are valuable functional products characterized by high antioxidant potential, favorable fatty acid composition, and safe levels of trace and heavy metals. Enrichment with *R. canina* juice markedly enhanced the antioxidant capacity of the fermented whey beverages, as indicated by elevated DPPH, ABTS, and FRAP values, along with increased total polyphenol content. This improvement is attributed to the rich composition of phenolic acids, flavonoids, carotenoids, and vitamin C in rosehip, which collectively contribute to strong radical-scavenging and reducing activities. In contrast, supplementation with *H. rhamnoides* juice produced beverages exhibiting more balanced antioxidant profiles and notably high FRAP activity, consistent with the complex mixture of carotenoids and polyphenols naturally present in sea buckthorn fruit. Fatty acid profile analysis indicates that both plant-based additives affect the lipid composition of fermented whey beverages. The introduction of plant-derived lipid fractions from rosehip and sea buckthorn juices may partly compensate for the naturally low fat content of whey, contributing to a more complete nutritional profile compared with plain fermented whey beverages. Rosehip fortification enhanced the content of polyunsaturated fatty acids (PUFAs), particularly linoleic (C18:2 n-6) and  $\alpha$ -linolenic (C18:3 n-3) acids, and contributed to relatively low n-6/n-3 ratios in selected samples, ranging from 0.67 to 1.57, as shown in Table 3 (Part b). Sea buckthorn supplementation, in turn, increased monounsaturated fatty acid (MUFA) levels—mainly palmitoleic (C16:1 n-7) and oleic (C18:1 n-9) acids—improving both the nutritional and functional quality of the products. Beverages formulated from goat whey contain higher concentrations of short- and medium-chain fatty acids (C4:0–C10:0), which support better digestibility and potential physiological benefits compared with those produced from cow whey. Evaluation of mineral and heavy metal content confirmed that all samples complied with the European Union food safety standards. Essential mineral elements such as Fe, Zn, and Mn predominate, whereas concentrations of toxic elements—As, Cd, Pb, and Hg—remain well below the regulatory limits defined in Commission Regulation (EC) No. 1881/2006 and its amendment (EU) 2023/915. Beverages containing sea buckthorn juice exhibit the highest Fe concentrations, while Mn levels are strongly influenced by the juice type, with the pure rosehip juice showing the highest Mn content.

Overall, the combination of organic whey with *R. canina* and *H. rhamnoides* juices yielded fermented beverages that meet rigorous food safety and quality requirements while displaying improved nutritional and functional attributes. These products can thus be regarded as promising additions to the functional food market, offering natural sources of antioxidants, essential fatty acids, and minerals, all in accordance with current EU food safety and sustainability regulations. The use of organic raw materials, simple formulation, and low toxic element levels support the potential clean-label and organic-oriented positioning of these beverages. The findings further highlight that the valorization of underutilized by-products such as whey through the incorporation of bioactive plant ingredients contributes both to environmental sustainability and the advancement of health-promoting dairy-based beverages.

**Author Contributions:** Conceptualization, M.B. and B.G.S.; methodology, M.B., K.O. and B.G.S.; software, M.B., K.O. and B.G.S.; validation, M.B., K.O. and B.G.S.; formal analysis, M.B., A.S., K.O. and B.G.S.; investigation, M.B. and A.S.; data curation, M.B., A.S., K.O. and B.G.S.; visualization, M.B., A.S. and K.O.; writing—original draft preparation, M.B.; writing—review and editing, B.G.S.; supervision, B.G.S.; project administration, B.G.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of Poland under the grant DWD/6/0210/2022 (“Implementation Doctorate”) and by the Ministry of Science and Higher Education of Poland through the targeted subsidy “Research Network of Life Science Universities for the Development of the Polish Dairy Sector” (project no. MEiN/2023/DPI/2866).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The data presented in this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

ABTS	2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)
DPPH	2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl
DW	dry weight
FAAS	flame atomic absorption spectrometry
FAME	fatty acid methyl esters
FRAP	Ferric Reducing Antioxidant Power
ICP-MS	inductively coupled plasma mass spectrometry
LOQ	limit of quantification
MUFA	monounsaturated fatty acids
ND	not detected
NP	No Plant (control sample)
PUFA	polyunsaturated fatty acids
SFA	saturated fatty acids
TE	Trolox equivalent

## References

1. Barton, M.; Waraczewski, R.; Sołowiej, B.G. Organic sea buckthorn or rosehip juices on the physicochemical, rheological, and microbial properties of organic goat or cow fermented whey beverages. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 1240. [CrossRef]
2. Alkaisy, Q.H.; Al-Saadi, J.S.; Al-Rikabi, A.K.J.; Altemimi, A.B.; Hesarinejad, M.A.; Abedelmaksoud, T.G. Exploring the health benefits and functional properties of goat milk proteins. *Food Sci. Nutr.* **2023**, *11*, 5641–5656. [CrossRef]
3. Dinkçi, N.; Akdeniz, V.; Akalın, A.S. Probiotic whey-based beverages from cow, sheep and goat milk: Antioxidant activity, culture viability, amino acid contents. *Foods* **2023**, *12*, 610. [CrossRef]
4. Purkiewicz, A.; Pietrzak-Fiećko, R. Antioxidant properties of fruit and vegetable whey beverages and fruit and vegetable mousses. *Molecules* **2021**, *26*, 3126. [CrossRef]
5. Szafran, J.O.; Waraczewski, R.; Barton, M.; Wesołowska-Trojanowska, M.; Maziejuk, W.; Nowak, P.; Sołowiej, B.G. Effects of organic fruit juices on physicochemical, microbiological, and antioxidative aspects of fermented whey beverages from organic goat and cow milk produced at laboratory and industrial scales. *J. Dairy Sci.* **2024**, *107*, 10481–10496. [CrossRef]
6. Chagua, P.; Malpartida Yapias, R.J.; Torres Gutiérrez, E.R.; Rojas, M. Development of a functional beverage based on fermented whey, goldenberry (*Physalis peruviana* L.), and tumbo (*Passiflora mollissima*). *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* **2023**, *76*, 10505–10516. [CrossRef]
7. Schubertová, S.; Krepsová, Z.; Janotková, L.; Potočňáková, M.; Kreps, F. Exploitation of sea buckthorn fruit for novel fermented foods production: A review. *Processes* **2021**, *9*, 749. [CrossRef]
8. Ska, pska, S.; Marszałek, K.; Wozniak, Ł.; Szczepan, ska, J.; Danielczuk, J.; Zawada, K. The development and consumer acceptance of functional fruit-herbal beverages. *Foods* **2020**, *9*, 1819. [CrossRef]
9. Brodziak, A.; Król, J.; Matwijczuk, A.; Czernecki, T.; Glibowski, P.; Wlazło, Ł.; Litwin, czuk, A. Effect of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) mousse on properties of probiotic yoghurt. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 545. [CrossRef]
10. Khalid, F.; Saeed, M.; Majeed, M.R.; Nazir, F.; Khalid, S.K.; Amin, M.; Nasir, M.; Fatima, A. Enhanced antioxidant potential of supplemented yogurt with sea buckthorn. *Food Sci. Appl. Biotechnol.* **2022**, *5*, 160. [CrossRef]






11. Máté, M.; Selimaj, G.; Simon, G.; Szalóki-Dorkó, L.; Ficzek, G. Assessment of berries of some sea buckthorn genotypes by physicochemical properties and fatty acid content of the seed. *Plants* **2022**, *11*, 3412. [[CrossRef](#)]
12. European Commission. Commission Regulation (EC) No 1881/2006 setting maximum levels for contaminants in food. *Off. J. Eur. Union* **2006**, L364, 5–24.
13. Salek, R.N.; Pleva, P.; Sumczynski, D.; Vinter, Š.; Kopec̣ková, J.; Rejdlová, A.; Lorencová, E. Sauerkraut juice fermented with different symbiotic starter cultures: Comprehensive assessment of physicochemical, rheological, antioxidant, and microbiological characteristics. *Front. Sustain. Food Syst.* **2025**, *9*, 1570465. [[CrossRef](#)]
14. Negrean, O.-R.; Fạrcaș, A.C.; Nemeș, S.-A.; Cic, D.-E.; Socaci, S.A. Recent advances and insights into the bioactive properties and applications of *Rosa canina* L. and its by-products. *Heliyon* **2024**, *10*, e30816. [[CrossRef](#)]
15. Bakhtiar, Z.; Eghlima, G.; Hatami, M.; Mirjalili, M.H. Quantification of fatty acids in seed oil and important bioactive compounds in Iranian *Rosa canina* L. ecotypes for potential cosmetic and medicinal uses. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 22721. [[CrossRef](#)]
16. Igual, M.; García-Herrera, P.; Cámara, R.M.; Martínez-Monzó, J.; García-Segovia, P.; Cámara, M. Bioactive compounds in rosehip (*Rosa canina*) powder with encapsulating agents. *Molecules* **2022**, *27*, 4737. [[CrossRef](#)]
17. Peña, F.; Valencia, S.; Tereucán, G.; Nahuelcura, J.; Jiménez-Aspee, F.; Cornejo, P.; Ruiz, A. Bioactive compounds and antioxidant activity in the fruit of rosehip (*Rosa canina* L. and *Rosa rubiginosa* L.). *Molecules* **2023**, *28*, 3544. [[CrossRef](#)]
18. Jaśniewska, A.; Diowski, A. Wide spectrum of active compounds in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) for disease prevention and food production. *Antioxidants* **2021**, *10*, 1279. [[CrossRef](#)]
19. Murariu, O.C.; Lipsa, F.D.; Cârlescu, P.M.; Frunză, G.; Ciobanu, M.M.; Cara, I.G.; Murariu, F.; Stoica, F.; Albu, A.; Tallarita, A.V.; et al. The effect of including sea buckthorn berry by-products on white chocolate quality and bioactive characteristics under a circular economy context. *Plants* **2024**, *13*, 2799. [[CrossRef](#)]
20. Datuashvili, L.; Vanidze, M.; Japaridze, I.; Surmanidze, N.; Kartsivadze, I.; Davitadze, R.; Kalandia, A. Chemical composition analysis of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) in Georgia and development of innovative valorization technologies. *Food Sci. Nutr.* **2025**, *13*, e70507. [[CrossRef](#)]
21. Tereshchuk, L.; Starovoytova, K.; Babich, O.; Dyshlyuk, L.; Sergeeva, I.; Pavsky, V.; Ivanova, S.; Prosekov, A. Sea buckthorn and rosehip oils with chokeberry extract to prevent hypercholesterolemia in mice caused by a high-fat diet in vivo. *Nutrients* **2020**, *12*, 2941. [[CrossRef](#)]
22. Barton, M.; Waraczewski, R.; Muszynski, S.; Stasiak, D.M.; Sołowiej, B.G. Effects of whey and plant-based additives on technological and microbiological characterization of fermented raw-dried pork meat snacks of human grade standard. *Foods* **2025**, *14*, 3960. [[CrossRef](#)]
23. Gruszecki, R.; Mysiak, B.; Walasek-Janusz, M.E. Effect of drying temperature on the bioactive compounds content of rose hips (*Rosa canina* L.). *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2024**, *23*, 57–66. [[CrossRef](#)]
24. Bratu, M.M.; Birghila, S.; Popescu, A.; Negreanu-Pirjol, B.S.; Negreanu-Pirjol, T. Correlation of antioxidant activity of dried berry infusions with the polyphenols and selected microelements contents. *Bull. Chem. Soc. Ethiop.* **2018**, *32*, 1–12. [[CrossRef](#)]
25. Cai, Y.; Abila, M.; Gao, L.; Wu, J.; Yang, L. Research on phenolic content and its antioxidant activities in fermented *Rosa rugosa* ‘Dianhong’ petals with brown sugar. *Antioxidants* **2024**, *13*, 607. [[CrossRef](#)]
26. Ji, M.; Gong, X.; Li, X.; Wang, C.; Li, M. Advanced research on the antioxidant activity and mechanism of polyphenols from *Hippophae* species—A review. *Molecules* **2020**, *25*, 917. [[CrossRef](#)]
27. Wu, D.; Xia, Q.; Huang, H.; Tian, J.; Ye, X.; Wang, Y. Influence of centrifugation and transmembrane treatment on determination of polyphenols and antioxidant ability for sea buckthorn juice. *Molecules* **2023**, *28*, 2446. [[CrossRef](#)]
28. Aregbe, A.Y.; Boasiako, T.A.; Xiong, Y.; Rahman, M.H.; Ma, Y. Probiotic *Lactobacillus plantarum* LP28 and *Saccharomyces cerevisiae* improve the bioactive content and quality of fruit-based rice beverage. *Food Sci. Nutr.* **2024**, *12*, e4462. [[CrossRef](#)]
29. Wang, Z.; Zhao, F.; Wei, P.; Chai, X.; Hou, G.; Meng, Q. Phytochemistry, health benefits, and food applications of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): A comprehensive review. *Front. Nutr.* **2022**, *9*, 1036295. [[CrossRef](#)]
30. Kerasioti, E.; Apostolou, A.; Kafantaris, I.; Chronis, K.; Kokka, E.; Dimitriadou, C.; Tzanetou, E.N.; Priftis, A.; Koulocheri, S.D.; Haroutounian, S.A.; et al. Polyphenolic composition of *Rosa canina*, *Rosa sempervivens* and *Pyrocantha coccinea* extracts and assessment of their antioxidant activity in human endothelial cells. *Antioxidants* **2019**, *8*, 92. [[CrossRef](#)]
31. Nicolescu, A.; Băbota, M.; Zhang, L.; Bunea, C.I.; Gavrilas, L.; Vodnar, D.C.; Mocan, A.; Crișan, G.; Rocchetti, G. Optimized ultrasound-assisted enzymatic extraction of phenolic compounds from *Rosa canina* L. pseudo-fruits (rosehip) and their biological activity. *Antioxidants* **2022**, *11*, 1123. [[CrossRef](#)]
32. Nicolescu, A.; Băbota, M.; Cañada, E.A.; Dias, M.I.; Añibarro-Ortega, M.; Cornea-Cipcigan, M.; Tanase, C.; Sisea, C.R.; Mocan, A.; Barros, L.; et al. Association of enzymatic and optimized ultrasound-assisted aqueous extraction of flavonoid glycosides from dried *Hippophae rhamnoides* L. berries. *Ultrason. Sonochem.* **2024**, *108*, 106955. [[CrossRef](#)]
33. Vilas-Franquesa, A.; Saldo, J.; Juan, B. Potential of sea buckthorn-based ingredients for the food and feed industry—A review. *Food Prod. Process. Nutr.* **2020**, *2*, 17. [[CrossRef](#)]

34. European Commission. Commission Regulation (EU) 2023/915 setting maximum levels for contaminants in food. *Off. J. Eur. Union* **2023**, *L119*, 103–161.
35. Andersone, A.; Janceva, S.; Lauberte, L.; Zaharova, N.; Chervenkov, M.; Jurkjane, V.; Jashina, L.; Rieksts, G.; Telysheva, G. Granulated animal feed and fuel based on sea buckthorn agro-waste biomass for sustainable berry production. *Sustainability* **2023**, *15*, 11152. [[CrossRef](#)]
36. Tihauan, B.-M.; Marinaş, I.-C.; Bleotu, C.; Dolete, G.; Onisei, T.; Şerbancea, F.; Mateescu, C.; Răscol, M. Evaluation of cytotoxicity, nutritional and antioxidative status of lyophilized plant extracts used in dietary supplements. *Rom. Biotechnol. Lett.* **2021**, *26*, 2396–2405. [[CrossRef](#)]
37. Bobková, A.; Demianová, A.; Belej, L.; Harangozo, L.; Bobko, M.; Jurčaga, L.; Poláková, K.; Božiková, M.; Bilčík, M.; Árvay, J. Detection of changes in total antioxidant capacity, the content of polyphenols, caffeine, and heavy metals of teas in relation to their origin and fermentation. *Foods* **2021**, *10*, 1821. [[CrossRef](#)]
38. Benzie, I.F.F.; Strain, J.J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. *Anal. Biochem.* **1996**, *239*, 70–76. [[CrossRef](#)]
39. Pérez, M.; Domínguez-López, I.; Lamuela-Raventós, R.M. The chemistry behind the Folin–Ciocalteu method for the estimation of (poly)phenol content in food: Total phenolic intake in a Mediterranean dietary pattern. *J. Agric. Food Chem.* **2023**, *71*, 17543–17553. [[CrossRef](#)]
40. AOAC International. *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 21st ed.; AOAC International: Rockville, MD, USA, 2019.
41. *ISO 12966-2:2017*; Animal and Vegetable Fats and Oils—Gas Chromatography of Fatty Acid Methyl Esters—Part 2: Preparation of Methyl Esters of Fatty Acids. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2017.
42. *ISO 12966-4:2015*; Animal and Vegetable Fats and Oils—Gas Chromatography of Fatty Acid Methyl Esters—Part 4: Determination by Capillary Gas Chromatography. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2015.
43. Crujisen, H.; Poitevin, E.; Brunelle, S.L. Determination of minerals and trace elements in milk, milk products, infant formula, and adult nutrition: Collaborative study 2011.14 method modification. *J. AOAC Int.* **2019**, *102*, 1845–1863. [[CrossRef](#)]
44. *ISO 21424:2018*; Milk, Milk Products—Determination of Trace Elements—ICP-MS Method. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2018.
45. United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). *Method 7473: Mercury in Solids and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry*; U.S. EPA: Washington, DC, USA, 2007.

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

## Article

# Effects of Whey and Plant-Based Additives on Technological and Microbiological Characterization of Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks of Human Grade Standard

Maciej Barton<sup>1</sup> , Robert Waraczewski<sup>1</sup> , Siemowit Muszyn'ski<sup>2</sup> , Dariusz M. Stasiak<sup>1</sup>   
and Bartosz G. Sołowiej<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Department of Animal Food Technology, Faculty of Food Sciences and Biotechnology, University of Life Sciences in Lublin, Skromna 8, 20-704 Lublin, Poland; maciej.barton@up.edu.pl (M.B.); robert.waraczewski@up.edu.pl (R.W.); dariusz.stasiak@up.edu.pl (D.M.S.)

<sup>2</sup> Department of Biophysics, Faculty of Environmental Biology, University of Life Sciences in Lublin, Akademicka 13, 20-950 Lublin, Poland; siemowit.muszynski@up.edu.pl

\* Correspondence: batosz.solowiej@up.edu.pl

## Abstract

This study evaluates fermented raw-dried pork snacks enriched with plant-based functional ingredients—lion's mane (*Hericium erinaceus*), rosemary essential oil (*Rosmarinus officinalis*), rosehip (*Rosa canina*), sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*), and a hemp-derived CBD oil (*Cannabis sativa*)—produced from pork, with addition of cow sour whey and salt. We use “human grade” descriptively (compliance with human-food hygiene/microbiological requirements; no AAFCO/labeling claim). Functional enrichment modulated viscoelasticity ( $G'$ ,  $G''$ ), texture, water activity, density, and color. CBD oil softened the structure, increasing chewability and springiness, whereas TPA metrics were analyzed only for variants within the instrument range (control, CBD, rosehip). All variants reached  $a_w < 0.90$  and tested negative for *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* in 25 g. Safety inferences are limited to  $a_w$ - and pathogen-based criteria. Sea buckthorn showed the highest  $a_w$ , while rosehip displayed the highest total viable counts ( $\sim 10^8$  CFU/g); microbiological results are reported descriptively without inferential statistics. Density was the highest for lion's mane and rosehip. Proximate composition varied (e.g., higher protein with rosemary oil; higher fat/moisture with sea buckthorn) but was assessed by FoodScan™ 2 as screening-level data. Overall, selected botanicals enabled targeted structure–texture modulation without breaching predefined safety targets under the tested conditions.

**Keywords:** fermented pork meat snacks; texture profile analysis; viscoelasticity; density; microbiology; *Hericium erinaceus*; *Hippophae rhamnoides*; *Rosmarinus officinalis*; *Rosa canina*; CBD



Academic Editor: Zuhaib Bhat

Received: 30 August 2025

Revised: 6 November 2025

Accepted: 15 November 2025

Published: 19 November 2025

**Citation:** Barton, M.; Waraczewski, R.; Muszyn'ski, S.; Stasiak, D.M.; Sołowiej, B.G. Effects of Whey and Plant-Based Additives on Technological and Microbiological Characterization of Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks of Human Grade Standard. *Foods* 2025, 14, 3960. <https://doi.org/10.3390/foods14223960>

**Copyright:** © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

In recent years, the food industry has increasingly focused on developing meat products that not only satisfy nutritional requirements but also promote consumer well-being [1,2]. Among the most promising innovations in this area are fermented raw-dried meat snacks. Functional fermented meat products enriched with probiotic strains or postbiotic metabolites are increasingly explored to meet consumer demand for health-promoting foods [3].

Within this evolving landscape, the concept of “human grade” meat snacks—prepared exclusively from ingredients approved for human consumption—has gained significant

attention. Such products are valued not only for their high production standards but also for their suitability in specialized or elimination diets, where ingredient quality and safety are paramount. According to the U.S. Food and Drug Administration [4] and the Association of American Feed Control Officials (AAFCO), the “human grade” designation requires that every ingredient and the final product be manufactured in compliance with food safety standards applicable to human food, including those defined in 21 CFR Part 117. In this work, the terms human food grade and for human consumption are used descriptively to indicate that all ingredients and processing steps meet human food requirements (e.g., compliance with EU food hygiene regulations and microbiological criteria). We use ‘human food grade’ purely as a descriptive shorthand for compliance with applicable human-food laws and hygiene standards, not as a formal labeling claim.

A growing body of research highlights the benefits of enriching meat snacks with functional additives, including rosehip (*Rosa canina*), sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*), lion’s mane mushroom (*Hericium erinaceus*), rosemary essential oil (*Rosmarinus officinalis*), and cannabinoid-rich hemp oil (*Cannabis sativa*). This includes the application of polyphenol-rich extracts and vegetable powders that act as natural antioxidants and antimicrobials [5,6]. For example, rosemary extract is rich in phenolic diterpenes, such as carnosol and carnosic acid, which function as hydrogen donors in free radical chain reactions, contributing to its well-established antioxidant properties. Incorporating the above-mentioned extract led to a decrease in lipid oxidation in both raw and cooked liver pâté. Additionally, elevated levels of antioxidants—including ascorbic acid,  $\alpha$ -tocopherol, and carnosic acid—were preserved throughout [5]. Vossen et al. [7] evaluated rose (*Rosa canina* L.) in porcine frankfurter sausages to quantify key phenolic compounds—including catechins, procyanidins—and ascorbic acid. Their findings also revealed that dog rose extract was equally effective as the combined use of sodium nitrite and ascorbic acid in reducing lipid oxidation byproducts [7]. Similarly, sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) extract and fruit powder were shown to enhance oxidative stability and sensory attributes in both cooked and smoked meat products [8]. Cannabidiol (CBD) has also emerged as a potential functional ingredient in meat technology, offering dual antioxidant and antimicrobial effects [9]. In addition, *Hericium erinaceus* (Lion’s mane) has been proposed as a natural additive in the formulation of muscle foods, with studies confirming its bioactive potential to enhance oxidative stability and nutritional quality through the presence of phenolic compounds and polysaccharides [10]. Furthermore, such ingredients can also improve sensory characteristics and support clean-label product development [11,12]. These ingredients are recognized for their antimicrobial, antioxidant, and lipid-stabilizing properties, which can play a significant role in enhancing the safety, shelf life, and nutritional value of meat products [13]. Their incorporation into meat processing may also influence key quality attributes such as texture, color stability, viscoelasticity, and microbial integrity.

While previous studies have demonstrated that these functional compounds can improve oxidative stability and microbiological safety in various meat matrices [1], key questions remain unresolved for human grade fermented meat snacks: (i) the dose–response of individual botanicals (rosemary oil, lion’s mane, rosehip, sea buckthorn) on small-strain viscoelasticity ( $G'$ / $G''$ ); (ii) potential trade-offs between water activity ( $a_w$ ) and total viable counts (TVC), especially for rosehip and sea buckthorn; (iii) quantitative links between density and instrumental texture (TPA) across variants; (iv) the performance of starter-free, whey-led fermentations under controlled conditions; and (v) whether hemp-derived CBD oil (where legally permitted) acts as a texture modifier in raw-dried pork snacks. Accordingly, we hypothesized that rosemary oil and lion’s mane would yield the largest increases in  $G'$ / $G''$  versus control; rosehip and sea buckthorn would raise  $a_w$  and TVC yet remain within  $a_w$ - and pathogen-based safety targets; lion’s mane and rosehip would

increase density and align with higher hardness/cohesiveness, whereas rosemary oil and CBD oil would lower density/hardness and increase springiness a starter-free, whey-led process would meet pathogen criteria (absence of *Salmonella* spp./*L. monocytogenes* in 25 g); and CBD oil would reduce hardness and increase springiness without compromising the elastic network within the linear viscoelastic region. Addressing this gap is essential for both scientific advancement and the development of healthier, more functional food options for consumers.

Therefore, the present study was designed to evaluate the impact of selected functional ingredients on the physicochemical, rheological, textural, color, and microbiological properties of fermented raw-dried pork meat snacks produced using standardized processing technology. By investigating these aspects, this research aims to provide valuable insights into the potential of functional additives to enhance the quality and safety of human grade meat snacks.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Materials

The production of fermented raw-dried pork meat snacks began with a carefully selected blend of lean and fatty pork meat of class II quality produced at the meat processing plant “Jasiołka” (Dukla, Poland). This meat was combined with food-grade salt and fresh, unpasteurized cow sour whey, which imparted a distinct tangy flavor. The whey was sourced directly from the traditional cheesemaking process at the certified organic farm “Figa” (Waldemar and Tomasz Maziejuk, Mszana, Tylawa, Poland), ensuring both authenticity and a wealth of natural bioactive compounds. Fresh, unpasteurized sour whey was used as a natural inoculum of lactic acid bacteria (LAB); no commercial starter cultures were added. To ensure suitability for a ready-to-eat (RTE) process, each whey lot had to meet intake acceptance criteria: low pH (measured at 20 °C), absence of *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* in 25 g, low *Enterobacteriaceae*, no detectable *E. coli*, and a LAB-dominant microbiota (ISO/PN-EN ISO methods). For every 6 kg of meat mixture, common inputs (per 6 kg): salt 0.09 kg (0.15 kg/10 kg), cow sour whey 0.30 L, water 0.10 L; meat cuts: class II lean ø5 3.00 kg, class II lean 2 × ø5 1.00 kg, class II fatty ø5 2.00 kg. Variants: rosehip 0.30 kg; lion’s mane 0.30 kg; CBD oil 0.04 L (40 mL); rosemary oil 0.04 L (40 mL); sea buckthorn 0.30 kg; control = no functional additive. Shaping: sticks ~15 cm, ~2 × 2 cm cross-section before drying (smaller after drying due to shrinkage). Maturation: Stage I 7 days, 18 °C/85% RH → vacuum pack → Stage II 7 days under vacuum at ≤4 °C. Additionally, mass loss (%), calculated between the two scheduled weighings, was: Variant 1 (rosehip): 46.97%; Variant 2 (lion’s mane): 47.62%; Variant 3 (CBD): 50.00%; Variant 4 (rosemary): 50.00%; Variant 5 (sea buckthorn): 49.30%. resulting in the desired consistency and creating optimal conditions for fermentation. The recipe was further enriched with carefully chosen functional ingredients, each added in laboratory-validated amounts to guarantee both safety and efficacy. Powdered rosehip (*Rosa canina*) from the Polish company Batom (Kraków, Poland), dried sea buckthorn fruits (*Hippophae rhamnoides*) from Natura Wita (Pinczów, Poland), and BIO-certified lion’s mane mushroom powder (*Hericium erinaceus*) from Natvita (Długoleka, Poland) were incorporated into the meat mix. To enhance the antimicrobial and antioxidant properties of the product, rosemary essential oil (*Rosmarinus officinalis*) was also used (Koryciny, Poland). Additionally, a veterinary-grade CBD oil blend was used (Green Paw, Warszawa, Poland). The CBD ingredient consisted of cold-pressed Norwegian salmon oil (90%), krill oil (10%), and a hemp (fiber-type) extract (supplier-declared cannabinoids: 120 mg or 240 mg per package, batch-dependent). Analytical constituents (supplier declaration): total fats 96%, phospholipids 3.5%, omega-3 16%, EPA 7%, DHA 6%, was included to maximize the functional profile of the snacks. The

CBD-oil variant was evaluated solely for technological effects. The legal status of CBD in foods/feeds varies across jurisdictions and is not assessed in this study; any commercial deployment will follow the regulations of the target market. The CBD-oil variant was evaluated for technological effects only; its regulatory status in human foods varies by jurisdiction and is not assessed here. Throughout the process, each batch of raw materials was meticulously documented in terms of origin and certification, and every production step was carried out under rigorous quality and safety protocols. The process is not covered by any patent or patent application. This carefully prepared mixture formed the basis for the subsequent stages of fermentation and drying, ultimately yielding a product distinguished not only by its unique sensory qualities but also by its enhanced functional properties and microbiological safety.

### Technological Procedure

The entire production process of the fermented, raw-dried pork meat snacks was carefully standardized to ensure consistency across all experimental variants. At the outset, all raw materials including the selected cuts of pork, salt, whey, and the chosen functional ingredients—were precisely weighed. These components were then thoroughly combined, using a small-scale laboratory paddle mixer (Robot Coupe, Stalgast, Radom, Poland), to achieve a uniform blend. Once the mixture reached the desired consistency, it was portioned and shaped by hand into slender, sausage-like sticks, each measuring about 15 cm in length. Their round profile and size closely resembled traditional dry kabanos sausages, lending the snacks a familiar and appealing appearance. The maturation process was thoughtfully divided into two distinct stages to closely replicate conditions found in industrial fermentation. Shaping and two-stage maturation. Sticks (~15 cm length;  $\sim 2 \times 2$  cm cross-section before drying) were matured in two stages. Stage I: 7 days at 18 °C/85% RH (static air; no smoking; no casing—hand-formed, uncased sticks). After Stage I, products were vacuum-packed (PA/PE pouches; ~99% vacuum). Stage II: 7 days under vacuum at  $\leq 4$  °C (refrigerated hold; air speed and RH not applicable due to vacuum packaging; no smoking). Total process duration: 14 days from shaping to the end of Stage II. Over the course of seven days, these conditions promoted the initial fermentation, allowing beneficial microorganisms to flourish, while the flavors and textures began to develop.

### 2.2. Viscoelastic Properties

The viscoelastic properties of fermented raw-dried pork meat snacks ( $\text{Ø}10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ) were assessed using a Kinexus lab+ rheometer (Malvern Panalytical, Cambridge, UK), equipped with serrated stainless-steel parallel plates (PU40X SW1382 SS and PLS40X S2222 SS, Malvern Panalytical, Cambridge, UK) in a plate-to-plate configuration with a gap—2.8 mm. Measurements were performed at a constant temperature of 21 °C. A strain amplitude sweep was initially conducted to determine the linear viscoelastic region (LVR) of the tested samples, and the final measurements were performed at a strain of 5%, within the LVR. The storage modulus ( $G'$ ) and loss modulus ( $G''$ ) were recorded at a constant frequency of 1 Hz. All measurements were performed in triplicate using rSpace software (version 2.2).

### 2.3. Texture Profile Analysis (TPA)

Texture profile analysis was conducted using a TA.XTplus texture analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, UK) equipped with a cylindrical stainless-steel probe (SMSP/36R). The samples, conditioned to room temperature, were compressed twice to 50% of their original height in order to simulate mastication. The measurements were performed on cylindrical snack-shaped bars with a diameter and height of 10 mm. The compression test was carried out at a test speed of 5 mm/s. From the resulting force–time curves, five pa-

parameters were determined: hardness, springiness, which describes the ability of the sample to return to its original shape after deformation; cohesiveness, calculated as the ratio of the work done during the second compression to that of the first; gumminess, as the product of hardness and cohesiveness; and chewiness, calculated as the product of gumminess and springiness. These measurements enabled a detailed assessment of the mechanical and structural characteristics of the pork meat snacks enriched with functional additives. Five measurements were performed. Effect size (Cohen's *d*) was calculated for parameters measured within the instrument range to estimate the magnitude of the difference between each variant and the control. Cohen's *d* values were computed as the difference between the group means divided by the pooled standard deviation and interpreted according to standard thresholds (small = 0.2–0.5, medium = 0.5–0.8, large > 0.8).

#### 2.4. Color Measurement

Color measurements were conducted using the CR-221 Chroma Meter from Minolta (Osaka, Japan) according to Sołowiej et al. [14]. This device employs a 45° circumferential illumination and a 0° viewing angle, with an aperture size of 3 mm in diameter and a D65 light source powered by a pulsed xenon lamp. The color scale used for these measurements was the CIE Lab (CIE Lab\*) system, established by the Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).

#### 2.5. Water Activity

The Aqua Lab 3 TE water activity meter (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA) was used to measure water activity ( $a^w$ ) with a precision of  $\pm 0.001 a^w$  units. Prior to conducting the measurements, the device was calibrated using the Rotronic humidity standard set at 95% relative humidity. Five replications were performed at a temperature of 22 °C according to Szafran'ska et al. [15].

#### 2.6. Nutritional Composition

The proximate composition of the samples, including moisture, protein, fat, and ash content, was determined using a FoodScan™ 2 analyzer (Foss, Hillerød, Denmark), based on Near-Infrared Transmission Spectroscopy (NIT). Samples were homogenized and placed into glass sample cells prior to analysis. Measurements were taken in duplicate for each variant. The FoodScan method provided rapid, standardized, and reproducible data on the nutritional composition of both control and enriched snack variants. Analyses were performed in duplicate for each variant, and results are reported as mean  $\pm$  SD with statistically significant differences ( $p < 0.05$ ). The FoodScan™ 2 analyzer operated with the vendor's calibration for meat/sausage products. Because the matrix includes plant powders and essential oils, matrix effects are possible; therefore, proximate results are interpreted as screening estimates for relative comparisons between variants. No additional reference-method verification was conducted in this series.

#### 2.7. Density Measurement

Density of samples was measured with a gas pycnometer (He/N<sub>2</sub>) (AccuPyc 1330; Micromeritics, Norcross, GA, USA) with a 10 cc metal sample cylinder at a temperature of 22 °C [15]. Before each session, the instrument was calibrated with a traceable volume standard. Prior to analysis, the cylinder was filled two-thirds with the sample, and the weight was recorded and entered into the analysis mode. The measurement cycle parameters were set as follows: four purges at 18,000 psig, four cycles per sample at 18,000 psig, and an equilibration rate of 0.05 psig/min. Three repetitions were performed.

## 2.8. Microbiological Analysis

Microbiological safety of the fermented pork meat snacks was assessed by an accredited external laboratory (ALAB, Warsaw, Poland), following ISO and PN-EN ISO standards. The scope of analysis included: detection of *Salmonella* spp. in 25 g according to PN-EN ISO 6579-1:2017-04 +A1:2020-09 [16], detection of *Listeria monocytogenes* in 25 g according to PN-EN ISO 11290-1:2017-07 [17], enumeration of total aerobic mesophilic bacteria according to PN-EN ISO 4833-1:2013-12 +A1:2022-06 [18], enumeration of yeasts and molds according to PN-ISO 21527-2:2009 [19], enumeration of *Enterobacteriaceae* at 37 °C according to PN-EN ISO 21528-2:2017-08 [20], enumeration of  $\beta$ -glucuronidase-positive *Escherichia coli* according to PN-ISO 16649-2:2004 [21], enumeration of presumptive *Bacillus cereus* at 30 °C according to PN-EN ISO 7932:2005 +A1:2020-09 [22] (excluding point 9.5), enumeration of presumptive *Pseudomonas* spp. according to PN-EN ISO 13720:2010 [23]. All microbiological analyses were conducted under accredited conditions. Results were expressed in colony-forming units per gram (CFU/g), including measurement uncertainty ranges where applicable, and interpreted for food safety evaluation of dry-cured fermented meat products. All microbiological tests were performed after completion of Stage II (day 14) on samples vacuum-packed (PA/PE; ~99% vacuum) and stored at  $\leq 4$  °C throughout Stage II. Unless otherwise stated, sampling occurred immediately after Stage II.

## 2.9. Statistical Analysis

All measurements were subjected to statistical analysis using one-way analysis of variance (ANOVA) to determine the effect of the functional additives on the measured parameters. Post Hoc comparisons were performed using Tukey's HSD test at a significance level of  $\alpha = 0.05$ . The data were expressed as mean values  $\pm$  standard deviation. Statistical analyses were conducted using Statistica PL software, version 13.0 (StatSoft, Kraków, Poland). Products were manufactured in duplicate per variant (biological  $n = 2$ ); technical replicates per variant: rheology  $n = 6$ , TPA  $n = 10$ , color  $n = 10$ , water activity  $n = 10$ , density  $n = 6$ , proximate composition  $n = 4$ . Microbiological counts (CFU/g) are reported descriptively; where explored statistically, data were  $\log_{10}$ -transformed, with non-detects set to  $0.5 \times \text{LOD}$  prior to transform. TPA overloads  $\text{nd} > 325$  N were treated as right-censored and excluded from ANOVA for hardness, cohesiveness, springiness, adhesiveness, and chewiness.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. Viscoelastic Properties ( $G'$ and $G''$ )

Fermented pork meat snacks enriched with functional ingredients showed significant modifications in their viscoelastic behavior compared to the control sample (Table 1).

**Table 1.** Viscoelastic properties ( $G'$  and  $G''$ ) of fermented pork meat snacks enriched with functional ingredients.

Sample	$G'$ (Pa)	$G''$ (Pa)
Control	3341 $\pm$ 211 <sup>a</sup>	531 $\pm$ 34 <sup>a</sup>
Lion's mane	7562 $\pm$ 347 <sup>c</sup>	1221 $\pm$ 59 <sup>c</sup>
CBD oil	6114 $\pm$ 310 <sup>b</sup>	1013 $\pm$ 51 <sup>b</sup>
Rosemary oil	7895 $\pm$ 329 <sup>c</sup>	1294 $\pm$ 66 <sup>c</sup>
Sea buckthorn	7455 $\pm$ 292 <sup>c</sup>	1186 $\pm$ 47 <sup>c</sup>
Rosehip	6274 $\pm$ 298 <sup>b</sup>	1065 $\pm$ 44 <sup>b</sup>

Values are means  $\pm$  standard deviation. Different superscript letters (<sup>a-c</sup>) within a column indicate statistically significant differences ( $p < 0.05$ ). Variants marked with the same letter do not differ significantly.

In all cases, the storage modulus ( $G'$ ) exceeded the loss modulus ( $G''$ ), confirming a predominantly elastic, gel-like network typical for stable dry-cured meat products [24,25]. The control sample exhibited the lowest  $G'$  value ( $3341 \pm 211$  Pa), serving as the reference point. The rosemary, lion's mane, and sea buckthorn variants all showed significantly higher  $G'$  values compared with the control; however, no significant differences were observed among these three variants ( $p > 0.05$ ). Rosemary contains carnosic and rosmarinic acids, which can form covalent and strong non-covalent bonds with myofibrillar proteins, thus tightening the protein matrix and increasing rigidity [25]. These compounds are believed to act as natural cross-linkers that reinforce the gel network through polyphenol–protein interactions [25,26]. Lion's mane provides  $\beta$ -glucans and protein-bound polysaccharides that may engage in hydrogen bonding and reinforce the meat matrix [26,27]. These polysaccharides may form secondary gel structures that support and strengthen the primary protein gel, similar to whey–mushroom composite hydrogels [26]. Sea buckthorn is rich in phenolic compounds and ascorbic acid, both known to enhance gel strength via protein–polyphenol interactions [25,28]. In addition, its high content of flavonoids, carotenoids, and organic acids likely contributes to increased cross-linking density within the gel matrix [28,29]. CBD oil and rosehip showed more moderate increases in  $G'$  ( $6114 \pm 310$  Pa and  $6274 \pm 298$  Pa, respectively). The plasticizing effect of the salmon- and krill-oil carriers in the CBD formulation likely tempered excessive network tightening while still enabling functional interactions between CBD and proteins [30]. Rosehip pectins may have contributed to improved gel cohesion by forming hydrogen bonds with the protein matrix, resulting in a more flexible yet stable structure [31,32]. Moreover, polyphenol–protein interactions have been shown to improve gel strength and structural integrity in myofibrillar matrices; for example, Guo et al. [33] demonstrated that polyphenol–myofibrillar protein complexes (e.g., tannic acid, catechin) in coregonus peled enhanced gelation and increased both  $G'$  and  $G''$  [33]. The rosemary, lion's mane, and sea buckthorn variants all showed significantly higher  $G''$  values compared with the control however no significant differences were observed among these three variants ( $p > 0.05$ ). This indicates that all three functional ingredients enhanced the viscous component of the gel-like network, improving its ability to dissipate mechanical energy during handling or chewing [34,35]. Lion's mane and sea buckthorn followed closely ( $1221 \pm 59$  Pa and  $1186 \pm 47$  Pa, respectively), while rosehip and CBD variants showed intermediate  $G''$  values, supporting their balanced chewiness profile [36]. These viscoelastic enhancements may be attributed to several co-occurring mechanisms. First, phenolic–protein cross-linking—especially from tannins in rosemary, sea buckthorn, and rosehip—can lead to covalent C–N or C–S bonds with lysine and cysteine residues, thereby increasing gel rigidity [37]. Additionally, changes in starch–protein interactions and network microstructure may also contribute to modified gel behavior [38]. Second, the antioxidant activity of polyphenols helps prevent oxidative degradation of myofibrillar proteins, preserving their structural integrity and favoring stronger network formation [39,40]. Third, polysaccharides such as lion's mane  $\beta$ -glucans and rosehip pectins act as structural fillers that bridge protein strands and entrap water, thereby improving network stability [25,37]. Finally, long-chain n-3 and n-6 fatty acids in the CBD formulation act as plasticizers, enhancing protein chain mobility and increasing springiness without excessive stiffness [30]. From a technological perspective, increased  $G'$  and  $G''$  values improve sliceability, reduce the risk of breakage during packaging, and enhance structural integrity under vacuum storage conditions [24,41]. It is also important to investigate the long-term stability of viscoelastic properties during extended storage.

### 3.2. Texture Profile Analysis (TPA) Results

The texture characteristics of raw-dried pork meat snacks supplemented with functional ingredients showed statistically significant variation versus the control. As reported in Table 2, three variants (lion's mane, rosemary oil, sea buckthorn) exceeded the instrument's capacity ( $nd > 325$  N) under the preset TPA configuration, and thus hardness and derived metrics (gumminess, chewiness) for these variants are right-censored and not used for comparative inference. For the variants measured within range, CBD oil and rosehip showed lower hardness than the control and higher springiness/cohesiveness, indicating a more elastic response based on instrument-derived parameters. Any mechanism for the overloaded variants is not inferred here; quantitative TPA values for those arms will be addressed in follow-up measurements using a capacity-controlled method. While slightly increasing springiness and cohesiveness (Table 2), indicating greater elastic recovery under instrumental compression.

**Table 2.** Texture profile analysis (TPA) of fermented pork meat snacks enriched with functional ingredients.

Sample	Hardness (N)	Chewiness (N·s)	Springiness (%)	Cohesiveness	Adhesiveness (N·s)
Control	205.0 ± 20.0 <sup>c</sup>	526 <sup>93</sup> <sup>b</sup>	19.5 ± 1.0 <sup>a</sup>	0.157 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.11 ± 0.02 <sup>a</sup>
Lion's mane	Nd	nd ±	Nd	nd	nd
CBD oil	132.3 ± 10.9 <sup>a</sup>	428 ± 74 <sup>a</sup>	22.1 ± 1.2 <sup>b</sup>	0.165 ± 0.003 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>a</sup>
Rosemary oil	Nd	nd	Nd ±	nd	nd
Sea buckthorn	Nd	nd	Nd	nd	nd
Rosehip	171.8 ± 13.5 <sup>b</sup>	472 ± 81 <sup>ab</sup>	20.8 ± 1.1 <sup>b</sup>	0.163 ± 0.003 <sup>b</sup>	0.10 ± 0.02 <sup>a</sup>

Values are means ± standard deviations. 'nd' indicates values not determined due to instrument overload ( $>325$  N).  $nd > 325$  N: exceeded instrument capacity in the preset TPA configuration; excluded from ANOVA for hardness and hardness-derived metrics (gumminess, chewiness). Superscripts (<sup>a</sup>, <sup>b</sup>, <sup>c</sup>) denote Tukey's HSD groupings at  $\alpha = 0.05$  for parameters measured within range. Effect sizes (Cohen's  $d$  vs. control, within-range variants):

- Hardness: CBD − 4.51; Rosehip − 1.95;
- Springiness: CBD + 2.35; Rosehip + 1.18;
- Cohesiveness: CBD + 2.26; Rosehip + 1.70;
- Chewiness: CBD − 1.17; Rosehip − 0.62;
- Adhesiveness: CBD − 1.26; Rosehip − 0.50.

These extreme values likely reflect the development of a compact and rigid protein–polyphenol matrix, aligning with earlier studies that highlight the capacity of polyphenolic compounds to engage in covalent interactions with muscle proteins. Such interactions, especially with amino and thiol groups, are reported to form covalent or non-covalent complexes, potentially influencing protein structure and stability [25,42]. The enhanced hardness observed in these functionalized samples may also stem from the presence of tannins—high-molecular-weight polyphenols known for their ability to form protein cross-links. In parallel, functional additives rich in dietary fiber appear to modulate mechanical behavior by directly interacting with myofibrillar proteins. Research confirms that such fibers can enhance gel network stability and water-holding capacity in meat protein gels [37,43]. The textural response varied by additive. CBD and rosehip exhibited higher cohesiveness than the control ( $p < 0.05$ ) and did not differ from each other (Table 2), whereas the control showed the highest chewiness among the variants measured within instrument range. The modest increase in cohesiveness observed for rosehip is consistent with its content of dietary fiber and pectins, which can support gel network continuity and internal bonding in meat matrices [32,43–45]. In contrast, chewiness—being hardness-derived—was greatest in the control; therefore, we do not attribute increased chewiness to rosehip. For variants that exceeded capacity ( $nd > 325$  N), we refrain from comparative inference on

hardness-derived metrics. Pectins, as soluble fiber fractions, are especially valued for their gelling properties and emulsifying functions, both of which may contribute to improved cohesiveness and chewiness [46,47]. In contrast, the CBD oil (*Cannabis sativa*)-enriched variant was distinguished by the highest springiness, indicating a strong capacity for shape recovery following deformation. This behavior may be linked to the emollient nature of the oils present in the CBD extract, which could soften the protein matrix and improve product flexibility. Plant-derived oils—particularly those rich in unsaturated fatty acids—are known to influence meat texture by altering hydrophobic interactions within the protein network [48,49]. Moreover, polyphenol-rich ingredients may further affect the spatial configuration of protein molecules via covalent and non-covalent interactions, ultimately modifying the mechanical properties of the finished product [25]. The findings presented here demonstrate that each functional additive contributed distinctively to the mechanical and structural profile of the meat snacks, allowing for targeted modifications in texture, chewability, and sensory attributes. This variability emphasizes the complex interplay between functional ingredients and the protein matrix in fermented meat products [27,50]. No sensory evaluation was performed in this study; therefore, no claims about palatability are made. Future work will include trained-panel to corroborate instrumental findings

### 3.3. Color Parameters

Instrumental color measurements ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) were used to assess the appearance of both the internal and surface parts of dried, fermented raw-dried pork meat snacks enriched with functional additives (Table 3).

**Table 3.** Instrumental color values ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) of the inside and surface of fermented raw-dried pork meat snacks.

Sample	$L^*$ (Inside)	$a^*$ (Inside)	$b^*$ (Inside)	$L^*$ (Outside)	$a^*$ (Outside)	$b^*$ (Outside)
Control	46.82 ± 4.31 <sup>b</sup>	4.52 ± 2.51	9.03 ± 2.35 <sup>b</sup>	34.10 ± 3.05 <sup>a</sup>	3.98 ± 1.10	6.80 ± 1.90 <sup>b</sup>
Lion's mane	38.13 ± 7.23 <sup>a</sup>	4.68 ± 1.31	10.67 ± 1.95 <sup>b</sup>	29.50 ± 0.98 <sup>a</sup>	3.51 ± 0.63	6.33 ± 1.39 <sup>a</sup>
CBD oil	34.37 ± 2.51 <sup>a</sup>	3.81 ± 0.98	3.33 ± 0.99 <sup>a</sup>	33.89 ± 4.22 <sup>a</sup>	3.26 ± 0.66	5.15 ± 1.51 <sup>a</sup>
Rosemary oil	37.04 ± 5.29 <sup>a</sup>	4.69 ± 1.51	4.20 ± 1.69 <sup>a</sup>	31.45 ± 1.94 <sup>a</sup>	2.54 ± 1.34	3.16 ± 1.37 <sup>a</sup>
Sea buckthorn	32.50 ± 3.98 <sup>a</sup>	3.66 ± 1.12	5.05 ± 0.86 <sup>a</sup>	30.79 ± 1.01 <sup>a</sup>	3.56 ± 0.67	4.44 ± 0.99 <sup>a</sup>
Rosehip	36.42 ± 2.09 <sup>a</sup>	6.55 ± 2.42	16.67 ± 5.46 <sup>c</sup>	35.14 ± 2.69 <sup>a</sup>	5.26 ± 1.24	10.06 ± 2.92 <sup>b</sup>

Values are expressed as mean ± standard deviation. Different superscript letters within a column indicate statistically significant differences ( $p < 0.05$ ; Tukey's test). Superscript letters were omitted for parameters showing no significant differences ( $p > 0.05$ ). A statistical trend ( $0.05 < p \leq 0.10$ ) would be indicated by the corresponding  $p$ -value if observed, but no such trend occurred in this dataset.

The control sample exhibited the highest internal lightness ( $L^*$ )—46.82 ± 4.31, which was significantly higher ( $p < 0.05$ ) than all enriched variants. Samples containing *Hericium erinaceus* (lion's mane mushroom) and rosemary oil showed moderate  $L^*$  values, while the lowest lightness was observed in the sea buckthorn and CBD variants, indicating a darker coloration of the interior. This darkening is attributed to the presence of phenolic compounds in the plant-based additives, which may interact with myoglobin and muscle proteins, forming pigment–protein complexes that limit oxidation [25]. The  $a^*$  (redness) parameter did not differ significantly among variants ( $p > 0.05$ ); however, the rosehip sample showed a numerically higher mean  $a^*$ , consistent with the presence of carotenoid/anthocyanin pigments in *Rosa canina* [32,51]. However, these differences were not statistically significant, indicating that the addition of functional ingredients did not markedly influence redness in the final product. This increase may be associated with the presence of plant-derived pigments such as anthocyanins and carotenoids, which are abundant in *Rosa canina* fruits [32] and have been highlighted for their functional potential in the formulation of healthier fermented meat products [51]. In the other variants (sea buck-

thorn, CBD, rosemary, lion's mane), lower  $a^*$  values may reflect the presence of pigments with lower chromatic intensity, such as flavonoids or chlorophyll derivatives [52]. The  $b^*$  parameter (yellowness–orange) also showed significant differences among the samples ( $p < 0.05$ ). The highest  $b^*$  value was recorded for the wild rose variant, contributing to an intense orange coloration consistent with its known pigment profile [32]. In contrast, rosemary oil and CBD variants showed the lowest  $b^*$  values, indicating a limited content of chromophoric compounds. Surface color was less variable— $L^*$  values did not differ significantly, although samples with lion's mane and seabuckthorn showed slightly lower lightness compared to the control [53]. Surface  $a^*$  and  $b^*$  parameters were stable, except for an increased  $b^*$  value in the wild rose sample, consistent with its rich pigment profile. The observed differences in color parameters ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) may result not only from the presence of pigments and phenolic compounds in the functional additives, but also from microstructural changes in the protein matrix induced by fermentation and interactions with plant polysaccharides. While LAB fermentation affects pigment stability and oxidative processes [53], plant-derived polysaccharides are known to enhance protein–polysaccharide network formation, which may indirectly influence light scattering and internal color perception [54]. CIE Lab\* values may also be influenced by the intrinsic color and dosage of the additives; in this series, we did not measure the CIELab of the additives themselves.

### 3.4. Water Activity Results

The introduction of functional ingredients into fermented pork meat snacks resulted in noticeable changes in water activity ( $a_w$ ) compared to the control sample (Table 4).

**Table 4.** Water activity ( $a_w$ ) of fermented raw-dried pork meat snacks enriched with functional ingredients.

Sample	Water Activity ( $a_w$ )
Control	$0.679 \pm 0.000$ <sup>a</sup>
Lion's mane	$0.805 \pm 0.002$ <sup>b</sup>
CBD oil	$0.800 \pm 0.002$ <sup>b</sup>
Rosemary oil	$0.789 \pm 0.005$ <sup>b</sup>
Sea buckthorn	$0.826 \pm 0.007$ <sup>c</sup>
Rosehip	$0.796 \pm 0.010$ <sup>b</sup>

Values are expressed as mean  $\pm$  standard deviation. Different superscript letters within a column indicate statistically significant differences ( $p < 0.05$ ; Tukey's test).

Water activity is a key factor in determining the microbiological safety and shelf life of dry-cured meat products, as lower  $a_w$  values are essential for inhibiting the growth of spoilage and pathogenic microorganisms [36,55]. In this study, the control sample showed the lowest water activity ( $0.679 \pm 0.000$ ), confirming its high microbiological stability and making it an ideal reference point. Among the snacks enriched with functional ingredients, the sea buckthorn variant had the highest  $a_w$  value ( $0.826 \pm 0.007$ ). This was followed by samples with lion's mane ( $0.805 \pm 0.002$ ), CBD oil ( $0.800 \pm 0.002$ ), rosehip ( $0.796 \pm 0.010$ ), and rosemary oil ( $0.789 \pm 0.005$ ). Although the  $a_w$  values in these enriched variants were higher than in the control, all remained below the commonly accepted threshold of 0.90 for fermented products, which is considered microbiologically safe [56,57]. We therefore treat the obtained  $a_w$  values as an indicator supportive of stability; however, without concurrent pH data we do not draw categorical conclusions regarding safety. The elevated  $a_w$  observed in some enriched snacks, especially the sea buckthorn variant, can be attributed to the hygroscopic properties of plant-derived polysaccharides and organic acids [46]. Drying, fermentation, and salt addition contribute to improved water-binding capacity of the meat matrix, thereby supporting texture and microbial stability [58]. While these changes do not compromise product safety, they highlight the need for careful formulation to maintain

product stability. Water activity ( $a^w$ ) values are reported as mean  $\pm$  SD for each variant; all enriched samples remained below 0.90. These results are consistent with previous reports emphasizing the importance of maintaining water activity within safe limits when enriching meat products with functional ingredients [59]. Ultimately, while functional enrichment brings clear benefits, it requires a thoughtful approach to ensure both product safety and high quality.

### 3.5. Nutritional Composition of Functional Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks Results

The addition of functional ingredients to fermented raw-dried pork meat snacks caused noticeable changes in their nutritional profile compared to the control sample (Table 5).

**Table 5.** Nutritional composition of functional fermented raw-dried pork meat snacks results.

Sample	Protein [%]	Fat [%]	Moisture [%]	Collagen [%]
Control	40.50 $\pm$ 0.21 <sup>d</sup>	19.50 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	31.00 $\pm$ 0.17 <sup>ab</sup>	0.95 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>
Lion's mane	34.93 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>	15.48 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	31.37 $\pm$ 0.13 <sup>bc</sup>	1.07 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
CBD oil	36.43 $\pm$ 0.11 <sup>c</sup>	24.87 $\pm$ 0.16 <sup>c</sup>	31.76 $\pm$ 0.14 <sup>c</sup>	1.07 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
Rosemary oil	46.72 $\pm$ 0.17 <sup>f</sup>	17.59 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	30.45 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	1.07 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
Sea buckthorn	24.14 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	31.52 $\pm$ 0.17 <sup>d</sup>	35.96 $\pm$ 0.16 <sup>e</sup>	1.07 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
Rosehip	45.08 $\pm$ 0.20 <sup>e</sup>	15.79 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	32.55 $\pm$ 0.14 <sup>d</sup>	1.07 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>

Values are expressed as mean  $\pm$  standard deviation. Different superscript letters within a column indicate statistically significant differences ( $p < 0.05$ ; Tukey's test). The remaining percentage to 100% corresponds to ash, carbohydrates, and dietary fiber. The lower total observed in the Lion's mane variant reflects its high polysaccharide and  $\beta$ -glucan content, which contributes to non-protein, non-lipid dry matter.

Key physicochemical parameters such as protein, fat, moisture and collagen content were evaluated. Among the enriched variants, the highest protein content was recorded in the sample with rosemary oil (46.72%), followed by wild rose (45.08%) and the control sample (40.5%). The lowest protein level was found in the sea buckthorn snack (24.14%), which may result from its high lipid and moisture content, diluting the protein share in the product mass [60]. The Lion's mane variant showed a noticeably lower total macronutrient sum ( $\approx 82\%$ ), compared to 91–95% in the other samples. This difference likely stems from the high content of  $\beta$ -glucans, dietary fiber, and structural polysaccharides naturally present in *Hericium erinaceus*, which contribute to the dry matter fraction not represented by protein, fat, or moisture. These results are consistent with previous reports indicating that plant additives can significantly alter macronutrient proportions, especially due to the presence of polysaccharides or plant fats. Fat content ranged from 15.48% (lion's mane mushroom) to 31.52% (sea buckthorn). The control sample contained 19.5% fat. The higher fat content observed in the sea buckthorn snack (31.52%) may be attributed to the natural lipid composition of the berries. Sea buckthorn seeds contain approximately 7–11% oil, while the fruit pulp contains 1.5–3.5%, rich in unsaturated fatty acids such as linoleic,  $\alpha$ -linolenic, and palmitoleic acids [61]. Moisture content was highest in the sea buckthorn sample (35.96%) and lowest in the rosemary snack (30.45%), reflecting the impact of plant additive structure on water binding and drying processes [62]. Collagen content stayed at a similar level ( $\approx 1.07\%$ ) in all enriched samples, with a slightly lower value in the control sample (0.95%), suggesting that functional ingredients did not influence overall collagen content or the structural stability of connective tissue [63].

### 3.6. Density of Functionally Enriched Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks

The inclusion of plant-based functional ingredients clearly influenced the density of fermented meat snacks compared to the control sample (Table 6).

**Table 6.** Density of functional fermented raw-dried pork meat snacks.

Sample	Density $\pm$ SD (g/cm <sup>3</sup> )
Control	1.1950 $\pm$ 0.0091 <sup>a</sup>
Lion's mane	1.5216 $\pm$ 0.0424 <sup>c</sup>
CBD oil	1.1732 $\pm$ 0.0068 <sup>a</sup>
Rosemary oil	1.1624 $\pm$ 0.0118 <sup>a</sup>
Sea buckthorn	1.2150 $\pm$ 0.0120 <sup>b</sup>
Rosehip	1.2184 $\pm$ 0.0028 <sup>b</sup>

Values are means  $\pm$  standard deviations. Different superscript letters indicate statistically significant differences ( $p < 0.05$ ; Tukey's test).

Density is a key technological parameter in matured products, as it reflects the internal compactness and the meat matrix's ability to retain water. The control sample exhibited a density of  $1.1950 \pm 0.0091$  g/cm<sup>3</sup>, serving as a reference point for evaluating textural changes. Among the enriched variants, the lion's mane sample showed the highest density ( $1.5216 \pm 0.0424$  g/cm<sup>3</sup>;  $p < 0.05$  Vs. All others). Rosehip ( $1.2184 \pm 0.0028$  g/cm<sup>3</sup>) and sea buckthorn ( $1.2150 \pm 0.0120$  g/cm<sup>3</sup>) did not differ significantly from each other (both 'b') and were higher than the control, CBD oil, and rosemary oil groups (all 'a'). This suggests increased structural compactness and potential changes in protein-water interactions. Studies suggest that textural modifications in systems enriched with mushrooms or plant-derived ingredients may result from the formation of fibrous structures by fungal components and the water-binding capacity of plant polysaccharides (e.g., pectins or  $\beta$ -glucans). These mechanisms may be further enhanced by microbial fermentation, which modifies the functional properties of carbohydrates [64]. On the other hand, samples enriched with CBD oil ( $1.1732 \pm 0.0068$  g/cm<sup>3</sup>) and rosemary oil ( $1.1624 \pm 0.0118$  g/cm<sup>3</sup>) exhibited densities lower than or similar to the control sample. This may be due to the "loosening" effect of lipid ingredients on the meat matrix. These differences are consistent with current reports on the impact of plant bioactive compounds and oils on the physicochemical structure of meat and its analogs [65]. Notably, sea buckthorn ( $1.2150 \pm 0.0120$  g/cm<sup>3</sup>) also showed increased density, which can be attributed to the binding properties of its organic acids and fiber [66]. In summary, these observations confirm that functional enrichment can modify the density of meat snacks through changes in protein network formation, water binding, and structural compaction [67]. Therefore, the appropriate selection and formulation of such ingredients are crucial for optimizing the texture and sensory qualities of the product.

### 3.7. Microbiological Quality and Safety of Functional Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks

The microbiological evaluation of fermented raw-dried pork meat snacks enriched with various functional ingredients revealed notable differences in microbial populations between the analyzed samples (Table 7). Despite these variations, all products complied with the microbiological safety criteria for ready-to-eat fermented meat products, including the absence of *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* in 25 g of product, as required by EU legislation [68]. This confirms that the use of functional plant additives did not compromise food safety, and no presence of *Salmonella* spp. or *Listeria monocytogenes* was detected in any sample. In subsequent series, we plan to expand the panel to include quantitative determination of *L. monocytogenes* (PN-EN ISO 11290-2), coagulase-positive staphylococci, and biogenic amines, as well as pH profiling, water-phase salt (WPS), and aw monitoring over storage. In addition, we envisage challenge tests with relevant pathogens and a shelf-life study under varying conditions (temperature, vacuum/MAP packaging), which will enable us to verify the  $\leq 100$  CFU/g criterion for *L. monocytogenes* at end of shelf life and provide a more comprehensive assessment of safety and regulatory compliance. The total viable count (TVC) ranged from  $6.5 \times 10^6$  CFU/g in the control to  $1.6 \times 10^8$  CFU/g in

the rosehip variant. Given that LAB were not enumerated nor identified at species level in this study, we report TVC and other counts descriptively and refrain from attributing differences to specific ingredients or to beneficial LAB. Prior reports indicate that plant additions such as rosehip or sea buckthorn can influence fermentation performance and microbial viability in dairy and meat systems; these references are cited for context rather than as confirmation in our matrix [69–71]. Essential oils (e.g., rosemary) are widely documented to have antimicrobial/antioxidant effects in dry-fermented sausages [13]; in our dataset, *Enterobacteriaceae* counts were lowest in the rosemary variant ( $1.1 \times 10^2$  CFU/g) and highest in rosehip ( $2.9 \times 10^3$  CFU/g), but causality cannot be inferred from these associations. It is also recognized that elevated TVC in fermented products does not necessarily indicate spoilage when LAB dominate [72]; however, LAB dominance was not verified here. *Pseudomonas* spp. were undetectable or low across variants, with the highest value observed in sea buckthorn ( $7.8 \times 10^3$  CFU/g). Yeasts and molds ranged from  $1.8 \times 10^3$  to  $1.1 \times 10^4$  CFU/g, with numerically higher values in rosehip and sea buckthorn variants. Modern interventions described in the literature—such as selected essential oils, competitive flora, high pressure, or pulsed electric fields—may enhance safety and suppress pathogens in fermented meats; these approaches are noted as general context and were not applied in this study [73]. While often viewed as spoilage organisms, in controlled fermentation systems, certain molds and yeasts—such as *Penicillium nalgiovense* and *Debaryomyces hansenii*—can positively influence flavor, appearance, and surface properties of fermented meat products [74,75]. Their use in probiotic starter cultures is gaining ground, promoting both shelf-life and health benefits [76]. Pathogens like *Escherichia coli* and *Bacillus cereus* remained below detection or at very low levels, underscoring good manufacturing practices. Overall, functional enrichment—if guided by hygienic controls and thoughtful formulation—does not compromise microbiological safety. Emerging trends point to the integration of bioinformatics and metabolomics in designing next-generation starter cultures and monitoring biogenic amines, flavor development, and safety parameters during meat fermentation [77].

**Table 7.** Microbiological profile of raw-dried fermented raw-dried pork meat snacks at the end of Stage II (day 14; vacuum-packed,  $\leq 4$  °C).

Parameter\Sample	Control	Lion's Mane	CBD Oil	Rosemary Oil	Sea Buckthorn	Rosehip
Total viable count (TVC)	$6.5 \times 10^6$ [ $3.5 \times 10^6$ – $1.2 \times 10^7$ ]	$3.8 \times 10^7$ [ $2.0 \times 10^7$ – $7.2 \times 10^7$ ]	$3.6 \times 10^7$ [ $1.9 \times 10^7$ – $6.9 \times 10^7$ ]	$8.9 \times 10^6$ [ $4.9 \times 10^6$ – $1.6 \times 10^7$ ]	$4.2 \times 10^7$ [ $2.2 \times 10^7$ – $8.0 \times 10^7$ ]	$1.6 \times 10^8$ [ $9.0 \times 10^7$ – $2.8 \times 10^8$ ]
Yeasts and molds	$3.7 \times 10^3$ [ $1.9 \times 10^3$ – $7.4 \times 10^3$ ]	$1.8 \times 10^3$ [ $9.7 \times 10^2$ – $3.4 \times 10^3$ ]	$2.2 \times 10^3$ [ $1.2 \times 10^3$ – $4.1 \times 10^3$ ]	$2.8 \times 10^3$ [ $1.4 \times 10^3$ – $5.7 \times 10^3$ ]	$9.9 \times 10^3$ [ $5.2 \times 10^3$ – $1.9 \times 10^4$ ]	$1.1 \times 10^4$ [ $5.8 \times 10^3$ – $2.1 \times 10^4$ ]
<i>Enterobacteriaceae</i> (37 °C)	$<4.0 \times 10^1$	$6.9 \times 10^2$ [ $3.6 \times 10^2$ – $1.3 \times 10^3$ ]	$2.6 \times 10^3$ [ $1.3 \times 10^3$ – $5.3 \times 10^3$ ]	$1.1 \times 10^2$ [ $4.7 \times 10^1$ – $2.6 \times 10^2$ ]	$1.5 \times 10^3$ [ $6.9 \times 10^2$ – $3.3 \times 10^3$ ]	$2.9 \times 10^3$ [ $1.5 \times 10^3$ – $5.8 \times 10^3$ ]
<i>Pseudomonas</i> spp. (presumptive)	$<1.0 \times 10^1$	$2.9 \times 10^3$ [ $1.2 \times 10^3$ – $6.8 \times 10^3$ ]	$6.7 \times 10^3$ [ $2.9 \times 10^3$ – $1.5 \times 10^4$ ]	$9.7 \times 10^2$ [ $4.3 \times 10^2$ – $2.2 \times 10^3$ ]	$7.8 \times 10^3$ [ $3.4 \times 10^3$ – $1.8 \times 10^4$ ]	$6.6 \times 10^3$ [ $2.9 \times 10^3$ – $1.5 \times 10^4$ ]
$\beta$ -glucuronidase-positive <i>E. coli</i>	$<1.0 \times 10^1$	$<4.0 \times 10^1$	$<4.0 \times 10^1$	$<1.0 \times 10^1$	$<1.0 \times 10^1$	$<1.0 \times 10^1$
<i>Bacillus cereus</i> (presumptive, 30 °C)	$<1.0 \times 10^1$	$<1.0 \times 10^1$	$<1.0 \times 10^1$	$<1.0 \times 10^1$	$<1.0 \times 10^1$	$<1.0 \times 10^1$
<i>Listeria monocytogenes</i> (in 25 g)	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
<i>Salmonella</i> spp. (in 25 g)	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected

All quantitative results are reported as CFU/g. Values  $<$  LOD indicate results below the method's limit of detection. The laboratory did not provide measurement uncertainty.

## 4. Conclusions

Fermented raw-dried pork meat snacks enriched with natural functional ingredients showed improvements in their physicochemical, textural, and microbiological properties. The addition of lion's mane mushroom, rosemary essential oil, sea buckthorn, wild rose, or CBD oil positively influenced the structural properties, nutritional value, and microbiological safety of these products. The strongest viscoelastic effects (higher  $G'$ ) were observed in the lion's mane and rosemary variants, indicating a more rigid protein network in oscillatory tests. However, for these variants (and sea buckthorn), the TPA measurement exceeded the instrument range ( $nd > 325$  N), so springiness and other TPA-derived metrics were not reported and are not compared. Among the measured samples, the CBD variant exhibited the highest springiness and lower hardness versus control, consistent with a more elastic response under compression. Sea buckthorn and rosehip variants—both rich in pectins and dietary fiber—showed higher  $a_w$  and higher total viable counts than the control, alongside a denser structure consistent with improved cohesiveness. These observations underscore a potential trade-off between functional enrichment and hurdle-technology requirements, insofar as higher  $a_w$  and microbial loads may necessitate tighter control of pH and water-phase salt (WPS) to ensure safety and stability. Among the variants tested within the TPA instrument range, CBD and rosehip showed a noticeable decrease in hardness versus control, indicating easier chew that may influence consumer preference. Despite the observed differences, all tested snacks fell within acceptable nutritional ranges for fermented meat products. These changes, although beneficial from a functional perspective, require recipe standardization to maintain repeatability and compliance with legal requirements. In summary, enriching snacks with this set of natural ingredients is an effective way to improve their quality and potential health-promoting value. By adding appropriate plant-based components, it is possible to modify texture (hardness, cohesiveness, springiness, chewiness), color (e.g., a more intense red hue), nutritional profile (potentially influenced by plant-derived fiber), and microbiological stability. No synthetic preservatives were used in these formulations; however, because the study did not include a preservative-containing control or challenge testing, we cannot infer replacement or equivalence. Further research may focus on validating these formulations under extended storage conditions. The present study may support the further development of innovative, natural meat products tailored for health-conscious consumers seeking safe and functional alternatives.

**Author Contributions:** M.B.: Conceptualization, Writing—Original Draft, Investigation, Formal analysis, Visualization; R.W.: Investigation, Formal analysis; S.M.: Methodology, Formal analysis; D.M.S.: Writing—Review and Editing, Formal analysis; B.G.S.: Conceptualization, Writing—Review and Editing, Methodology, Visualization, Supervision, Funding acquisition. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This work was financially supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education in Poland (grant number DWD/6/0210/2022 “Implementation doctorate”).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable—no studies involving humans or animals were performed.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors on request.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Carneiro, K.O.; Campos, G.Z.; Lima, J.M.S.; Rocha, R.S.; Vaz-Velho, M.; Todorov, S.D. The role of lactic acid bacteria in meat products, not just as starter cultures. *Foods* **2024**, *13*, 3170. [CrossRef]
2. Kita, A.; Nowak, J.; Michalska-Ciechanowska, A. The Effect of the Addition of Fruit Powders on the Quality of Snacks with Jerusalem Artichoke during Storage. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 5603. [CrossRef]
3. Munekata, P.E.S.; Pateiro, M.; Tomasevic, I.; Domínguez, R.; da Silva Barretto, A.C.; Santos, E.M.; Lorenzo, J.M. Functional fermented meat products with probiotics—A review. *J. Appl. Microbiol.* **2022**, *133*, 91–103. [CrossRef] [PubMed]
4. US Food and Drug Administration (FDA); Association of American Feed Control Officials (AAFCO). AAFCO Guidelines for Human Grade Pet Food. Process Verified Program. 2023. Available online: [https://www.aafco.org/wp-content/uploads/2023/01/AAFCO\\_Human\\_Grade\\_Standards\\_AMS.pdf](https://www.aafco.org/wp-content/uploads/2023/01/AAFCO_Human_Grade_Standards_AMS.pdf) (accessed on 24 July 2025).
5. Bellucci, E.R.B.; Bis-Souza, C.V.; Domínguez, R. Addition of natural extracts with antioxidant function to preserve the quality of meat products. *Biomolecules* **2022**, *12*, 1506. [CrossRef] [PubMed]
6. Ribeiro, J.S.; Santos, M.J.M.C.; Silva, L.K.R.; Pereira, L.C.L.; Gonçalves, R.V. Natural antioxidants used in meat products: A brief review. *Meat Sci.* **2019**, *148*, 181–188. [CrossRef] [PubMed]
7. Vossen, E.; Utrera, M.; de Smet, S.; Morcuende, D.; Estévez, M. Dog Rose (*Rosa canina* L.) as a Functional Ingredient in Porcine Frankfurters without Added Sodium Ascorbate and Sodium Nitrite. *Meat Sci.* **2012**, *92*, 451–457. [CrossRef]
8. Kozhakhievaya, A.; Dragoev, S.; Stoyanova, M. Improving of the oxidative stability and quality of new cooked and smoked sausages by using Hippophae rhamnoides fruit powder. *C. R. Acad. Bulg. Sci.* **2018**, *71*, 122–128. [CrossRef]
9. Charles, A.P.R.; Chen, B.; Rao, J. Cannabidiol (CBD) as an emerging nutraceutical ingredient from industrial hemp: Regulation, production, extraction, nutraceutical properties, and functionality. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2024**, *64*, 6072–6094. [CrossRef]
10. Das, A.K.; Nanda, P.K.; Dandapat, P.; Bandyopadhyay, S. Edible mushrooms as functional ingredients for development of healthier and more sustainable muscle foods: A flexitarian approach. *Molecules* **2021**, *26*, 2463. [CrossRef]
11. Kausar, T.; Hanan, E.; Ayob, O. A review on functional ingredients in red meat products. *Bioinformation* **2019**, *15*, 390–397. [CrossRef]
12. Salehi, F. Textural properties and quality of meat products containing fruit or vegetable products: A review. *J. Food Nutr. Res.* **2021**, *60*, 187–202.
13. Sojčić, B.; Tomovic, V.; Jokanovic, M.; Pavlic, B. Essential oils as natural additives in dry-fermented sausages. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2021**, *854*, 012089. [CrossRef]
14. Sołowiej, B.; Glibowski, P.; Muszynski, S.; Wydrych, J.; Gawron, A.; Jeliński, T. The effect of fat replacement by inulin on the physicochemical properties and microstructure of acid casein processed cheese analogues with added whey protein polymers. *Food Hydrocol.* **2015**, *44*, 1–11. [CrossRef]
15. Szafranśka, J.O.; Muszynski, S.; Sołowiej, B.G. Effect of whey protein concentrate on physicochemical properties of acid casein processed cheese sauces obtained with coconut oil or anhydrous milk fat. *LWT—Food Sci. Technol.* **2020**, *127*, 109434. [CrossRef]
16. PN-EN ISO 6579-1:2017-04+A1:2020-09; Microbiology of the Food Chain—Horizontal Method for the Detection, Enumeration and Serotyping of Salmonella—Part 1: Detection of Salmonella spp. Polish Committee for Standardization (PKN): Warsaw, Poland, 2020.
17. PN-EN ISO 11290-1:2017-07; Microbiology of the Food Chain—Horizontal Method for the Detection and Enumeration of Listeria Monocytogenes and Listeria spp.—Part 1: Detection Method. Polish Committee for Standardization (PKN): Warsaw, Poland, 2017.
18. PN-EN ISO 4833-1:2013-12+A1:2022-06; Microbiology of the Food Chain—Horizontal Method for the Enumeration of Microorganisms—Part 1: Colony Count at 30 °C by the Pour Plate Technique. Polish Committee for Standardization (PKN): Warsaw, Poland, 2022.
19. PN-ISO 21527-2:2009; Microbiology of Food and Animal Feeding Stuffs—Horizontal Method for the Enumeration of Yeasts and Moulds—Part 2: Colony Count Technique in Products with Water Activity Less Than or Equal to 0.95. Polish Committee for Standardization (PKN): Warsaw, Poland, 2009.
20. PN-EN ISO 21528-2:2017-08; Microbiology of the Food Chain—Horizontal Method for the Detection and Enumeration of Enterobacteriaceae—Part 2: Colony-Count Technique. Polish Committee for Standardization (PKN): Warsaw, Poland, 2017.
21. PN-ISO 16649-2:2004; Microbiology of Food and Animal Feeding Stuffs—Horizontal Method for the Enumeration of  $\beta$ -Glucuronidase-Positive Escherichia coli—Part 2: Colony-Count Technique at 44 °C Using 5-Bromo-4-chloro-3-indolyl  $\beta$ -D-glucuronide. Polish Committee for Standardization (PKN): Warsaw, Poland, 2004.
22. PN-EN ISO 7932:2005+A1:2020-09; Microbiology of Food and Animal Feeding Stuffs—Horizontal Method for the Enumeration of Presumptive Bacillus cereus—Colony-Count Technique at 30 °C. Polish Committee for Standardization (PKN): Warsaw, Poland, 2020.
23. PN-EN ISO 13720:2010; Meat and Meat Products—Enumeration of Presumptive Pseudomonas spp. Polish Committee for Standardization (PKN): Warsaw, Poland, 2010.

24. Hu, Y.; Li, Y.; Li, X.; Zhang, H.; Chen, Q.; Kong, B. Application of lactic acid bacteria for improving the quality of reduced-salt dry fermented sausage: Texture, color, and flavor profiles. *Meat Science. LWT* **2022**, *154*, 112723. [[CrossRef](#)]
25. Zhang, K.; Huang, J.; Wang, D.; Wan, X.; Wang, Y. Covalent polyphenols-proteins interactions in food processing: Formation mechanisms, quantification methods, bioactive effects, and applications. *Front. Nutr.* **2024**, *11*, 1371401. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Santhapur, R.; Jayakumar, D.; McClements, D.J. Development and characterization of hybrid meat analogs from whey protein-mushroom composite hydrogels. *Gels* **2024**, *10*, 446. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
27. Wu, S.-S.; Han, W.; Cheng, Y.-F.; Yun, S.-J.; Chang, M.-C.; Cheng, F.-E.; Cao, J.-L.; Feng, C.-P. Transglutaminase-catalyzed glycosylation improved physicochemical and functional properties of *Lentinus edodes* protein fraction. *Foods* **2023**, *12*, 1849. [[CrossRef](#)]
28. Iskakov, B.M.; Kapshakbaeva, Z.V.; Kardenov, S.A.; Tokaev, S.D.; Tokhtarova, S.M. Influence of sea buckthorn extract powder on physicochemical and structural-mechanical properties of minced meat. *Bull. Shakarim Univ. Tech. Sci.* **2024**, *3*, 26–31. [[CrossRef](#)]
29. Wojtaszek, A.; Salejda, A.M.; Nawirska-Olszan'ska, A.; Zambrowicz, A.; Szmaja, A.; Ambrozik-Haba, J. Physicochemical, antioxidant, organoleptic, and anti-diabetic properties of innovative beef burgers enriched with juices of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) and sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) berries. *Foods* **2024**, *13*, 3209. [[CrossRef](#)]
30. Wu, M.; Hu, J.; Gu, X.; Wang, Q.; Wei, R.; Wang, J.; Li, Z.; Liu, R.; Ge, Q.; Yu, H. Myofibrillar protein composite gels: Effect of esterified potato starch, lard and peanut oil on the gel properties. *J. Sci. Food Agric.* **2021**, *101*, 6192–6202. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Michalska-Ciechanowska, A.; Brzezowska, J.; Nicolet, N.; Haładyn, K.; Brück, W.M.; Hendrysiak, A.; Andlauer, W. Valorization of rosehip (*Rosa canina* L.) pomace using unconventional carbohydrate carriers for beverage obtainment. *Molecules* **2025**, *30*, 141. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Negrean, O.R.; Farcas, A.C.; Nemes, S.A.; Cic, D.E.; Socaci, S.A. Recent advances and insights into the bioactive properties and applications of *Rosa canina* L. and its by-products. *Heliyon* **2024**, *10*, e30816. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Guo, X.; Wei, Y.; Liu, P.; Deng, X.; Zhu, X.; Wang, Z.; Zhang, J. Study of four polyphenol-Coregonus peled (C. peled) myofibrillar protein interactions on protein structure and gel properties. *Food Chem. X* **2024**, *21*, 101063. [[CrossRef](#)]
34. Martin-Piñero, M.J.; García, M.C.; Santos, J.; Alfaro-Rodríguez, M.C.; Muñoz, J. Characterization of novel nanoemulsions, with improved properties, based on rosemary essential oil and biopolymers. *J. Sci. Food Agric.* **2020**, *100*, 3886–3894. [[CrossRef](#)]
35. Zou, Q.; Liu, Y.; Luo, L.; Chen, Y.; Zheng, Y.; Ran, G.; Liu, D. Screening of optimal konjac glucomannan-protein composite gel formulations to mimic the texture and appearance of tripe. *Gels* **2024**, *10*, 528. [[CrossRef](#)]
36. Kumar, P.; Chatli, M.K.; Verma, A.K.; Mehta, N.; Malav, O.P.; Kumar, D. Quality, functionality, and shelf life of fermented meat and meat products: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2017**, *57*, 2844–2856. [[CrossRef](#)]
37. Zhang, S.S.; Duan, J.Y.; Zhang, T.T.; Lv, M.; Gao, X.G. Effect of compound dietary fiber of soybean hulls on the gel properties of myofibrillar protein and its mechanism in recombinant meat products. *Front. Nutr.* **2023**, *10*, 1129514. [[CrossRef](#)]
38. Jiang, C.; Yang, X.; Lin, S.; Yang, Y.; Yu, J.; Du, X.; Tang, Y. Impact of corn starch molecular structures on texture, water dynamics, microstructure, and protein structure in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gel. *Foods* **2024**, *13*, 675. [[CrossRef](#)]
39. Cimmino, R.; Barone, C.M.A.; Claps, S.; Varricchio, E.; Rufrano, D.; Caroprese, M.; Albenzio, M.; De Palo, P.; Campanile, G.; Neglia, G. Effects of dietary supplementation with polyphenols on meat quality in Saanen goat kids. *BMC Vet. Res.* **2018**, *14*, 181. [[CrossRef](#)]
40. Haque, A.; Ahmad, S.; Khan, I. Incorporation of food materials as a source of dietary fibres and natural antioxidants in meat products and their effect on product quality and human health: A mini review. *J. Buffalo Sci.* **2020**, *9*, 76–83. [[CrossRef](#)]
41. Li, S.; Lin, S.; Jiang, P.; Bao, Z.; Li, S.; Sun, N. Insight into the gel properties of Antarctic krill and Pacific white shrimp surimi gels and the feasibility of polysaccharides as texture enhancers of Antarctic krill surimi gels. *Foods* **2022**, *11*, 2517. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Yang, F.; Zhu, Y.; Li, X.; Xiang, F.; Deng, M.; Zhang, W.; Song, W.; Sun, H.; Tang, C. Identification of protein-phenol adducts in meat proteins: A molecular probe technology study. *Foods* **2023**, *12*, 4225. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
43. Marczak, A.; Mendes, A.C. Dietary fibers: Shaping textural and functional properties of processed meats and plant-based meat alternatives. *Foods* **2024**, *13*, 1952. [[CrossRef](#)]
44. Ashrafi, A.; Ahari, H.; Asadi, G.; Nafchi, A.M. Enhancement of the quality and preservation of frozen burgers by active coating containing *Rosa canina* L. extract nanoemulsions. *Food Chem. X* **2024**, *21*, 101749. [[CrossRef](#)]
45. Teodorescu, A.A.; Milea, S.A.; Păcularu-Burada, B.; Nistor, O.V.; Andronoiu, D.G.; Răpeanu, G.; Stănciuc, N. Customized technological designs to improve the traditional use of *Rosa canina* fruits in foods and ingredients. *Plants* **2023**, *12*, 754. [[CrossRef](#)]
46. Mishra, B.P.; Mishra, J.; Paital, B.; Rath, P.K.; Jena, M.K.; Reddy, B.V.V.; Pati, P.K.; Panda, S.K.; Sahoo, D.K. Properties and physiological effects of dietary fiber-enriched meat products: A review. *Front. Nutr.* **2023**, *10*, 1275341. [[CrossRef](#)]
47. Fruet, A.P.B.; Stefanello, F.S.; Silva, M.S.; Kirinus, J.K.; Nörnberg, J.L.; Teixeira, C.; Dörr, A.C. Incorporation of dietary fiber in meat products. *Rev. Eletrôn. Gestão Educ. Tecnol. Ambient.* **2014**, *18*, 11–17. [[CrossRef](#)]
48. Leelapunnawut, S.; Ngamwonglumlert, L.; Devahastin, S.; Derossi, A.; Caporizzi, R.; Chiewchan, N. Effects of texture modifiers on physicochemical properties of 3D-printed meat mimics from pea protein isolate-alginate gel mixture. *Foods* **2022**, *11*, 3947. [[CrossRef](#)]

49. Wi, G.; Bae, J.; Kim, H.; Cho, Y.; Choi, M.-J. Evaluation of the physicochemical and structural properties and the sensory characteristics of meat analogues prepared with various non-animal based liquid additives. *Foods* **2020**, *9*, 461. [[CrossRef](#)]
50. Talens, C.; Llorente, R.; Simó-Boyle, L.; Odriozola-Serrano, I.; Tueros, I.; Ibarra, M. Hybrid sausages: Modelling the effect of partial meat replacement with broccoli, upcycled brewer's spent grain and insect flours. *Foods* **2022**, *11*, 3396. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
51. Sirini, N.; Munekata, P.E.S.; Lorenzo, J.M.; Stegmayer, M.A.; Pateiro, M.; Pérez-Álvarez, J.Á.; Sepúlveda, N.; Sosa-Morales, M.E.; Teixeira, A.; Fernández-López, J.; et al. Development of healthier and functional dry fermented sausages: Present and future. *Foods* **2022**, *11*, 1128. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Bakhsh, A.; Cho, C.; Baritugo, K.A.; Kim, B.; Ullah, Q.; Rahman, A.; Park, S. Production and analytical aspects of natural pigments to enhance alternative meat product color. *Foods* **2023**, *12*, 1281. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
53. Stadnik, J.; Keška, P.; Gazda, P.; Šilka, L. Influence of LAB fermentation on the color stability and oxidative changes in dry-cured meat. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 11736. [[CrossRef](#)]
54. Sompongse, W.; Hongviangjan, W.; Sakamut, P. Interaction of polysaccharides on gel characteristics and protein microstructure of threadfin bream surimi gel. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2024**, *59*, 5096–5104. [[CrossRef](#)]
55. Little, C.L. The microbiological quality of ready-to-eat dried and fermented meat and meat products. *Int. J. Environ. Health Res.* **1998**, *8*, 277–284. [[CrossRef](#)]
56. McQuestin, O.J.; Shadbolt, C.T.; Ross, T. Quantification of the relative effects of temperature, pH, and water activity on inactivation of *Escherichia coli* in fermented meat by meta-analysis. *Appl. Environ. Microbiol.* **2009**, *75*, 6963–6972. [[CrossRef](#)]
57. Sankaranarayanan, A.; Amaresan, N.; Dhanasekaran, D. (Eds.) *Fermented Food Products*, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019. [[CrossRef](#)]
58. Ockerman, H.W.; Basu, I. Preservation methods of animal products. In *Encyclopedia of Meat Science*; Dikeman, J., Devine, C., Eds.; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2014; pp. 78–83. [[CrossRef](#)]
59. Taormina, P.J.; Sofos, J.N. Low-water activity meat products. In *The Microbiological Safety of Low Water Activity Foods and Spices*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 117–130.
60. Borsolyuk, L.M.; Verbytskyi, S.B. The role of plant components in imparting functional properties to restructured meat products. *Food Res.* **2023**, *20*, 7–17. [[CrossRef](#)]
61. Yang, B.; Kallio, H. Fatty acid composition of lipids in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) berries of different origins. *J. Agric. Food Chem.* **2001**, *49*, 1939–1947. [[CrossRef](#)]
62. Pan-utai, W.; Settachaimongkon, S.; La-ongkham, O.; Pornpukdeewattana, S.; Hamwane, M.; Lorpunge, C.; Adame, M.; Yodbumprenge, C. Physicochemical, nutritional, and antioxidant properties of traditionally fermented Thai vegetables: A promising functional plant-based food. *Foods* **2024**, *13*, 2848. [[CrossRef](#)]
63. Ockerman, H.W.; Basu, L. Production and consumption of fermented meat products. In *Handbook of Fermented Meat and Poultry*, 2nd ed.; Toldrá, F., Hui, Y.H., Astiasarán, I., Sebranek, J.G., Talon, R., Eds.; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2014; pp. 23–32. [[CrossRef](#)]
64. Fernández-Varela, R.; Hansen, A.H.; Svendsen, B.A.; Moghadam, E.G.; Bas, A.; Krac'un, S.K.; Harlé, O.; Poulsen, V.K. Harnessing fermentation by *Bacillus* and lactic acid bacteria for enhanced texture, flavor, and nutritional value in plant-based matrices. *Fermentation* **2024**, *10*, 411. [[CrossRef](#)]
65. Benković, M.; Jurinjak Tušek, A.; Sokac' Cvetnic', T.; Jurina, T.; Valinger, D.; Gajdoš Kljusuric', J. An overview of ingredients used for plant-based meat analogue production and their influence on structural and textural properties of the final product. *Gels* **2023**, *9*, 921. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
66. Farid, M.S.; Anjum, R.; Yang, Y.; Tu, M.; Zhang, T.; Pan, D.; Sun, Y.; Wu, Z. Recent trends in fermented plant-based analogues and products, bioactive peptides, and novel technologies-assisted fermentation. *Trends Food Sci. Technol.* **2024**, *147*, 104529. [[CrossRef](#)]
67. Taghian Dinani, S.; Zhang, Y.; Vardhanabhati, B.; van der Goot, A.J. Enhancing textural properties in plant-based meat alternatives: The impact of hydrocolloids and salts on soy protein-based products. *Curr. Res. Food Sci.* **2023**, *6*, 100571. [[CrossRef](#)]
68. European Commission. Commission Regulation (EC) No 2073/2005 of 15 November 2005 on microbiological criteria for foodstuffs. *Off. J. Eur. Union* **2005**, *L 338/1*, 1–26.
69. Barton', M.; Waraczewski, R.; Sołowiej, B.G. Organic sea buckthorn or rosehip juices on the physicochemical, rheological, and microbial properties of organic goat or cow fermented whey beverages. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 1240. [[CrossRef](#)]
70. Wang, Z.; Zhengxi, W.; Ji, L.; Zhang, J.; Zhao, Z.; Zhang, R.; Bai, T.; Hou, B.; Zhang, Y.; Liu, D.; et al. A review: Microbial diversity and function of fermented meat products in China. *Front. Microbiol.* **2021**, *12*, 645435. [[CrossRef](#)]
71. Wang, Y.; Han, J.; Wang, D.; Gao, F.; Zhang, K.; Tian, J.; Jin, Y. Research update on the impact of lactic acid bacteria on the substance metabolism, flavor, and quality characteristics of fermented meat products. *Foods* **2022**, *11*, 2090. [[CrossRef](#)]
72. Aymerich, T.; Picouet, P.A.; Monfort, J.M. Decontamination technologies for meat products. *Meat Sci.* **2008**, *78*, 114–129. [[CrossRef](#)]
73. Vinnikova, L.; Mudryk, V.; Agunova, L. Modern production trends of fermented meat products. *Food Sci. Technol. Int.* **2019**, *13*, 1556. [[CrossRef](#)]

74. Leroy, F.; Verluyten, J.; De Vuyst, L. Functional meat starter cultures for improved sausage fermentation. *Int. J. Food Microbiol.* **2006**, *106*, 270–285. [[CrossRef](#)]
75. Laranjo, M.; Potes, M.E.; Elias, M. Role of starter cultures on the safety of fermented meat products. *Front. Microbiol.* **2019**, *10*, 853. [[CrossRef](#)]
76. Neffe-Skocin´ska, K.; Wójciak, K.M.; Zielińska, D. Probiotic microorganisms in dry fermented meat products. In *Probiotics and Prebiotics in Human Nutrition and Health*; InTech: London, UK, 2016. [[CrossRef](#)]
77. Ashaolu, T.J.; Khalifa, I.; Mesak, M.A.; Lorenzo, J.M.; Farag, M.A. A comprehensive review of the role of microorganisms on texture change, flavor and biogenic amines formation in fermented meat with their action mechanisms and safety. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2021**, *61*, 3538–3555. [[CrossRef](#)]

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

## 10. Oświadczenia doktoranta oraz współautorów dotyczących ich wkładu w przygotowanie opublikowanych prac naukowych

Lublin, 1.06.2026

### Oświadczenie autorów publikacji

Niniejszym oświadcza się, że publikacja:

Bartoń M., Waraczewski R., Sołowiej B.G., 2025, *Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices on the Physicochemical, Rheological, and Microbial Properties of Organic Goat or Cow Fermented Whey Beverages*. *Applied Sciences*, 15(3), 1240. DOI: 10.3390/app15031240.

powstała w wyniku poniżej określonego, indywidualnego wkładu pracy współautorów:

**Bartoń Maciej** – przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu, współtworzenie koncepcji pracy, opracowanie metodyki badań, przeprowadzenie badań, wykonanie analizy formalnej, pozyskanie materiałów i zasobów badawczych, opracowanie i uporządkowanie danych oraz przygotowanie wizualizacji wyników.

**Waraczewski Robert** – udział w przeprowadzeniu badań, opracowanie i uporządkowanie danych oraz przygotowanie wizualizacji wyników.

**Sołowiej Bartosz G.** – współtworzenie koncepcji pracy, opracowanie metodyki badań, wykorzystanie oprogramowania analitycznego, walidacja wyników, wykonanie analizy formalnej, opracowanie i uporządkowanie danych, przygotowanie recenzji i redakcji manuskryptu, nadzór naukowy nad realizacją pracy, zarządzanie projektem oraz pozyskanie finansowania.

mgr inż. Maciej Bartoń



mgr inż. Robert Waraczewski



prof. dr hab. Bartosz G. Sołowiej



## Oświadczenie autorów publikacji

Niniejszym oświadczają się, że publikacja:

Bartoń M., Stępniewska A., Ognik K., Sołowiej B.G., 2026, *Assessment of Fatty Acid Profile, Mineral Composition, and Antioxidant Activity of Fermented Whey Beverages from Organic Cow and Goat Whey with the Organic Sea Buckthorn or Rosehip Juices*. *Molecules*, 31(11), 1905. DOI: 10.3390/molecules31111905.

powstała w wyniku poniżej określonego, indywidualnego wkładu pracy współautorów:

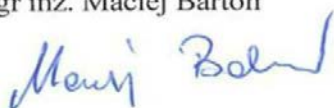
**Bartoń Maciej** – współtworzenie koncepcji pracy, udział w opracowaniu metodyki badań, walidacja, wykorzystanie oprogramowania analitycznego, wykonanie analizy formalnej, przeprowadzenie części badań, opracowanie i uporządkowanie danych, przygotowanie wizualizacji wyników, napisanie pierwotnej wersji manuskryptu oraz udział w przygotowaniu odpowiedzi na recenzje.

**Stępniewska Anna** – przeprowadzenie części badań, udział w analizie formalnej, opracowaniu i uporządkowaniu danych, interpretacji wyników oraz przygotowaniu wizualizacji wyników.

**Ognik Katarzyna** – udział w opracowaniu metodyki badań, wykorzystaniu oprogramowania analitycznego, walidacji, analizie formalnej, opracowaniu i uporządkowaniu danych oraz interpretacji wyników.

**Sołowiej Bartosz G.** – współtworzenie koncepcji pracy, udział w opracowaniu metodyki badań, walidacji, analizie formalnej i opracowaniu danych, przygotowanie recenzji i redakcji manuskryptu, nadzór naukowy nad realizacją pracy oraz zarządzanie projektem.

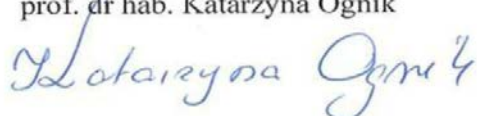
mgr inż. Maciej Bartoń



dr hab. Anna Stępniewska, profesor uczelni



prof. dr hab. Katarzyna Ognik



prof. dr hab. Bartosz G. Sołowiej



## Oświadczenie autorów publikacji

Niniejszym oświadczają się, że publikacja:

Bartoń M., Waraczewski R., Muszyński S., Stasiak D.M., Sołowiej B.G., 2025, *Effects of Whey and Plant-Based Additives on Technological and Microbiological Characterization of Fermented Raw-Dried Pork Meat Snacks of Human Grade Standard. Foods*, 14 (22), 3960. DOI: 10.3390/foods14223960.

powstała w wyniku poniżej określonego, indywidualnego wkładu pracy współautorów:

**Bartoń Maciej** – współtworzenie koncepcji pracy, przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu, przeprowadzenie badań, wykonanie analizy formalnej oraz przygotowanie wizualizacji wyników.

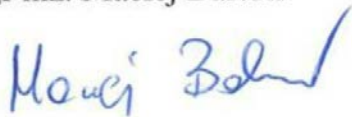
**Waraczewski Robert** – udział w przeprowadzeniu badań oraz wykonaniu analizy formalnej.

**Muszyński Siemowit** – udział w opracowaniu metodyki badań oraz wykonaniu analizy formalnej.

**Stasiak Dariusz M.** – udział w przygotowaniu recenzji i redakcji manuskryptu oraz wykonaniu analizy formalnej.

**Sołowiej Bartosz G.** – współtworzenie koncepcji pracy, udział w przygotowaniu recenzji i redakcji manuskryptu, opracowanie metodyki badań, przygotowanie wizualizacji wyników, nadzór naukowy nad realizacją pracy oraz pozyskanie finansowania.

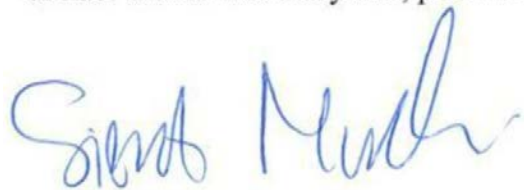
mgr inż. Maciej Bartoń



mgr inż. Robert Waraczewski



dr hab. Siemowit Muszyński, prof. UP



dr hab. Dariusz M. Stasiak, prof. UP



prof. dr hab. Bartosz G. Sołowiej

