UNIWERSYTET
WARMIŃSKO-MAZURSKI
W OLSZTYNIE

WYDZIAŁ NAUKI O ŻYWNOŚCI

Dziedzina: Nauki Rolnicze

Dyscyplina: Technologia żywności i żywienia

Mgr inż. Beata Treszczyńska

Rozprawa doktorska

CZYNNIKI WARUNKUJĄCE JAKOŚĆ SERÓW O OBNIŻONEJ ZAWARTOŚCI TŁUSZCZU

QUALITY FACTORS OF LOW-FAT CHEESE

Praca wykonana w Katedrze Mleczarstwa i Zarządzania Jakością

Promotor: **dr hab. inż. Justyna Żulewska, prof. UWM,** Katedra Mleczarstwa i Zarządzania Jakością

Promotor pomocniczy: dr inż. Maria Baranowska, Katedra Mleczarstwa i Zarządzania Jakością

Olsztyn, rok 2024

Składam serdeczne podziękowania
Pani dr hab. inż. Justynie Żulewskiej, prof. UWM
oraz
Pani dr inż. Marii Baranowskiej,
za pomoc i cenne uwagi
podczas przygotowywania niniejszej rozprawy doktorskiej.

SPIS TREŚCI

Streszczenie **6**
Summary **7**
1. Wstęp **8**
2. Przegląd zagadnień w świetle literatury **11**
2.1. Klasyfikacja serów ze względu na zawartość tłuszczu **11**
2.2. Metody obniżania zawartości tłuszczu w serach **13**
2.2.1. Wzrost zawartości wody **14**
2.2.2. Wzrost zawartości suchej masy mleka **15**
2.2.3. Większy dodatek wody do płukania ziarna **16**
2.2.4. Zmiana parametrów produkcji **16**
2.2.5. Dodatek preparatów białek serwatkowych **18**
2.2.6. Mimetyki tłuszczu **19**
2.2.7. Substytuty tłuszczu **21**
2.2.8. Frakcje tłuszczu mlekowego **21**
2.3. Tekstura serów **28**
2.3.1. Czynniki kształtujące teksturę serów **28**
2.3.2. Metody oceny tekstury serów **29**
3. Główne cele rozprawy i organizacja badań **32**
3.1. Cele i hipotezy pracy **32**
3.2. Organizacja badań **33**
4. Materiał i metodyka badań **35**
4.1. Materiał badany **35**
4.2. Metodyka badań **37**
4.2.1. Skład fizykochemiczny **37**
4.2.2. Ocena stopnia rozkładu białek w serach **38**
4.2.3. Profil kwasów tłuszczowych **38**
4.2.4. Mikrostruktura sera wraz z analizą fraktalną **39**
4.2.5. Analiza profilu tekstury **39**
4.2.6. Analiza sensoryczna tekstury **39**
4.2.7. Analiza statystyczna **41**
5. Omówienie wyników i dyskusja **42**
5.1. Charakterystyka serów komercyjnych **42**
5.1.1. Skład fizykochemiczny **42**
5.1.2. Ocena stopnia rozkładu białek w serach **52**
5.1.3. Profil kwasów tłuszczowych **58**
5.1.4. Mikrostruktura sera wraz z analizą fraktalną **62**
5.1.5. Analiza profilu tekstury **64**
5.1.6. Analiza sensoryczna tekstury **70**
5.2. Charakterystyka serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych oraz mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny **73**
5.2.1. Skład fizykochemiczny **73**
5.2.2. Ocena stopnia rozkładu białek w serach **85**
5.2.3. Profil kwasów tłuszczowych **90**
5.2.4. Mikrostruktura sera wraz z analizą fraktalną **91**
5.2.5. Analiza profilu tekstury **94**

5.2.6. Analiza sensoryczna tekstury **105**
5.3. Charakterystyka serów z dodatkiem frakcji tłuszczu mlekowego **109**
5.3.1. Skład fizykochemiczny **109**
5.3.2. Ocena stopnia rozkładu białek w serach **116**
5.3.3. Profil kwasów tłuszczowych **118**
5.3.4. Mikrostruktura sera wraz z analizą fraktalną **121**
5.3.5. Analiza profilu tekstury **123**
5.3.6. Analiza sensoryczna tekstury **142**
6. Podsumowanie **144**
7. Wnioski **145**
8. Spis literatury **147**
9. Spis tabel, rysunków i fotografii **160**

WYKAZ SKRÓTÓW

GG	Grand Gouda
S/M	Zawartość soli w fazie wodnej sera
WSN-TN	Zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
TCA-TN	Zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
PTA-TN	Zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
TCA-SN	Zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 24% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
PTA-SN	Zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 10% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
SK	Ser kontrolny, ser częściowo odtłuszczony bez dodatku mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny
MP	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych
MPI	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny
MP-2	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych - 2 tydzień dojrzewania
MP-4	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych - 4 tydzień dojrzewania
MP-6	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych - 6 tydzień dojrzewania
MP-8	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych - 8 tydzień dojrzewania
MPI-2	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny- 2 tydzień dojrzewania
MPI-4	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny - 4 tydzień dojrzewania
MPI-6	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny - 6 tydzień dojrzewania
MPI-8	Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny - 8 tydzień dojrzewania
SK-1	Ser kontrolny - 1 dzień dojrzewania
SK-7	Ser kontrolny - 7 dzień dojrzewania
SK-14	Ser kontrolny - 14 dzień dojrzewania
SK-28	Ser kontrolny - 28 dzień dojrzewania
FR20-1	Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20°- 1 dzień dojrzewania
FR30-1	Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 30° - 1 dzień dojrzewania
FR20-7	Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20°C - 7 dzień dojrzewania
FR30-7	Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 30°C - 7 dzień dojrzewania
FR20-14	Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20°C - 14 dzień dojrzewania
FR30-14	Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 30°C - 14 dzień dojrzewania
FR20-28	Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20°C - 28 dzień dojrzewania
FR30-28	Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 30°C - 28 dzień dojrzewania
df	Stopnie swobody
SS	Suma kwadratów
s.m.	Sucha masa

STRESZCZENIE

Ze względu na ryzyko wynikające ze spożywania dużej ilości tłuszczu w diecie, znacznie wzrosło zainteresowanie serami o niskiej zawartości tłuszczu w ciągu ostatnich lat. Jednak redukcja tłuszczu powoduje pewne wady jakościowe, w tym teksturalne, funkcjonalne i problemy sensoryczne w serze.

Celem pracy było określenie czynników determinujących jakość serów o obniżonej zawartości tłuszczu oraz sposobów sterowania wyróżnikami jakościowymi takich serów poprzez zastosowanie mikropartykułowanych białek serwatkowych, inuliny lub frakcji tłuszczu mlekowego.

Jedną z metod obniżenia zawartości tłuszczu w serach komercyjnych jest zwiększony dodatek wody technologicznej, który ma wpływ na profil sensoryczny gotowego produktu. Analiza parametrów tekstury oraz analiza profilu sensorycznego wykazała, że częściowe zastąpienie tłuszczu wodą wpływa na zmniejszenie twardości i poprawę tekstury serów niskotłuszczowych, podwyższając ich jakość. Dodatek mimetyków tłuszczu, takich jak mikropartykułowane białka serwatkowe wraz z inuliną pozwala na nadanie serom cech fizykochemicznych zbliżonych do produktów pełnotłustych. Zastosowanie frakcji tłuszczu mlekowego pozwala różnicować profil kwasów tłuszczowych serów.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazały, że sery dojrzewające o obniżonej zawartości tłuszczu mogą być dobrym wyborem dla konsumentów, ze względu na zmniejszoną wartość kaloryczną a równocześnie wyższą zawartość białka w odniesieniu do serów klasycznych.

Słowa kluczowe: ser, mimetyki, tekstura, profil sensoryczny, frakcje tłuszczu mlekowego

SUMMARY

As the risk of consuming high amounts of dietary fat is increasing, there is a significant increase in the interest in low-fat cheeses in the recent years. However, fat reduction causes some quality defects, including textural, functional and sensory problems in cheese.

The purpose of this study was to determine the factors determining the quality of reduced-fat cheeses and strategies to control the quality characteristics of such cheeses through the use of microparticulated whey proteins, inulin or milk fat fractions.

The increased addition of process water is a method of lowering the fat content of commercial cheeses, which affects the sensory profile of the final product. The analysis of texture parameters and sensory profile showed that partial replacement of fat with water reduces hardness and improves the texture of low-fat cheeses, increasing their quality. The addition of fat mimetics, such as microparticulated whey proteins along with inulin, allows cheeses to have physicochemical characteristics similar to full-fat products. The use of milk fat fractions makes it possible to differentiate the fatty acid profile of cheeses.

The results of the study indicates that reduced-fat ripened cheeses can be a good choice for consumers, due to their reduced caloric value and, at the same time, higher protein content in relation to classic cheeses.

Key words: cheese, mimetics, texture, sensory profile, milk fat fractions

1. WSTĘP

Sery są źródłem pełnowartościowego białka, łatwo przyswajalnego tłuszczu oraz mikroelementów i witamin niezbędnych do prawidłowego rozwoju organizmu człowieka. Wysoka wartość odżywcza oraz możliwość długotrwałego przechowywania, jak i różnorodność cech organoleptycznych serów sprawia, że cieszą się one dużą popularnością. Polska jest jednym z pięciu wiodących producentów mleka i przetworów mlecznych w Unii Europejskiej.

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego skup mleka w Polsce, w okresie od stycznia do grudnia 2023 r. wyniósł 12585,9 mln litrów (Grabarczyk, 2024), pobrane z: https://pfhb.pl/fileadmin/aktualnosci/2024/2/Raport_styczen_2024.pdf, (12.02.2024). Dla porównania w okresie od stycznia do grudnia 2023 roku skup mleka w Unii Europejskiej wyniósł 144714,0 tys. ton i był o 0,1% wyższy niż w 2022 roku (Grabarczyk, 2024), https://pfhb.pl/fileadmin/aktualnosci/2024/3/Raport_luty_2024.pdf (12.02.2024).

Największym producentem mleka w Unii Europejskiej są Niemcy (32,4 mln ton rocznie), z produkcją serów ogółem na poziomie 2,5 mln ton (Tab. 1). Polska jest jednym z czołowych producentów mleka i przetworów mlecznych w Unii Europejskiej plasując się na pozycji za Niemcami, Francją i Holandią. W 2023 roku w Polsce wyprodukowano 13,0 mln ton mleka oraz 1,0 mln ton serów ogółem (Tab. 1).

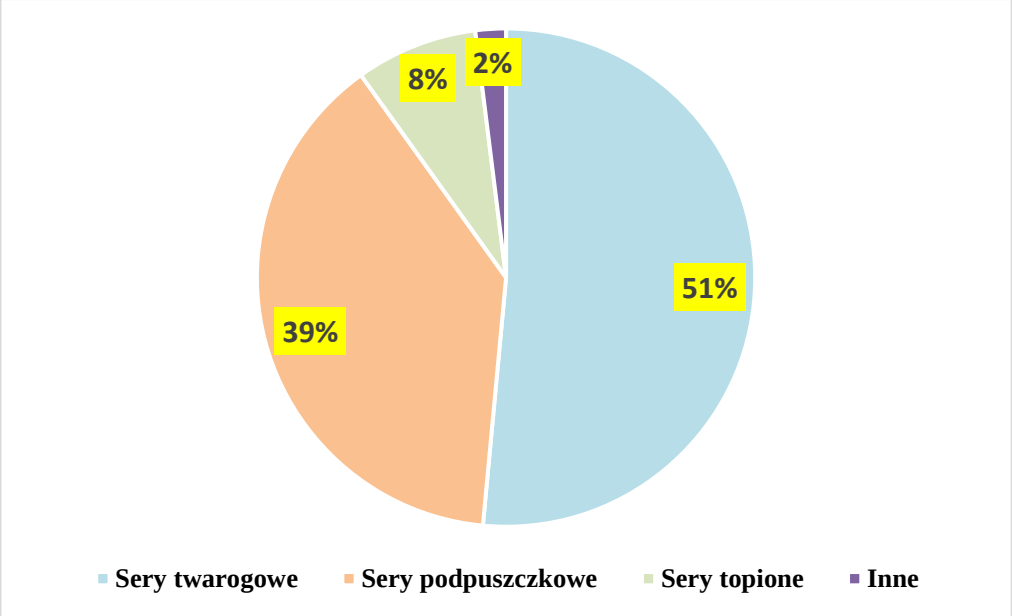
Tabela 1. Produkcja mleka oraz produkcja serów ogółem w Polsce i wybranych krajach Unii Europejskiej (styczeń - grudzień 2023)

Kraj	Produkcja mleka	Produkcja serów ogółem
Niemcy	32,4 mln ton	2,5 mln ton
Francja	23,4 mln ton	1,7 mln ton
Holandia	14,1 mln ton	950 tyś ton
Polska	13,0 mln ton	1,0 mln ton
Włochy	12,7 mln ton	1,2 mln ton

Pobrane z: https://www.ing.pl/spolki/raporty-agro/2024-02-mleko, (12.02.2024)

Źródło: opracowanie własne

Produkcja serów i twarogów w Polsce systematycznie wzrasta. W strukturze produkcji dominują sery twarogowe 51% oraz sery podpuszczkowe dojrzewające 39%. Sery topione stanowią 8% produkcji a pozostałe sery 2% wielkości produkcji (Rys. 1).
W okresie od stycznia do grudnia 2023 r. produkcja serów twarogowych w Polsce wyniosła 519,8 tys. ton i była o 1,8% wyższa niż w analogicznym okresie 2022 roku. Natomiast produkcja serów podpuszczkowych od stycznia do grudnia 2023 r. wynosiła 389,5 tys. ton i była o 3,0% wyższa niż w roku 2022 (Grabarczyk, 2024), pobrane z: https://pfhb.pl/fileadmin/aktualnosci/2024/3/Raport_luty_2024.pdf, (11.03.2024).



Rysunek 1. Struktura produkcji poszczególnych kategorii serów w Polsce w 2023 roku

Pobrane z: https://www.praskagieldaspozywcza.pl/rynek-serow-w-polsce-z-mocna-pozycja/, (12.02.2024)

Spożywanie produktów mleczarskich, a zwłaszcza serów, jest szczególnie ważne ze względu na dostarczanie w diecie odpowiedniej ilości białka. W Polsce średnie spożycie serów podpuszczkowych wynosi 4,4 kg na osobę rocznie, a serów twarogowych ok. 6,5 kg na osobę rocznie.
W krajach Unii Europejskiej spożycie serów dojrzewających wynosi od 6 kg do 18 kg na osobę rocznie a spożycie serów twarogowych jest na niskim poziomie (Baranowska, 2020), https://www.spozywczetechnologie.pl/mleko/produkcja/413/jak-powstaja-sery-poznajmy-technologie-produkcji-sera-podpuszczkowego, (5.12.2023).
Natomiast spożycie serów podpuszczkowych w Chinach czy Japonii jest zdecydowanie niższe niż w Europie, np. roczne spożycie sera na mieszkańca w Chinach wynosi 0,1 kg,

w Japonii 2,4 kg, a w Korei Południowej 2,8 kg (Czuba i Starkowski, 2020), pobrane z https://www.fakt.pl/pieniadze/za-miastem/jak-produkowane-sa-polskie-sery-jestesmy-w-tym-potega/k6c5n39, (5.12.2023). Przy czym warto podkreślić, że są to rynki perspektywiczne z rosnącą konsumpcją produktów mleczarskich.

W diecie człowieka sery dojrzewające, obok pieczywa, wędlin, owoców i warzyw, są jednym z najczęściej spożywanych produktów. Warunkują to powszechnie akceptowalne walory smakowo-zapachowe, dostępność na rynku, wysoka wartość odżywcza, łatwość przygotowania do spożycia oraz możliwość stosowania jako składnika innych dań. Sery niskotłuszczowe należą do produktów dietetycznych i stanowią dobrą podstawę do tworzenia różnorodnych produktów funkcjonalnych.

Jedną z przesłanek wprowadzenia nowych innowacyjnych produktów, oprócz modyfikacji czy wdrażania nowych technologii, zmiany wizerunku firmy, realizacji założonego programu sprzedaży czy zmiany przepisów prawnych, jest zapotrzebowanie rynku na określone produkty.

Trendy rynkowe wskazują na wzrost zainteresowania produktami niskotłuszczowymi lub beztłuszczowymi, produktami o zredukowanej zawartości cukrów i soli, produktami bezlaktozowymi, produktami wzbogaconymi o szczepy bakterii probiotycznych czy produktami fortyfikowanymi wapniem, wzbogacaniem sera witaminą D lub innymi składnikami odżywczymi, ekspansją nowych smaków. Rynek serowarski podlega intensywnym przemianom polegającym na wzroście produktywności poprzez wdrażanie nowych technologii oraz wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań wynikających z oczekiwań konsumentów (Małkowska-Kowalczyk i in, 2023, Bae i in., 2017, Baghdadi i in., 2018). Zakłady mleczarskie oferują sery niskotłuszczowe o zróżnicowanej kaloryczności, które mogą stanowić atrakcyjny wybór dla dużej grupy konsumentów.

2. PRZEGLĄD ZAGADNIEŃ W ŚWIETLE LITERATURY

Rozwój serowarstwa spowodował poszerzenie asortymentu serów o zróżnicowanych właściwościach sensorycznych i fizykochemicznych. W przypadku serów, konsumenci są zainteresowani wariantami, które oprócz tego, że są doskonałym źródłem białka, wapnia i fosforu, mogą znaleźć zastosowanie w różnych potrawach.

Ser jest złożonym, wielofazowym produktem o zróżnicowanej zawartości tłuszczu. Jest jednym z najczęściej spożywanych produktów mlecznych na całym świecie. Sery dojrzewające o obniżonej zawartości tłuszczu są od wielu lat przedmiotem badań i analiz (Drake i Swanson, 1995, Brown i in., 2003, Ahmad i in., 2015, Borges i in., 2019, Ibáñez i in., 2020, Moghiseh i in., 2021), których celem jest przede wszystkim zapewnienie odpowiednich właściwości fizykochemicznych, w tym tekstury, która jest jednym z podstawowych kryteriów oceny ich jakości i wyboru przez konsumenta.

Profil tekstury sera o obniżonej zawartości tłuszczu to główny element decydujący o jakości produktu i jest on uwarunkowany składem fizykochemicznym i stopniem proteolizy sera (McSweeney i Sousa, 2000, Banks, 2004, Stankey i in., 2017, Ullah i in., 2017). Istotną wadą serów otrzymywanych z mleka odtłuszczonego jest ich krucha i twarda tekstura. Z tego powodu produkcja serów niskotłuszczowych wysokiej jakości jest wyzwaniem dla przetwórców mleka, bowiem wymaga nie tylko redukcji zawartości tłuszczu mlekowego w mleku serowarskim, ale także modyfikacji zawartości innych składników suchej masy mleka (m.in. białek lub pewnych ich frakcji).

Przemysł mleczarski oferuje wiele wariantów serów o obniżonej zawartości tłuszczu i serów niskotłuszczowych (Tavaria i in., 2002), które są mniej kaloryczne niż ich pełnotłuste odpowiedniki i mogą stanowić alternatywę dla licznej grupy konsumentów, wymagających produktów niskokalorycznych przy zachowaniu wysokiej wartości odżywczej.

2.1. Klasyfikacja serów ze względu na zawartość tłuszczu

Tłuszcz jest jednym z głównych składników produktów spożywczych i pełni w nich wiele różnych funkcji. W dużym stopniu wpływa na wygląd zewnętrzny produktu, jego smak i zapach, a także na strukturę i konsystencję. Zawartość tłuszczu mlekowego

w produkcie musi być wyraźnie określona jako procent masowy (g/100 g), jako zawartość (%) tłuszczu w suchej masie lub wyrażona w gramach na porcję produktu.

Ze względu na zawartość tłuszczu w suchej masie sery dzieli się na:

- pełnotłuste: jeśli zwartość tłuszczu w suchej masie jest równa lub większa 60%;
- tłuste: jeśli zwartość tłuszczu w suchej masie jest równa lub większa 45% ale mniejsza niż 60%;
- półtłuste: jeśli zwartość tłuszczu w suchej masie jest równa lub większa 25% ale mniejsza niż 45%;
- częściowo odtłuszczone: jeśli zwartość tłuszczu w suchej masie jest równa lub większa 10% ale mniejsza niż 25%;
- chude: jeśli zawartość tłuszczu w suchej masie jest mniejsza niż 10% (Codex Alimentarius, 2011).

Zgodnie z Rozporządzeniem (WE) nr 1924/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 grudnia 2006 r. w sprawie oświadczeń żywieniowych i zdrowotnych dotyczących żywności ze zmianami określenie „produkt o obniżonej zawartości tłuszczu", może być użyte kiedy „redukcja wynosi co najmniej 30% w porównaniu z podobnym produktem". Rozporządzenie określa również zasady stosowania określenia „produkt lekki", który powinien spełniać te same wymagania jak produkt o obniżonej zawartości tłuszczu. Przepis ten wskazuje, że określenie „produkt niskotłuszczowy" może być stosowane: „gdy produkt zawiera nie więcej niż 3 g tłuszczu na 100 g dla produktów stałych lub 1,5 g tłuszczu na 100 ml dla produktów płynnych (1,8 g tłuszczu na 100 ml mleka półtłustego)".

Zawartość tłuszczu ma istotny wpływ na mikrostrukturę, teksturę i jakość sera (Fenelon i in., 2000). Tłuszcz absorbuje wiele związków smakowych i jest ich prekursorem, odpowiada za zapach i teksturę produktów, a tym samym decyduje o ich ogólnej smakowitości (Drewnowski, 1998). Cechy sensoryczne serów kształtowane są w następstwie przemian biochemicznych tłuszczów, białek, laktozy oraz cytrynianów zachodzących podczas dojrzewania (Banks, 2007, Deetae i in., 2007).

Na profil tekstury serów znacząco wpływa rozproszenie i rozdrobnienie kuleczek tłuszczowych. Tłuszcz mlekowy znajdujący się w serze decyduje o jego plastyczności, sprężystości, gumowatości, elastyczności i miękkości. Tekstura serów jest uzależniona od zawartości tłuszczu w suchej masie oraz jego stosunku do białka. W serach o obniżonej zawartości tłuszczu, większa zawartość białka w stosunku do tłuszczu ma

wpływ na tworzenie się mocnej sieci wiązań białkowych, które są odpowiedzialne za zwięzłość, spoistość i twardość serów (Foegeding i in., 2003).

Badania sensoryczne oraz reologiczne serów o różnej zawartości tłuszczu przeprowadzone przez Rogers i in. (2009), określające wpływ redukcji tłuszczu na ich teksturę i właściwości fizykochemiczne wykazały, że zawartość białka w serach o obniżonej zawartości tłuszczu była wyższa w porównaniu z serami pełnotłustymi a te różnice mogły przyczynić się do zmian w teksturze i właściwościach reologicznych oraz sensorycznych badanych serów. Według badań Mistry (2001), redukcja tłuszczu w serze wpływa na zmianę jego wyglądu, smaku i konsystencji. Potwierdzają to również badania Drake i in. (1998) oraz Liu i in. (2008).

Ponieważ produkty niskotłuszczowe mogą charakteryzować się nieco odmiennymi cechami sensorycznymi, a także teksturą w stosunku do ich pełnotłustych odpowiedników (Liu i in., 2008), dąży się do takiej zmiany składu sera, aby różnice te nie były wyczuwalne przez konsumentów.

2.2. Metody obniżania zawartości tłuszczu w serach

Redukcję zawartości tłuszczu można osiągnąć poprzez zmniejszenie jego ilości lub zmianę składu produktów, np. przez dodanie lub zwiększenie poziomu innych składników (Sleator i Hill, 2007). Usunięcie lub zastąpienie tłuszczu w produkcie wiąże się z modyfikacją, która zmienia również cechy sensoryczne produktu (Desmond, 2006).

Obniżenie poziomu tłuszczu lub całkowite jego usunięcie, skutkuje powstaniem matrycy białkowej o twardej, zwartej i gumowatej konsystencji (Diamantino i in., 2014, Legg i in., 2017). Z tego powodu produkcja serów o obniżonej zawartości tłuszczu nie jest procesem łatwym. Ze względu na specyficzny układ białkowo-tłuszczowy produktu, stosowanie takich samych technologii dla serów o obniżonej zawartości tłuszczu jak dla serów pełnotłustych, skutkuje niewystarczającym wykształceniem się cech organoleptycznych powstałego sera, co z kolei powoduje, że uzyskany produkt nie spełnia wymagań nabywcy (Pluta, 2009, Wierzbicka i in. 2003, Verhagen i in., 2010).

Redukcję zawartości tłuszczu w serach można uzyskać poprzez:

a. modyfikacje technologiczne:
    - wzrost zawartości wody,
    - wzrost zawartości suchej masy mleka,

- zastosowanie homogenizacji,
- zastosowanie wyższej temperatury pasteryzacji,
- wyższy dodatek wody do płukania ziarna,
- zamiana parametrów produkcji,
- dodatek preparatów białek serwatkowych,

b. zastosowanie zamienników tłuszczu:

- mimetyki tłuszczu,
- substytuty tłuszczu.

2.2.1. Wzrost zawartości wody

Zwiększona zawartość wody przy niższej temperaturze obróbki skrzepu zalecanej w produkcji serów niskotłuszczowych skutkuje wydłużeniem czasu aktywności bakterii starterowych i wzrostem ilości kwasu mlekowego oraz wydłużeniem czasu aktywności proteolitycznej, co może prowadzić do powstawania gorzkich peptydów i goryczki w serze (Drake i Swanson, 1995).

Zwiększenie zawartości wody wpływa na obniżenie ilości soli w fazie wodnej sera, a to może skutkować namnażaniem się bakterii wykazujących aktywność lipolityczną i proteolityczną i mieć wpływ na powstawanie gorzkiego smaku sera (Metzger i Mistry, 1994). Jednak zwiększenie zawartości wody w serach o obniżonej zawartości tłuszczu redukuje ich twardość, poprawia teksturę i cechy organoleptyczne upodabniając je do serów pełnotłustych (Fenelon i in., 1999, Lawrence i in., 1987).

Ze względu na procentową zawartość wody w masie beztłuszczowej sery dojrzewające można podzielić na (Codex Alimentarius, 2011):

- bardzo twarde (zaw. wody <51%),
- twarde (zaw. wody 49-56%),
- półtwarde (zaw. wody 54-63%)
- półmiękkie (zaw. wody 61-69%),
- miękkie (zaw. wody > 67%).

2.2.2. Wzrost zawartości suchej masy mleka

Zwiększenie zawartości suchej masy mleka uzyskuje się przez dodatek mleka w proszku, mleka zagęszczonego, koncentratów mlecznych w proszku oraz zastosowanie procesów membranowych.

Dodatek odtłuszczonego mleka w proszku do mleka serowarskiego powoduje zwiększenie zawartości suchej masy w serach o obniżonej zawartości tłuszczu i wpływa na poprawę cech sensorycznych tych serów. Dodatek ten powinien być na poziomie od 0,8% do 2% (Pluta, 2009). Większy dodatek mleka w proszku może powodować powstanie kwaśnego smaku sera poprzez zwiększenie zawartości laktozy i biotransformacji do kwasu mlekowego w procesach fermentacji (Drake i Swanson, 1995). Badania wskazują, że dodatek proszku mlecznego ma także wymiar ekonomiczny i pozwala uzyskać większy wydatek sera (Pluta, 2008).

Mistry i in. (1996) badali parametry tekstury sera Cheddar o obniżonej zawartości tłuszczu z dodatkiem maślanki o zawartości tłuszczu 7,2%. Badania wykazały, że parametry tekstury serów po 4 tygodniach dojrzewania były jakościowo wyższe niż sera kontrolnego.

Zastosowanie takich procesów membranowych jak: mikrofiltracja, ultrafiltracja, nanofiltracja czy odwrócona osmoza pozwala na produkcję innowacyjnej gamy serów (Mistry i Maubois, 2017).

Zastosowanie ultrafiltracji zapewnia selektywne oddzielenie składników o masie cząsteczkowej w zakresie 1-200 kDa, za pomocą membrany, przy ciśnieniach mniejszych niż 1000 kPa (Soltani i in., 2022). Zagęszczanie mleka techniką ultrafiltracji zwiększa wydatek oraz wartość odżywczą sera w porównaniu z konwencjonalną technologią wyrobu. W procesie ultrafiltracji uzyskuje się lepszy odzysk składników suchej masy, przy mniejszym dodatku czynnika koagulującego (Fox i Guinee, 2013, Legg i in., 2017).

Amelia i in. (2013) przeprowadzili badania nad opracowaniem alternatywnego procesu produkcji niskotłuszczowego sera Cheddar poprzez połączenie sera Cheddar o obniżonej zawartości tłuszczu z koncentratem kazeiny micelarnej, tak aby uzyskać gotowy wyrób o zawartości 6% tłuszczu, 28% białka i 1,2% soli. Koncentrat kazeiny wyprodukowano z zastosowaniem mikrofiltracji i ultrafiltracji mleka odtłuszczonego. Badania wykazały, że poprzez wzrost zawartości białka w otrzymanym serze poprawie uległy parametry tekstury (Amelia i in., 2013).

2.2.3. Większy dodatek wody do płukania ziarna

Badania Drake i Swanson (1995) wykazały, że usunięcie nadmiaru laktozy poprzez dodatek większej ilości wody płuczącej do ziarna serowarskiego oraz obniżenie temperatury dogrzewania gęstwy serowej, zapobiega powstawaniu kwaśnego i gorzkiego smaku w serach o obniżonej zawartości tłuszczu. Jednak zbyt mocno wypłukane ziarno serowarskie może być przyczyną „pustego smaku" gotowego produktu (Pluta, 2008).

Z tego względu, aby otrzymać produktu o zakładanych, standardowych cechach jakościowych bardzo ważna jest kontrola prawidłowości przebiegu procesu technologicznego. O prawidłowym przebiegu procesu obróbki gęstwy serowej świadczy szybkość zmian pH oraz parametry tekstury sera (Pluta, 2009).

2.2.4. Zmiana parametrów produkcji

Dojrzewanie serów o obniżonej zawartości tłuszczu można modyfikować, wprowadzając zmiany w procesie produkcji.

Zastosowanie homogenizacji mleka serowarskiego, dzięki której następuje rozdrobnienie dużych kuleczek tłuszczowych, ujednolicenie ich wielkości i zwiększenie ich powierzchni, poprzez włączanie drobnych kuleczek tłuszczowych w wolne przestrzenie sieci białkowej, wpływa na elastyczność, jednolitość i gładkość tekstury serów o obniżonej zawartości tłuszczu. Homogenizacja mleka obniża jego pH o 0,1 do 0,25 jednostki oraz skraca czas koagulacji mleka, zwiększając przy tym zwięzłość skrzepu (Pluta, 2009).

Badania Emmons i in. (1980) wykazały, że homogenizacja mleka w produkcji niskotłuszczowego sera Cheddar powodowała zmniejszenie twardości i elastyczności badanych serów oraz zwiększenie zawartości wody w tych serach.

Dane przedstawione przez Mistry (2001) potwierdzają, że zastosowanie odpowiednich procedur do produkcji serów o obniżonej zawartości tłuszczu, poprzez dodatek wody, wybór odpowiednich kultur bakteryjnych i zastosowanie substytutów imitujących tłuszcz, ma wpływ na teksturę gotowego produktu. Homogenizacja śmietanki poprawia teksturę i właściwości serów niskotłuszczowych.

Tunick i in. (1993) opisali wpływ homogenizacji mleka ze stosowanym ciśnieniem na poziomie 10300 kPa lub 17200 kPa do produkcji niskotłuszczowego sera

Mozzarella. W wyniku zastosowania takich parametrów homogenizacji, odnotowano poprawę właściwości teksturalnych oraz parametrów topnienia sera.

Metzger i Mistry (1994) opracowali procedurę produkcji niskotłuszczowego sera Cheddar, w której 40% śmietankę homogenizuje się i miesza z odtłuszczonym mlekiem do pożądanej zawartości tłuszczu wynoszącej 1,65%. Śmietanka była homogenizowana 2-stopniowo przy zastosowaniu ciśnienia 17,3 MPa i 3,4 MPa, Homogenizacja przy takich parametrach zapewniła niezbędne zmniejszenie wielkości kuleczek tłuszczu a w konsekwencji zwiększenie powierzchni i ich liczby. Sery produkowane tą metodą charakteryzowały się odpowiednią konsystencją i teksturą oraz lepszą wydajnością, dzięki zwiększonemu odzyskowi tłuszczu i białka.

Moghiseh i in. (2021) przy produkcji niskotłuszczowego sera Mozzarella z dodatkiem 6% roztworu inuliny i 0,1% roztworu kefiranu homogenizowali mleko dwuetapowo w temperaturze 63°C pod ciśnieniem 10300 kPa oraz 3450 kPa. Ser wyprodukowany tą metodą charakteryzował się wyższą zawartością białka oraz wykazywał parametry tekstury zbliżone do sera pełnotłustego.

Wzrost temperatury pasteryzacji mleka ma na celu wywołanie interakcji między *κ*–kazeiną a białkami serwatkowymi, głównie *β*–laktoglobuliną. Wiąże się to z przejściem części białek serwatkowych do masy serowej (Pluta, 2009). Nieodpowiednio dobrana do procesu produkcji sera temperatura pasteryzacji, może przyczyniać się do zbyt kwaśnego smaku gotowego produktu, na skutek intensywnego rozwoju kultur bakteryjnych (McSweeney, 1997).

Jakość serów niskotłuszczowych można podwyższyć poprzez wzrost temperatury pasteryzacji lub homogenizacji mleka i śmietanki. Taki zabieg przyczynia się do obniżenia strat tłuszczu i zwiększenia wydatku produkcji sera, ale może generować wyższe koszty produkcji serów tego typu (Metzger i Mistry, 1994).

Zastosowanie wyższej temperatury pasteryzacji w procesie produkcji sera, skraca czas dojrzewania o ok. 30-50%, może jednak wpływać na cechy organoleptyczne serów pogarszając ich profil smakowo-zapachowy (Eck i Gillis, 2000).

Wyższa temperatura pasteryzacji i zwiększenie zawartości wody w serach o obniżonej zawartości tłuszczu przyczyniają się do obniżenia ich twardości (Pluta, 2009).

W celu uniknięcia mało wyraźnego smaku i zapachu, którymi te sery mogą się charakteryzować, można przyspieszyć proces dojrzewania poprzez dodatek

odpowiednich kultur bakterii fermentacji mlekowej ze specjalnie dobranymi szczepami oraz preparatów enzymatycznych (El Soda, 1993).

Kultury starterowe odgrywają ważną rolę w kształtowaniu tekstury i smaku serów o obniżonej zawartości tłuszczu (Mistry i Kasperson, 1998) dlatego należy zwrócić uwagę na właściwy ich dobór (Banks, 2004). Poprawę cech sensorycznych serów o obniżonej zawartości tłuszczu można uzyskać modyfikując proces produkcji poprzez zastosowanie kultur starterowych o większej aktywności enzymatycznej oraz dostosowanie parametrów produkcji, w tym: temperatury, czasu, zawartości soli oraz kwasowości do wartości optymalnych dla rozwoju bakterii kultur starterowych, które mają istotny wpływ na proces dojrzewania sera (Hauque i in., 1997).

Podwyższenie temperatury dojrzewania o 3-4°C skraca czas dojrzewania sera, ale może pogorszyć jego profil organoleptyczny (Eck i Gillis, 2000). W badaniach przeprowadzonych przez Plutę i in. (2008), dotyczących dojrzewania sera typu holenderskiego o obniżonej zawartości tłuszczu, stwierdzono, że podwyższenie temperatury dojrzewania sera z 12^{o}C do 18^{o}C, skutkowało przyspieszeniem procesów proteolitycznych, które mogą wpływać na pogorszenie cech sensorycznych badanego sera.

2.2.5. Dodatek preparatów białek serwatkowych

Mikropartykulaty białek serwatkowych wykorzystuje się w celu poprawy profilu tekstury większości rodzajów serów miękkich i dojrzewających, serów topionych, deserów mlecznych i produktów twarogowych, jogurtów, lodów, dipów i sosów oraz innych produktów spożywczych zawierających tłuszcze. Ze względu na wielkość cząstek mikropartykułowanych białek serwatkowych, która wynosi 0,5÷15 μm i jest zbliżona do rozmiaru kuleczek tłuszczowych mleka (0,2 do 15μm), białka te mogą pełnić funkcję substytutu tłuszczu (Smoczyński, 2014).

Do zalet stosowania mikropartykulatów białek serwatkowych należy:

- zwiększenie zawartości białka w produkcie,
- zastąpienie kazeiny w produktach na mniej kosztowne białka serwatkowe,
- substytucja tłuszczu mlekowego,
- zwiększenie zdolności wiązania wody przez produkt,

- wzrost wydajności, oszczędność wynikająca z mniejszego zużycia surowca,
- poprawa jakości produktów niskotłuszczowych, https://www.alpma.co.uk/process-technology/creamoprot.html, (12.08.2020).

Dodatek mikropartykułowanych białek serwatkowych do produkcji serów powoduje zwiększenie zawartości suchej masy beztłuszczowej, gęstości i wielkości cząstek mleka. Dodatek mikropartykułowanych białek serwatkowych do mleka przyczynia się do spowolnienia dynamiki jego ukwaszania i wydłużenia procesu koagulacji. Wpływa na poprawę tekstury sera niskotłuszczowego i wywołuje wrażenie kremowości tekstury oraz poprawę smaku (Stankey i in., 2017). Badania Stankey i in. (2017) wykazały, że dodatek białek serwatkowych jako wypełniacza w strukturze sera, powoduje poprawę jego cech jakościowych.

Badania Koca i Metin (2004) wykazały, że zastosowanie zamienników tłuszczu w postaci dodatku 1% mikropartykułowanych białek serwatkowych oraz 5% zamiennika węglowodanowego podczas produkcji sera Kashar, miało wpływ na parametry tekstury badanego sera. Dodatki te przyczyniły się do obniżenia twardości, sprężystości, gumowatości sera oraz zwiększenia jego spoistości.

2.2.6. Mimetyki tłuszczu

Mimetyki tłuszczu to substancje, które mogą naśladować niektóre właściwości organoleptyczne i fizyczne cząsteczek tłuszczu. Mogą to być cząsteczki białkowe lub węglowodanowe, które można modyfikować. Mimetyki tłuszczu są z reguły związkami polarnymi, rozpuszczalnymi w wodzie. Ich polarny charakter ułatwia wiązanie wody, co pomaga kształtować pożądane wrażenie kremowości i smarowności produktów z ich dodatkiem, pobrane z https://www.sciencedirect.com/topics/food-science/fat-replacers/, (12.11.2023).

Mimetyki tłuszczu nie nadają się do stosowania w żywności wymagającej wysokich temperatur obróbki, takich jak np. smażenie, ponieważ są podatne na denaturację lub karmelizację. Jednak ich dodatek znajduje zastosowanie w przemyśle spożywczym, co docenią konsumenci dbający o niskokaloryczną dietę (Paximada i in., 2021).

Mimetyki tłuszczu dzielą się na dwie grupy:

- pochodzenia węglowodanowego,
- pochodzenia białkowego.

W produkcji sera o obniżonej zawartości tłuszczu zamienniki węglowodanowe w roli tłuszczu sprawdzają się lepiej niż białkowe, gdyż w większym stopniu upodabniają ich teksturę do tekstury sera pełnotłustego (Ma i in., 1997).

Najczęściej stosowanymi węglowodanowymi zamiennikami tłuszczu są: karagen, pochodne celulozy, inulina, skrobia modyfikowana, pektyny niskometylowe. Zamienniki te, dzięki dużej wodochłonności, powodują rozluźnienie struktury białkowej serów oraz uplastyczniają i rozluźniają ich teksturę (Bullens i in., 1994).

Badania wykazały, że dodatek 0,1% karboksymetylocelulozy lub 0,02% karagenu do mleka podczas produkcji serów niskotłuszczowych, powodował rozluźnienie matrycy białkowej i wpłynął korzystnie na teksturę sera (Bullens i in., 1994).

Jednym z węglowodanowych zamienników tłuszczu, który może być stosowany w produkcji serów niskotłuszczowych jest inulina, która poza właściwościami prozdrowotnymi, posiada również szereg cech przydatnych w technologii przemysłu spożywczego. Do jej właściwości funkcjonalnych należą: strukturotwórczość, żelowanie, zagęszczanie oraz stabilizacja układów emulsyjnych, dzięki czemu często stosowana jest jako zamiennik tłuszczów oraz sacharozy (Cieślik i Gębusia, 2011). Inulina, szczególnie w większych stężeniach, posiada bardzo dobre właściwości tworzenia żeli, których cechy są zbliżone do sieci krystalicznej tłuszczu. Dzięki temu znalazła szerokie zastosowanie jako substytut tłuszczu przyczyniając się do nadania gęstej, gładkiej i kremowej struktury oraz delikatnego smaku serów (Bortkun, 2002).

Stabilność chemiczna inuliny zmniejsza się wraz ze spadkiem wartości pH poniżej 4,0 oraz ze wzrostem temperatury i wydłużeniem czasu ogrzewania. Stosowanie inuliny w codziennej diecie przyczynia się do obniżenia poziomu cholesterolu we krwi, co powiązane jest ze zdolnością wiązania kwasów tłuszczowych w jelitach (Anderson, 1999).

Badania wykazały, że dodatek inuliny na poziomie 2% podczas produkcji niskotłuszczowego sera Mozzarella, wpływał na polepszenie tekstury poprzez wzrost zawartości wody, upodabniając go do sera pełnotłustego (Pagliarini i in., 1994).

Moghiseh i in. (2021) w badaniach sera Mozzarella o obniżonej zawartości tłuszczu z dodatkiem 6% roztworu inuliny i 0,1% roztworu kefiranu, dodawanego w różnych proporcjach, wykazali, że zwiększenie dodatku inuliny powodowało zwiększenie

zawartości białka w powstałym serze. W badaniach tekstury, zaobserwowano wzrost twardości oraz spoistości wyprodukowanego sera przy równoczesnym zmniejszeniu jego sprężystości (Moghiseh i in., 2021).

Hicks i in. (1985) prowadzili badania sera niskotłuszczowego Cheddar z dodatkiem lecytyny do mleka serowarskiego. Stwierdzono, że dodatek lecytyny w ilości 0,05% oraz 0,1% poprawił wydatek sera oraz wpłynął pozytywnie na profil tekstury.

2.2.7. Substytuty tłuszczu

Substytuty tłuszczu to cząsteczki posiadające właściwości fizyczne i funkcjonalne cząsteczek tłuszczu (np. triacylogliceroli). Substytuty tłuszczu są to zazwyczaj cząsteczki syntetyczne lub cząsteczki lipidów, które mogą bezpośrednio zastępować cząsteczki tłuszczu w żywności, zapewniając mniejszą jej kaloryczność. Wykazują teksturę i smak zbliżony do tłuszczu mlekowego i są nośnikiem innych rozpuszczalnych w tłuszczach substancji smakowych. Są stabilne termicznie i nadają się do gotowania i smażenia w wysokiej temperaturze. Substytuty tłuszczu mlekowego stanowiące mieszaninę białek i węglowodanów, są stosowane w celu uzyskania obniżonej kaloryczności serów (Giese, 1996). Przykładami preparatów handlowych tego rodzaju substancji są: Salatrim, Olestra, Carprenin, Prolestra. Z pośród wymienionych, syntetyczne substytuty tłuszczu tj. Olestra i Prolesta nie znalazły zastosowania do szerokiej produkcji wyrobów seropodobnych ze względu na niekorzystny wpływ na teksturę (Aljewicz i in., 2011).

Sahan i in. (2008) badali właściwości sera Kashar z dodatkiem trzech zamienników tłuszczu: Simplesse D-100 (białkowy substytut tłuszczu), Avicel Plus CM (stabilizator na bazie celulozy), β-glukan (polisacharyd, błonnik pokarmowy). Badania wykazały wpływ zastosowanych dodatków na wzrost zawartości białka i poprawę jakości otrzymanego sera. Zastosowanie zamienników tłuszczu w produkcji sera Kashar przyspieszyło także proces proteolizy (Sahan i in., 2008).

2.2.8. Frakcje tłuszczu mlekowego

Tłuszcz mlekowy zawiera wiele cennych i niezbędnych związków chemicznych, stanowiących budulec organizmu, między innymi: fosfolipidy oraz witaminy A, D, E, i K, regulujące pracę wielu narządów. Stanowi on źródło łatwo przyswajalnej energii.

W tłuszczu mlekowym występuje ponad 400 rodzajów kwasów tłuszczowych, w tym izomery kwasu linolenowego (np. ALA) czy sprzężony kwas linolowy (CLA), które regulują zawartość cholesterolu we krwi i stanowią czynnik przeciwnowotworowy.

Tłuszcz mlekowy posiada zdolność poprawy tekstury, pełni funkcję nośnika smaku i modyfikuje cechy sensoryczne produktów mleczarskich (Koca i Metin, 2004).

Zakres temperatur topnienia tłuszczu mlekowego kształtuje się na poziomie od -40^{o}C do +40^{o}C. W związku z tym istnieje możliwość rozdziału tłuszczu na frakcje o różnym składzie i właściwościach w kontrolowanych warunkach ich temperatury krystalizacji. Istnieje wiele metod frakcjonowania tłuszczu min. frakcjonowanie z użyciem i bez użycia rozpuszczalnika, destylacja molekularna czy ekstrakcja z CO_2 w stanie nadkrytycznym (Staniewski, 2001).

Tłuszcz mlekowy można podzielić na frakcję stałą i płynną w określonej temperaturze. Przyjmuje się, że temperatura topnienia frakcji wysokotopliwych wynosi powyżej 38^{o}C, natomiast frakcji niskotopliwych w granicach 21^{o}C-28^{o}C (Illingworth i in., 2009). Frakcje stałe i frakcje płynne mają odmienne właściwości i przydatność technologiczną. Frakcje stałe charakteryzują się wyższym udziałem nasyconych kwasów tłuszczowych (NKT), natomiast frakcje płynne zawierają więcej nienasyconych kwasów tłuszczowych (NNKT), w tym cennego w aspekcie żywieniowym CLA.

Frakcjonowanie tłuszczu mlekowego jest jednym ze sposobów modyfikacji, które ma na celu poprawę właściwości funkcjonalnych a także żywieniowych produktów mleczarskich. Różnicowanie zawartości poszczególnych frakcji triacyloglicerolowych pozwala na uzyskanie produktu o pożądanej teksturze (Stępniak, 1998).

Badania Ahmad i in. (2015) wykazały, że sery z dodatkiem frakcji tłuszczu mlekowego płynnych w temp. 10°C, 15°C, i 25°C, dojrzewały szybciej niż ser kontrolny. Poprawie uległy także cechy tekstury oraz cechy sensoryczne tych serów w porównaniu z serem kontrolnym (Ahmad i in., 2015).

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie prac badawczych, których przedmiotem były sery o obniżonej zawartości tłuszczu ze wskazaniem sposobu i wielkości redukcji zawartości tłuszczu oraz najważniejszych rezultatów.

Tabela 2. Wpływ redukcji zawartości tłuszczu na cechy jakościowe serów

Rodzaj sera	Poziom redukcji tłuszczu	Sposób redukcji tłuszczu	Badane parametry	Kluczowe wnioski	Literatura
Ser Cheddar	Zawartość tłuszczu 34%, 32%, 27%, 21% i 13%.	Normalizacja zawartości tłuszczu w mleku serowarskim odpowiednio do poziomu 3,8%; 3,2%; 2,4%; 1,6%; 0,8%.	Parametry tekstury	• Twardość i sprężystość sera uległa zmianie wraz ze zmianą zawartości tłuszczu. Sery o najwyższej zawartości tłuszczu były mniej twarde od sera o zawartości tłuszczu na poziomie 13%. Adhezyjność i spójność serów zmniejszała się wraz ze spadkiem zawartości tłuszczu w serze.	Bryant i in. (1995) Texture of Cheddar cheeses as influenced by fat reduction. J. Food Sci., 60, 1216-1219.
Ser Cheddar	Zawartość tłuszczu obniżono do 7,2%. Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym 16,5%.	Mleko odtłuszczone standaryzowano śmietanką do zawartości 1,4% tłuszczu. Dodano maślankę poddaną ultrafiltracji w ilości 3% i 5%.	Parametry tekstury	• Parametry tekstury serów po 4 tygodniach były jakościowo wyższe niż sera kontrolnego. • Różnice te były jednak mniejsze w 24 tygodniu badań.	Mistry i in. (1996) Use of ultrafiltrated sweet buttermilk in manufacture of reduced-fat Cheddar cheese**.** Int. Dairy Sci., 79, 1137-1145.
Ser Cheddar	Zawartość tłuszczu 6%, 16% i 33% w serze kontrolnym.	Mleko standaryzowano wg. proporcji białka do tłuszczu wynoszących 0,83, 1,9 i 5,0 do produkcji odpowiednio serów pełnotłustych, o obniżonej zawartości tłuszczu i niskotłuszczowych.	Analiza sensoryczna serów o zawartości tłuszczu 6%, 16% i 33% po 0,5, 3, 6 i 9 miesiącach dojrzewania	• Analiza sensoryczna wykazała, że sery niskotłuszczowe o zawartości tłuszczu 6% były bardziej sprężyste i twarde niż pozostałe sery. W trakcie przeżuwania, sery pełnotłuste ulegały szybszemu rozdzieleniu niż sery o niższej zawartości tłuszczu a stopień rozdzielania wzrastał wraz z czasem analizy.	Rogers i in. (2009) The effect of aging on low-fat, reduced-fat, and full-fat Cheddar cheese texture. J. Dairy Sci., 92, 4756-4772.
Ser Cheddar	Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym 34,69%, redukcja	Redukcja tłuszczu przez dodatek koncentratu kazeiny,	Parametry tekstury	• Uzyskano zawartość białka w serze na poziomie 28%, tłuszczu na poziomie 6% oraz	Amelia i in. (2013)

	tłuszczu do poziomu 6%.	zastosowanie 3-etapowej mikrofiltracji. Uzyskano zawartość białka na poziomie 28%.		NaCl na poziomie 1,2%, parametry tekstury uległy polepszeniu.	A new method for the production of low-fat Cheddar cheese. J. Dairy Sci., 96, 8, 4870-84.
Ser Cheddar	Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym 7,34%. Zawartość tłuszczu w serze z dodatkiem: 0,15% MWP-7,32% 0,35% MWP-7,07% 0,50% MWP-6,83%	Dodatek 0,15%, 0,35% oraz 0,50% mikrocząsteczkowego białka serwatkowego (MWP)	Parametry tekstury po 14, 30, 90, 180 dniach	• Dodatek białek serwatkowych polepszył parametry tekstury sera oraz właściwości sensoryczne. Wyniki podkreślają rolę białek serwatkowych jako wypełniacza w matrycy kazeinowej w poprawie parametrów tekstury, bez pogorszenia jakości sensorycznej serów.	Stankey i in. (2017) Low-fat Cheddar cheese made using microparticulated whey proteins: Effect on yield and cheese quality. International Journal of Dairy Technology, 70, 481-491
Ser Cheddar	Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym 28,14%. Zawartość tłuszczu w serze z frakcją płynną dodaną w: temp. 10°C-28,15%, temp. 15°C-27,90%, temp. 25°C-29,64%	Dodatek frakcji tłuszczu mlekowego płynnej w temp. 10°C, 15°C, 25°C, frakcjonowanie na sucho.	Parametry tekstury	• Sery z frakcją tłuszczową dojrzewały szybciej niż ser kontrolny. Cechy sensoryczne serów z frakcją po 60 dniach wykazywały lepsze parametry niż ser kontrolny. Skład chemiczny wszystkich serów nie różnił się znacząco.	Ahmad i in. (2015) Effects of Low-Melting Fractions of Milk Fat on Lipolysis of Cheddar Cheese. Journal of Precessing and Preservation, 39, 2516-2522.
Ser śmietankowy	Zawartość tłuszczu 0,5%, 5,5% oraz 11,6%.	Zawartość tłuszczu w mleku odpowiednio: 0,1%, 1,3% i 3,8%, dodatek śmietanki.	Ocena wpływu zawartości tłuszczu na właściwości reologiczne i strukturalne serów śmietankowych.	• Zawartość tłuszczu wpływała na właściwości reologiczne sera oraz polepszyła jego teksturę.	Ningtyas D. i in. (2017) A tribological analysis of cream cheeses manufactured with different fat content. International Dairy Journal. 73, 155-165.

Ser Cheddar	Zawartość tłuszczu w serach kontrolnych wynosiła od 31,56% do 32,41%.	Tłuszcz mlekowy o zawartości 3,5% tłuszczu, został częściowo zastąpiony olejem z nasion chia w ilości 2,5%, 5%, 7,5% i 10%. Sery były produkowane następująco: 97,5% tłuszczu mlekowego i 2,5% oleju chia; 95% tłuszczu mlekowego i 5% oleju chia; 92,5% tłuszczu mlekowego i 7,5% oleju chia; 90% tłuszczu mlekowego i 10% oleju chia.	Parametry tekstury	• Wyniki badań serów po 45 dniach i 90 dniach dojrzewania nie wykazały różnic w teksturze serów i sugerują, że korzyści zdrowotne związane ze spożywaniem kwasów tłuszczowych omega oraz naturalnych przeciwutleniaczy są potwierdzone naukowo.	Ullah i in. (2017) Omega fatty acids, phenolic compounds, and lipolysis of Cheddar cheese supplemented with chia (Salvia hispanica L.) oil. Journal of Food Processing and Preservation 42(3).
Ser Kashar	Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym 24,5%.Redukcja tłuszczu do poziomu 7,33% dla sera niskotłuszczowego oraz od 6,67% do 6,17% dla serów z zamiennikami tłuszczu.	Dodatek białkowych zamienników tłuszczu (1,0% Simplesses D-100 i 1,0% Dairy-Lot) oraz zamiennika tłuszczu na bazie węglowodanów (5,0% Raftilines HP).	Parametry tekstury	• Poprawa parametrów tekstury i właściwości sensorycznych badanego sera przy krótkotrwałym przechowywaniu do 60 dni. • Dodatek zamienników tłuszczu zmniejszył twardość, sprężystość, gumowatość sera oraz zwiększył jego spoistość.	Koca i Metin, (2004) Textural, melting and sensory properties of low-fat fresh Kashar cheese produced by using fat replacers. Int Dairy J. 14, 365-373.
Ser Mozzarella	Zawartość tłuszczu 5%, 10%, 15% i 25%.	Dodatek śmietanki niehomogenizowanej o zawartości 40% tłuszczu do mleka odtłuszczonego.	Parametry tekstury	• W miarę zmniejszania się zawartości tłuszczu wzrastała zawartość białka w serze. Wyższa zawartość tłuszczu wpływała na polepszenie parametrów tekstury: twardości, adhezyjności i elastyczności serów.	Rudan i in. (1999) Effect of fat reduction on chemical composition, proteolysis, functionality, and yield of Mozzarella cheese**.** J. Dairy Sci., 4, 661-72

Ser Prato	Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym 31,08%. Zawartość tłuszczu w serze z dodatkiem WPC 19,33%.	Dodatek koncentratu białek serwatkowych (WPC) w ilości 0,5%.	Ocena profilu składników lotnych sera Prato po 210 dniach przechowywania w temperaturze 12°C.	• Redukcja tłuszczu w oraz dodatek WPC zmieniły poziom niektórych związków lotnych oraz kwasów tłuszczowych co może mieć wpływ na właściwości sensoryczne tych serów w porównaniu z serem pełnotłustym.	Domingos i in. (2019) Fat reduction and whey protein concentrate addition alter the concentration of volatile compounds during Prato cheese ripening. Food Res. Int., 119, 793-804.
Ser Kashar	Sery kontrolne: • Pełnotłusty (zawartość tłuszczu w s.m. 42,98%) • Ser częściowo odtłuszczony (zawartość tłuszczu w s.m. 17,66%) Ser częściowo odtłuszczony z Simplesse D-100 (zawartość tłuszczu w s.m. 13,52%) Ser częściowo odtłuszczony z Avicel Plus CM 2159 (zawartość tłuszczu w s.m. 13,24%) Ser częściowo odtłuszczony z hydrokoloidalnym kompozytem β-glukanu (zawartość tłuszczu w s.m. 15,67%)	Dodatek trzech zamienników tłuszczu: Simplesse D-100 2159 w ilości 10g, Avicel Plus CM 2159 w ilości 10g i β-glukan w ilości 4g.	Ocena składu fizykochemicznego oraz tekstury sera z dodatkami.	• Nastąpił wzrost zawartości białka i poprawa jakości serów oraz przyspieszenie proteolizy. Obniżenie zawartości tłuszczu w produkcji sera Kashar zwiększyło jego twardość, sprężystość, spoistość i gumowatość. Ser z dodatkiem zamiennika Avicel Plus CM 2159 posiadał cechy sensoryczne najbliższe pełnotłustemu serowi Kashar.	Sahan i in. (2008) Influence of fat replacers on chemical composition, proteolysis, texture profiles, meltability and sensory properties of low-fat Kashar cheese. J Dairy Res.,75,1,1-7.

Ser Mozzarella	Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym 21,3%. Zawartość tłuszczu w serach z dodatkami od 11,3% do 15,8%.	Zastosowanie dodatków: 6% roztworu inuliny oraz 0,1 % roztworu kefiranu w różnych proporcjach przy produkcji sera niskotłuszczowego.	Ocena składu fizykochemicznego oraz parametrów tekstury.	• Zastosowanie dodatków w postaci roztworu 6% inuliny oraz 0,1% kefiranu w różnych proporcjach zwiększyło zawartości białka w badanych serach, poprawie uległy parametrów tekstury w związku z obniżeniem zawartości tłuszczu.	Moghiseh i in. (2021) Effect of inulin/kefiran mixture on the rheological and structural properties of mozzarella cheese. Int. J. Biol Macromol., 191, 1079-1086.
Ser niskotłuszczowy	Zawartość tłuszczu 7,9%.	Dodatek galaktomannanu (żel celulozowy) w ilości 0,5% i gumy guar (gumy Novagel) w ilości 0,3%. Zastosowanie ultrafiltracji.	Parametry tekstury	• Dodatek galaktomannanu w ilości 0,5% i Novagel w ilości 0,3% upodobniły profil tekstury badanego sera oraz jego właściwości sensoryczne do sera pełnotłustego.	Sharafi i in. (2020) The physicochemical, texture hardness and sensorial properties of ultrafiltrated low-fat cheese containinggalactomannan and novagel gum**.** Acta Sci Pol Technol Aliment., 19, 1, 83-100.
Ser Akawi	Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym 20%-23%. Zawartość tłuszczu w serach z dodatkiem: 3NaCl:1KCl - 20,8% 1NaCl:1KCl - 21,3% 1NaCl:3KCl – 19,5%	Dodatek NaCl oraz KCl w różnych proporcjach.	Ocena stopnia rozkładu białek w 0, 10, 20 i 30 dniu dojrzewania sera.	• Nastąpił wzrost zawartości wskaźników proteolizy: WSN (od 4,77 do 5,20) oraz TCA-SN (od 1,53 do 1,66) po 30 dniach przechowywania. • Zmniejszyła się zawartość PTA-SN (od 0,50 do 0,42). • Stwierdzono, że dodatek NaCl oraz KCl wpłynął na proces proteolizy podczas dojrzewania sera	Ayyash i in. (2012) The effect of NaCl substitution with KCl on Akawi cheese: Chemical composition, proteolysis, angiotensin-converting enzyme-inhibitory activity, probiotic survival, texture profile, and sensory properties. Journal of Dairy Science 95, 9, 4747-4759.

Źródło: opracowanie własne

2.3. Tekstura serów

Za pomocą tekstury określa się wszystkie cechy mechaniczne oraz powierzchniowe produktu spożywczego, które mogą być odbierane przez człowieka za pomocą receptorów mechanicznych, dotykowych, wzrokowych i słuchowych (Kycia, 2008).

Tekstura sera obok smaku i zapachu jest istotnym czynnikiem wpływającym na jakość produktu oraz wynik oceny konsumenckiej (Balejko i Balejko, 2011). Tekstura determinuje odpowiednią jakość produktu i tym samym wpływa na uzyskanie dobrej oceny przez konsumenta.

2.3.1. Czynniki kształtujące teksturę serów

Teksturę można zdefiniować jako wyróżnik jakości produktów spożywczych, których cechy mogą być oceniane na podstawie zmysłów, takich jak dotyk, słuch i wzrok (Van Vliet i in., 2009).

Do czynników wpływających na teksturę serów należą (Lucey i in., 2003):

- skład fizykochemiczny badanego sera (zawartość suchej masy, białka, tłuszczu i składników mineralnych),
- dodatki stosowane w procesie produkcji (rodzaj kultur bakteryjnych i enzymu koagulującego),
- przebieg procesu produkcji i stosowanie odpowiednich parametrów technologicznych (obróbka cieplna, tworzenie skrzepu),
- dojrzewanie sera (temperatura dojrzewania, pH, aktywność wody).

Fenelon i in. (2000) zaobserwowali, że największy wpływ na cechy sensoryczne sera ma ilość tłuszczu w nim zawarta. Tłuszcz wpływa w większym stopniu na teksturę sera niż na jego smak lub zapach (Bayarii i in., 2012).

Tłuszcz mlekowy nadaje serom miękkości i smarowności. Gdy zawartość tłuszczu w produkcie ulega obniżeniu, wiązania białkowe stają się mocniejsze i wpływają na twardość i zwięzłość struktury sera (Kycia, 2008).

Homogenizacja mleka serowarskiego w produkcji serów niskotłuszczowych wpływa na nieznaczne zmniejszenie twardości i elastyczności sera (Pluta, 2009). Dodatek wody technologicznej do kotła serowarskiego podczas dogrzewania ziarna powoduje

zmniejszenie stężenia składników wpływających na teksturę sera, czyli laktozy i kwasu mlekowego.

Dodatek odpowiednio dobranych kultur bakteryjnych oraz enzymu koagulującego wpływa na uzyskanie charakterystycznych i pożądanych cech organoleptycznych gotowego produktu. Proces dojrzewania sera obejmuje wiele przemian biochemicznych odpowiadających za teksturę, smak, zapach i wygląd dojrzałych serów.

Najważniejszym elementem procesu technologicznego każdego sera jest przebieg procesu synerezy, podczas którego kształtuje się tekstura sera. Proces synerezy wpływa także na proporcje pomiędzy enzymem koagulującym, plazminą oraz liczbą bakterii w skrzepie, które w późniejszych etapach procesu technologicznego produkcji sera biorą udział w procesie dojrzewania serów. W trakcie procesu produkcji i dojrzewania sera kształtuje się jego smak.

Wzrost kwasowości (obniżenie wartości pH) podczas procesu produkcji serów ma wpływ na tworzenie się skrzepu, przebieg synerezy, ogranicza lub hamuje rozwój drobnoustrojów, które wpływają na teksturę dojrzewającego sera.

2.3.2. Metody oceny tekstury serów

Metody stosowane do oceny właściwości teksturalnych sera można podzielić na:

- analizy sensoryczne,
- metody instrumentalne.

Analiza sensoryczna w badaniach tekstury polega na jej ocenie przez panel sensoryczny, który stanowi zespół uprzednio przeszkolonych, wrażliwych na bodźce sensoryczne osób (Brown i in., 2003). Tego typu badania mogą być jednak obarczone błędem, z uwagi na osobiste upodobania osób, biorących udział w tej analizie (Mariańczuk i in., 2020).

Do metod analizy sensorycznej należą (Brown i in., 2003):

1. ocena wzrokowa (pozwala ocenić wygląd zewnętrzny oraz wewnętrzny produktu),
2. metoda dotyku ręką (ocena twardości, sprężystości oraz tempo odkształcenia badanego produktu przez ściśnięcie próbki),
3. metoda „pierwszego kęsa” (pozwala ocenić twardość próbki oraz łatwość rozpadu podczas pierwszego przegryzienia próbki),
4. przeżuwanie (pozwala ocenić przeżuwalność, spoistość, gumowatość i adhezyjność badanej próbki).

W ocenie sensorycznej tekstury bardzo istotną czynnością wpływającą na wynik badań, jest odpowiednie przygotowanie próbki, w tym jej wielkość i temperatura.

Weryfikacja wzrokowa pomaga ocenić wygląd zewnętrzny, w tym przekrój badanego produktu. Poprzez dotyk można ocenić twardość, sprężystość oraz tempo odkształcenia produktu. Używa się do tego techniki polegającej na ściśnięciu próbki w odpowiedni sposób między kciukiem i dwoma pierwszymi palcami (Brown i in., 2003).

Uważa się, że zęby oraz język, odpowiedzialne za przeżuwanie i rozdrabnianie pokarmu, mogą odbierać, takie parametry jak lepkość, twardość oraz kruchość, które są skorelowane ze stopniem deformacji pożywienia oraz szybkością jego przetwarzania (Balejko i Balejko, 2011). Podczas „pierwszego kęsa" bada się twardość próbki oraz łatwość jej rozpadu. Ocenę próbki przeprowadza się w czasie pierwszego przegryzienia, za pomocą zębów trzonowych. Podczas przeżuwania ocenia się takie parametry jak adhezyjność, spoistość, gumowatość i przeżuwalność. Po przeżuciu można ocenić gładkość lub ziarnistość badanej próbki (Brown i in., 2003).

Do analizy instrumentalnej tekstury wykorzystywane są różne urządzenia czy aparatura pomiarowa. Zaletami metod instrumentalnych są: niższe koszty, krótszy czas wykonania i co ważne powtarzalność wyników (Dolik i in., 2010).

W tabeli 3 przedstawiono definicje sensoryczne i instrumentalne dla poszczególnych parametrów charakteryzujących teksturę produktu zaproponowane przez Bourne (1978).

Jedną z metod instrumentalnych jest analiza profilu tekstury (z ang. texture profile analysis, test TPA), która polega na dwukrotnym ściśnięciu próbki z użyciem specjalnej sondy, pod którą umieszcza się wycięte w formie kwadratu próbki o ustalonej wielkości (Nishinari i in., 2013).

Tabela 3. Definicja sensoryczna i instrumentalna parametrów tekstury

Parametr tekstury	Definicja sensoryczna	Definicja instrumentalna w odniesieniu do testu TPA
Twardość	Siła niezbędna do ściśnięcia (kompresji) próbki.	Maksymalna siła rejestrowana w trakcie 1 cyklu kompresji.
Sprężystość	Odległość na jaką zdeformowana próbka odzyska swój wymiar po ustąpieniu sił deformujących.	Różnica między wysokością próbki przed i po pierwszym cyklu kompresyjnym.
Adhezyjność	Praca potrzebna do przezwyciężenia sił przylegania (przyciągania) między powierzchnią próbki a powierzchnią innych obiektów, z którymi wchodzi w styczność.	Praca potrzebna do oderwania sondy od próbki (zakres rejestrowanych obciążeń ujemnych).
Spoistość	Siła wiązań wewnętrznych konstytuujących strukturę próbki.	Stosunek pracy wykonanej w celu kompresji próbki podczas pierwszego cyklu i drugiego cyklu kompresyjnego.
Łamliwość	Siła, przy której próbka ulega przełamaniu.	Pierwsze znaczące załamanie rejestrowanego obciążenia podczas pierwszego cyklu kompresji.
Gumowatość	Siła potrzebna do zniszczenia wiązań wewnętrznych próbki.	Parametr wyliczany: twardość x spoistość.
Przeżuwalność	Praca potrzebna do zniszczenia wiązań wewnętrznych próbki.	Parametr wyliczany: gumowatość x sprężystość.
Elastyczność	Oporność materiału oraz jego natychmiastowy powrót do pierwotnej pozycji.	Różnica między wysokością próbki przed i po pierwszej kompresji.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Bourne, 1978)

Rezultaty testu TPA pozwalają na opisanie badanej próbki za pomocą zmierzonych parametrów, do których należy twardość, sprężystość, adhezyjność, spoistość, łamliwość, gumowatość, przeżuwalność i elastyczność (Brown i in., 2003).

3. GŁÓWNE CELE ROZPRAWY I ORGANIZACJA BADAŃ

3.1. Cele i hipotezy pracy

Głównym celem pracy było określenie czynników determinujących jakość serów o obniżonej zawartości tłuszczu oraz sposobów sterowania wyróżnikami jakościowymi takich serów poprzez zastosowanie różnych dodatków. Cele szczegółowe obejmowały:

- wyznaczenie korelacji między poszczególnymi składowymi jakości serów o obniżonej zawartości tłuszczu;
- wyznaczenie czynników, które w największym stopniu wpływają na teksturę produktów;
- ocenę wpływu dodatku mikropartykułowanych białek serwatkowych oraz mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną na cechy fizykochemiczne, w tym profil tekstury serów o obniżonej zawartości tłuszczu;
- ocenę wpływu dodatku frakcji tłuszczu mlekowego uzyskanych w temperaturze 20ºC i 30ºC na cechy fizykochemiczne, w tym profil tekstury serów o obniżonej zawartości tłuszczu.

W pracy zdefiniowano następujące hipotezy badawcze:

H1: Sery o obniżonej zawartości tłuszczu dzięki zastosowaniu różnych zabiegów technologicznych związanych ze zwiększeniem wody w produkcie wykazują cechy jakościowe serów pełnotłustych.

H2: Tekstura serów jest silnie skorelowana z zawartością tłuszczu.

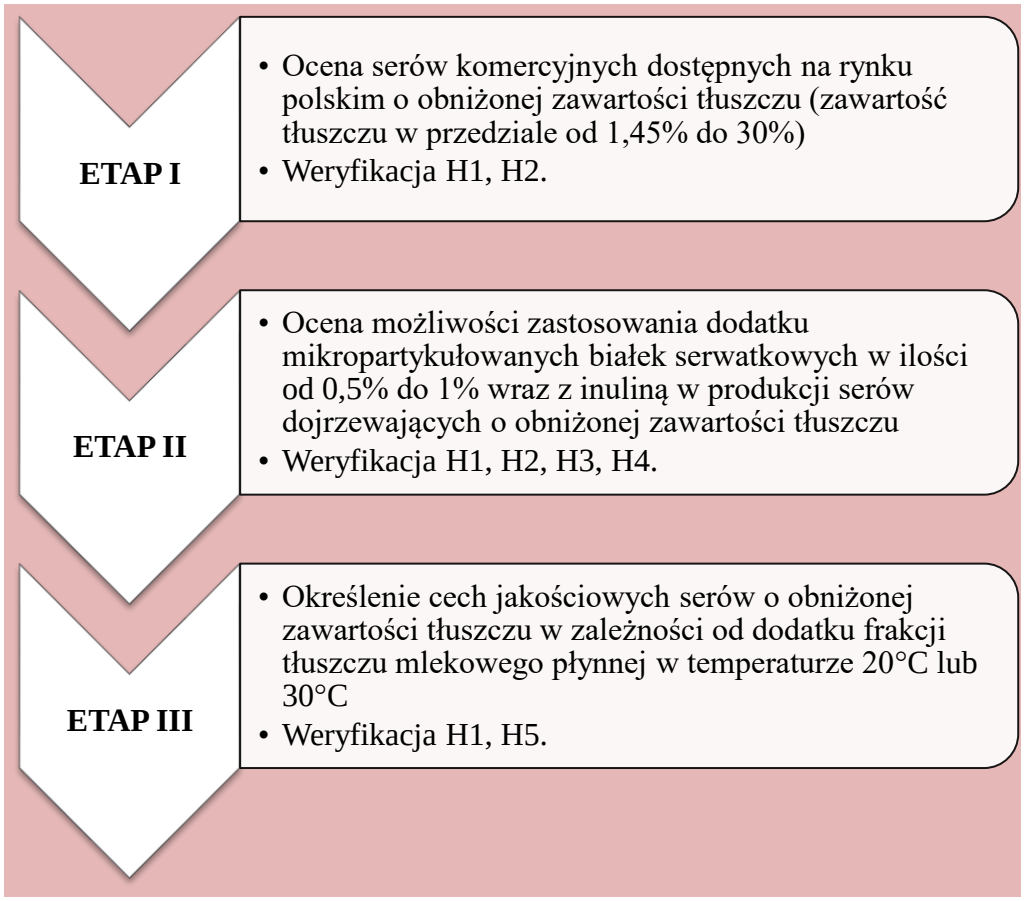
H3: Dodatek mikropartykułowanych białkek serwatkowych pozytywnie wpływa na teksturę serów.

H4: Dodatek inuliny wraz z mikropartykułowanymi białkami serwatkowymi pozytywnie wpływa na teksturę serów.

H5: Dodatek frakcji tłuszczu mlekowego płynnych w temperaturze 20ºC i 30ºC pozytywnie wpływa na cechy jakościowe serów, w szczególności na teksturę.

3.2. Organizacja badań

Realizacja celów pracy i weryfikacja hipotez badawczych przebiegała w trzech etapach zgodnie z planem badań przedstawionym na rysunku 2.



Rysunek 2. Plan badań pracy

4. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

4.1. Materiał badany

Materiał do badań stanowiły następujące sery:

Etap I

1. Sery o obniżonej zawartości tłuszczu:
   - ser A (producent: SM Spomlek w Radzyniu Podlaskim),
   - ser B (producent: SM Ryki),
   - ser C (producent: Ceko Sp. z o.o. w Goliszewie),
   - ser D (producent: OSM Kosów Lacki),
   - ser E (producent: Ceko Sp. z o.o. w Goliszewie),
   - ser F (producent: OSM Kosów Lacki),
2. Ser kontrolny: ser GG, Grand Gouda (producent: SM Spomlek w Radzyniu Podlaskim);
3. Sery referencyjne do badań tekstury:
   - ser Parmigiano Reggiano (Bonat, Włochy),
   - ser Mozzarella (SM Mlekovita, Wysokie Mazowieckie),
   - ser Grand Gouda (SM Spomlek, Radzyń Podlaski),
   - ser Cheddar (Kerry Gold Mature, Irlandia).

W tabeli 4 przedstawiono skład chemiczny serów deklarowany przez producentów na opakowaniach produktów. Sery o obniżonej zawartości tłuszczu oraz ser pełnotłusty zostały zakupione w hurtowniach spożywczo-przemysłowych na terenie Olsztyna, każdy w bloku o masie ok. 2 kg. Sery zapakowane były w czyste, nienaruszone i szczelne opakowania (folia typu CRYOVAC).

Sery do czasu analiz przechowywano w warunkach chłodniczych (temperatura przechowywania 3°C). Bezpośrednio przed analizą sery rozpakowano z opakowań jednostkowych i pobrano reprezentatywne próbki według normy ISO 707:2012

W celu wykonania analiz chemicznych próbki serów rozdrobniono za pomocą urządzenia Santos (Boska Holland, Nowy York, USA). Po rozdrobnieniu próbki poddano standaryzacji do temperatury 20°C i dokładnie wymieszano w celu rozdzielenia połączonych cząstek startego sera.

Tabela 4. Skład chemiczny serów deklarowany przez producentów na jednostkowych opakowaniach produktów (zawartość składników odżywczych podane są w przeliczeniu na 100 g produktu)

Rodzaj sera	Wartość energetyczna (w100g produktu)	Tłuszcz (g)	Węglowodany (g)	Białko (g)	Sól (g)
A	1124 kJ /269 kcal	17	0,1	29	1,5
B	1100 kJ /263 kcal	13,2	2,93	33	b.d.
C	703 kJ /166 kcal	2,7	0,5	35	b.d.
D	1065 kJ /254 kcal	12	2,5	24	b.d.
E	1342 kJ /322 kcal	22	0,5	30,5	1,1
F	770 kJ/183 kcal	5	1,4	33	1,7
GG	1455 kJ /350 kcal	27	0,8	26	1,2
Parmigiano Reggiano	1633 kJ /392 kcal	17	0,1	29	1,6
Mozzarella	1191 kJ /286 kcal	20	1,5	25	1,5
Cheddar	1725 kJ /416 kcal	34	0,1	25	1,9

b.d. – brak danych
Źródło: opracowanie własne

Etap II

Sery podpuszczkowe dojrzewające o obniżonej zawartości tłuszczu, wyprodukowane w warunkach przemysłowych w Spółdzielni Mleczarskiej Ryki, zgodnie z technologią serów typu holenderskiego:

- ser o obniżonej zawartości tłuszczu z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych w ilości 1000 g/100 litrów mleka,
- ser o obniżonej zawartości tłuszczu z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych w ilości 750 g/100 litrów mleka oraz inuliny w ilości 300 g/100 litrów mleka,
- ser kontrolny o obniżonej zawartości tłuszczu wyprodukowany zgodnie z normą zakładową sera ,,Hit z Ryk".

W badaniach zastosowano mikropartykulat NUTRILAC® CH-4560 (Arla, Sønderhøj, Dania). Sery zapakowane w folię typu Cryovac zostały przetransportowane do dojrzewalni, gdzie dojrzewały w temperaturze 12ºC przy wilgotności względnej powietrza 80-85%. Próbki do badań pobierano w 2-tygodniowych odstępach czasowych, tj. po 2, 4, 6 i 8 tygodniach dojrzewania. Sery do czasu analiz przechowywano w warunkach chłodniczych (temperatura przechowywania 4°C). Badaniom poddano sery z trzech partii produkcyjnych.

Etap III

Sery podpuszczkowe dojrzewające wyprodukowane w Hali Technologicznej Katedry Mleczarstwa i Zarządzania Jakością Wydziału Nauki o Żywności, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, zgodnie z technologią serów typu holenderskiego:

- ser z mleka odtłuszczonego z dodatkiem frakcji tłuszczu mlekowego płynnej w temperaturze 20ºC;
- ser z mleka odtłuszczonego z dodatkiem frakcji tłuszczu mlekowego płynnej w temperaturze 30ºC;
- ser kontrolny z mleka odtłuszczonego z dodatkiem śmietanki.

Dodatek frakcji tłuszczu wynosił 131 g na 15 litrów mleka.

Sery po soleniu i ociekaniu dojrzewały w komorze KK 1200 (Pol-Eko-Aparatura Sp. J., Wodzisław Śl., Polska) w temperaturze 12ºC i wilgotności 85%. Próbki do badań

pobierano w następujących odstępach czasowych: po 1, 7, 14 i 28 dniach dojrzewania. Badaniom poddano sery z trzech partii produkcyjnych.

Rozdziału tłuszczu mlekowego na frakcje dokonano bez użycia rozpuszczalnika, metodą szeregową w temperaturach 30^{o}C i 20^{o}C. Bezwodny tłuszcz mlekowy upłynniono w temperaturze 64^{o}C, a następnie próbki tłuszczu umieszczono w suszarce laboratoryjnej z nastawą temperatury 30^{o}C, z konwekcją wymuszoną (Binder), na okres 72h. Po tym czasie rozdzielano tłuszcz mlekowy na frakcję stałą i płynną przy użyciu lejka szklanego oraz waty bawełniano-wiskozowej jako podłoża filtrującego. Uzyskano frakcję stałą w temperaturze 30^{o}C oraz frakcję płynną w temperaturze 30^{o}C. Frakcję płynną w temperaturze 30^{o}C poddano kolejnej krystalizacji w temperaturze 20^{o}C przez 72h. Uzyskano frakcję stałą w temperaturze 20^{o}C oraz frakcję płynną w temperaturze 20^{o}C. Na tym etapie zakończono proces frakcjonowania. Badaniom poddano sery z trzech partii produkcyjnych.

4.2. Metodyka badań

4.2.1. Skład fizykochemiczny

W badanych serach określono:

- podstawowy skład chemiczny:
  - zawartość wody i suchej masy oznaczono grawimetrycznie poprzez suszenie 2,0 g sera w suszarce z wymuszonym obiegiem powietrza, w temperaturze 100^{o}C przez 24 h (metoda 990.20; 33.2.44, AOAC 2007),
  - zawartość tłuszczu (metoda ekstrakcyjna, metoda 989.05; 33.2.26, AOAC 2007),
  - zawartość azotu ogółem (metoda Kjeldahla, metoda 991.20; 33.2.11, AOAC 2007),
  - zawartość NaCl (Foodscan, Foss, Hillerod, Dania),
- zawartość składników mineralnych (Ca, Mg, Na, K, P) wg normy ISO 8070:2007, IDF 119:2007, Milk and milk products – Determination of calcium, sodium, potassium and magnesium contents – Atomic absorption spectrometric method. Zawartość wapnia, magnezu, sodu i potasu oznaczono w zmineralizowanych próbkach serów metodą Atomowej Spektroskopii Absorpcyjnej (ASA)

Pierwiastki Mg i Ca, Na i K oznaczono z zastosowaniem lamp (płomień: acetylen-powietrze). Fosfor w mineralizatach oznaczono metodą kolorymetryczną z molibdenianem amonu oraz z siarczanem sodu i hydrochinonem z zastosowaniem spektrofotometru (Spectrophotometr PG Instruments T90, Londyn, Anglia) przy długości fali λ=610 nm.

- aktywność wody – z wykorzystaniem miernika RotronicHygro Palm 23-A (Rotronic AG, Basserdorf, Szwajcaria),
- kwasowość czynną (wartość pH) przy użyciu pH-metru (Testo 205 Set).

4.2.2. Ocena stopnia rozkładu białek w serach

Ocenę stopnia rozkładu białek w serach przeprowadzono metodą Kjeldahla (991.20; 33.2.11, AOAC 2007) oznaczając zawartość azotu rozpuszczalnego w frakcji wodnej (ang. Water Soluble Fraction (WSF)), w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) i w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) według Kuchroo i Fox, 1982. Zawartość związków rozpuszczalnych w wodzie oznaczono w 2 ml przesączu natomiast zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA i w 5% PTA w 5 ml przesączu (Heldrich, 1990, Cichosz i in., 2005).

4.2.3. Profil kwasów tłuszczowych

Kwasy tłuszczowe oznaczono metodą chromatografii gazowej (Agilent Technologies, Santa Clara, USA) z użyciem helu jako gazu nośnego. Estry metylowe kwasów tłuszczowych przygotowano zgodnie z IDF Standard 182:1999.

Zastosowano następujące warunki rozdziału chromatograficznego: kolumna kapilarna CP-Sil 88; gradient temperatury: 60°C przez 1 min, przyrost do temperatury 180°C przy ΔT=5°C; objętość dozowanej próbki 1 µl. Określono względne procentowe zawartości poszczególnych kwasów tłuszczowych nasyconych i nienasyconych krótko-, średnio- i długołańcuchowych w serach o obniżonej zawartości tłuszczu i porównano je do profilu kwasów tłuszczowych w serze pełnotłustym.

4.2.4. Mikrostruktura sera wraz z analizą fraktalną

Mikrostrukturę serów badano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego Quanta 200 (Fei Company, Brno, Czechy) przy następujących parametrach: napięcie 20.00 kV, powiększenie 800x, detektor LFD. Pokrojone w cienkie plastry sery odwadniano w roztworach alkoholu etylowego o stężeniach, kolejno: 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 95% oraz 98%. Próbki przetrzymywano w każdym z roztworów po 15 minut. Po wyjęciu preparatów z ostatniego stężenia alkoholu poddano je suszeniu w suszarce Leica (EM-CPDO30, Wiedeń, Austria) w punkcie krytycznym, a następnie obserwowano pod mikroskopem.

Analiza fraktalna serów o obniżonej zawartości tłuszczu dotyczyła pomiarów kuleczek tłuszczowych. Zmierzono ich obwód (P) i powierzchnię (A) a następnie z zależności log A = f [log (P)] wyznaczono wymiar fraktalny (DL) oraz nachylenie otrzymanej prostej. Wyznaczenie powierzchniowego wymiaru fraktalnego pozwala na określenie jakości badanych produktów.

4.2.5. Analiza profilu tekstury

Analiza profilu tekstury serów została przeprowadzona testem Texture Profile Analysis (TPA) za pomocą urządzenia Texture Analyser TA.XT Plus (Stable Micro Systems LTD, Godalming, Anglia). Próbki o wymiarach 25 mm x 25 mm x 25 mm, wycięte za pomocą specjalnego noża – kształtki, poddano ściskaniu pomiędzy dwiema równoległymi powierzchniami stosując głowicę pomiarową o progu wyczuwalności próbki 0,049 N. Podczas każdego pomiaru zastosowano prędkość kompresji próbek wynoszącą 2 mm/s, między wysokością próbki przed i po pierwszym cyklu kompresji. Temperatura próbek w trakcie pomiaru wynosiła 10°C.

4.2.6. Analiza sensoryczna tekstury

Analiza sensoryczna serów została przeprowadzona przez 10-cio osobowy panel metodą profilowania sensorycznego wg. PN-ISO 22935-3. Panel sensoryczny o sprawdzonej wrażliwości sensorycznej, posiadał odpowiednie doświadczenie w ocenie sensorycznej produktów mleczarskich (co najmniej 120-godzin doświadczenia w ocenie mleka i produktów mleczarskich), w szczególności serów i przeszedł

4-godzinne szkolenie, podczas którego wyjaśniono technikę oceny oraz definicje sensoryczne poszczególnych wyróżników tekstury serów tj.: twardość, sprężystość, tempo odkształcenia, spoistość, adhezyjność i przeżuwalność, gładkość próbek przy pierwszym kęsie i przeżuwaniu (Tab. 5).

Tabela 5. Definicje wyróżników tekstury oraz sposoby sensorycznej oceny tekstury badanych serów

	Cecha	Definicja wyróżnika	Sposób oceny
Dotyk ręką	Twardość	Siła niezbędna do całkowitego ściśnięcia próbki	Ścisnąć próbkę używając kciuka i dwóch pierwszych palców
	Sprężystość	Stopień powrotu odkształconej próbki do warunków przed odkształceniem	Ścisnąć próbkę umiarkowanie (30%) używając kciuka i dwóch pierwszych palców, uwolnić od nacisku, oceniając stopień powrotu do stanu pierwotnego
	Tempo odkształcenia	Tempo (prędkość) w jakim odkształcona próbka powraca do warunków przed odkształceniem	Ścisnąć próbkę umiarkowanie (30%) używając kciuka i dwóch pierwszych palców, uwolnić od nacisku, oceniając prędkość powrotu do stanu pierwotnego
Pierwszy kęs	Twardość	Siła niezbędna do pierwszego przegryzienia i deformacji próbki.	Przegryźć próbkę zębami trzonowymi
Przeżuwanie	Przeżuwalność	Stopień rozdrobnienia próbki jako wynik żucia	Żuć próbkę 5 razy i ocenić próbkę po żuciu
	Spoistość	Stopień w jakim żuta próbka pozostaje jako jedna masa	Żuć próbkę 5 razy i ocenić próbkę po żuciu
	Adhezyjność	Stopień w jakim żuta próbka przylega do podniebienia, ust	Żuć próbkę 5 razy i ocenić próbkę po żuciu
	Gładkość próbki po żuciu	Ocena gładkości (piaszczystości, ziarnistości) próbki po żuciu	Żuć próbkę 5 razy i ocenić próbkę po żuciu
	Pozostałość po żuciu	Ocena gładkości (piaszczystości, ziarnistości) pozostałości w ustach po żuciu próbki	Żuć próbkę 5 razy, wypluć i ocenić pozostałość w ustach

Źródło: Opracowanie własne

W wyniku dyskusji panel sensoryczny ustalił 7-stopniową skalę odniesienia z zastosowaniem serów referencyjnych (Tab. 6).

Tabela 6. Wyniki oceny sensorycznej tekstury serów referencyjnych: Parmigiano Reggiano (PR), Mozzarella (M), Grand Gouda (GG), Cheddar (C)

Cecha	Skala referencyjna*						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Twardość (dotyk ręką)	M			C	GG		PR
Sprężystość (dotyk ręką)	PR		C		GG		M
Tempo odkształcania (dotyk ręką)	PR		C			M	GG
Twardość (pierwszy kęs)	C	M			GG		PR
Przeżuwalność	M	GG		PR			C
Spoistość	PR		M	GG			C
Adhezyjność	M	GG			PR		C
Gładkość próby po żuciu	PR	M	GG				C
Pozostałość po żuciu	PR	M	GG				C

*Skala referencyjna, gdzie 1 oznacza najmniejszą intensywność cechy, a 7 najwyższą intensywność cechy
Źródło: opracowanie własne

Ocenę przeprowadzono metodą skalowania przy zastosowaniu skali od 1 do 7, gdzie 7 punktów odpowiadało najwyższej intensywności badanej cechy a 1 punkt najniższej. Ostateczne wyniki analizy stanowiły wartości średnie (n=10).

4.2.7. Analiza statystyczna

Analiza statystyczna danych eksperymentalnych została przeprowadzona w programie Statistica (version 13.1, 1984-2016, StatSoft, Inc., Tulsa, K, USA). W celu zidentyfikowania istotności różnic ($P \leq 0{,}05$) pomiędzy danymi eksperymentalnymi zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji z testem posthoc Tukeya.

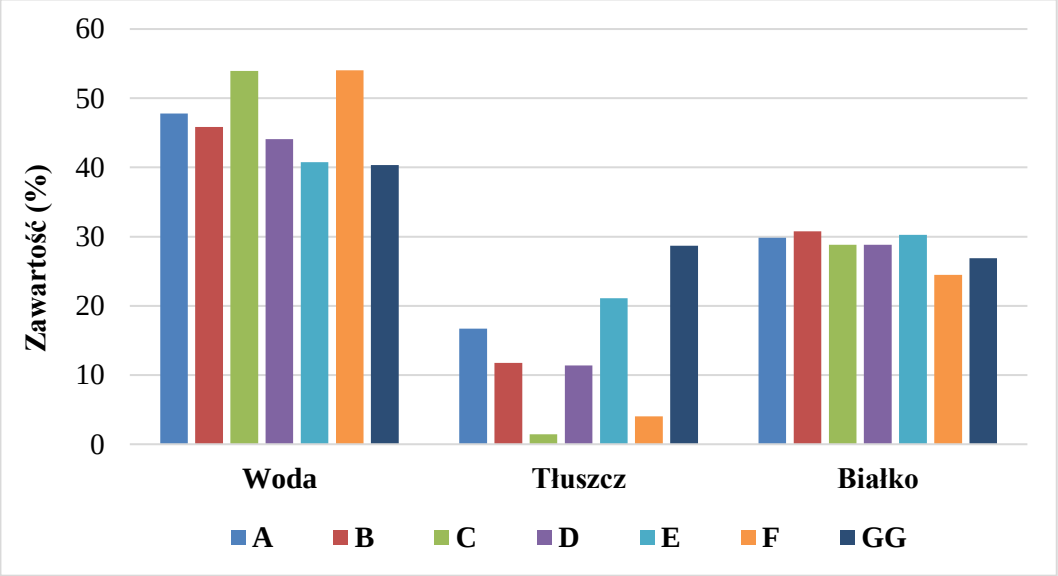
W celu określenia wpływu dwóch czynników (Etap II: czas, dodatek inuliny; Etap III: czas i rodzaj frakcji) oraz ich interakcji na parametry tekstury zastosowano wieloczynnikową analizę wariancji. Analizy statystyczne przeprowadzono na poziomie istotności $P = 0{,}05$ przy użyciu procedur statystycznych pakietu Matlab2023a (MathWorks, USA) zaimplementowanych w funkcji *anovan* Statistics and Machine Learning Toolbox. Natomiast do oceny korelacji pomiędzy wybranymi wyróżnikami wykorzystano współczynnik korelacji r_Pearsona wykorzystując ten sam Toolbox.

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW I DYSKUSJA

5.1. Charakterystyka serów komercyjnych

5.1.1. Skład fizykochemiczny

Zawartość tłuszczu w badanych serach o obniżonej zawartości tłuszczu mieściła się w przedziale od 1,45% do 21,09% (Rys. 3, Tab. 7). Dwa sery należały do grupy serów półtłustych, w których zawartość tłuszczu powinna mieścić się w zakresie 25-45% w suchej masie: ser E (35,61%) i ser A (32,02%), dwa do grupy serów odtłuszczonych (zawartość tłuszczu między 10-25% w suchej masie): ser B (21,69%) i ser D (20,33%) i dwa kolejne do grupy serów chudych (zawartość tłuszczu w suchej masie poniżej 10%): ser F (8,75%) i ser C (3,15%) (Tab. 7). Ser kontrolny zawierał 47,74% tłuszczu w suchej masie i był to ser tłusty (Tab. 7).



Rysunek 3. Skład chemiczny (woda, tłuszcz, białko) serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG)
Źródło: badania własne

Według Broadbent i in. (2001), jedną z najważniejszych strategii poprawy właściwości serów o niższej zawartości tłuszczu jest zwiększenie zawartości wody w stopniu wystarczającym do zapewnienia proporcji wody do białka w serze o niższej zawartości tłuszczu równej lub wyższej niż w jego pełnotłustym odpowiedniku.

Badania serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu wykazały, że najwyższą zawartością wody charakteryzowały się sery: F (54,04%) i ser C (53,94%), najniższą natomiast ser E (40,77%) (Rys. 3, Tab. 7), przy czym nie stwierdzono istotnych różnic ($P>0,05$) pomiędzy tym serem a serami A, B, D i GG. Ser kontrolny (Grand Gouda, GG) charakteryzował się zawartością wody na poziomie 40,33%. Protokół produkcji sera długodojrzewającego, obejmujący synerezę, solenie i dojrzewanie, wpływa na redukcję zawartości wody (TetraPak, 2013, Fox i Guinee, 2013).

Analiza statystyczna wykazała bardzo silną ujemną korelację ($P\leq0,01$) pomiędzy zawartością wody a zawartością tłuszczu i zawartością tłuszczu w suchej masie. Im niższa zawartość tłuszczu tym wyższa zawartość wody (Tab. 8).

Najwyższą zawartością białka charakteryzował się ser B (30,77%) oraz ser E (30,25%). Nie stwierdzono istotnych różnic ($P>0,05$) dla zawartości białka pomiędzy pozostałymi serami (sery A, C-D, F, GG) (Rys. 3, Tab. 7). Stwierdzono silną ujemną korelację ($P\leq0,05$) pomiędzy zawartością białka w suchej masie a zawartością tłuszczu i zawartością tłuszczu w suchej masie (Tab. 8).

Badania sera Mozzarella o zróżnicowanej zawartości tłuszczu: 5%, 10%, 15% i 25%, prowadzone przez Rudan i in. (1999), wykazały, że obniżenie zawartości tłuszczu w badanych serach wpływa na wzrost zawartości białka.

Tabela 7. Skład fizykochemiczny (n= 3) i właściwości fizykochemiczne serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG)

Rodzaj sera	Woda	Tłuszcz	Tłuszcz w s.m.	Białko	Białko w s.m.	NaCl	S/M	Aktywność wody	Wartość pH
	%								
A	$47,81^{b}\pm0,10$	$16,71^{b}\pm0,60$	$32,02^{b}\pm1,18$	$29,85^{b}\pm0,88$	$57,21^{b}\pm1,72$	$0,68^{b}\pm0,01$	$1,43^{b}\pm0,02$	$0,94^{a}\pm0,01$	$5,77^{a}\pm0,08$
B	$45,87^{b}\pm0,10$	$11,74^{b}\pm0,38$	$21,69^{c}\pm0,70$	$30,77^{a}\pm1,25$	$56,85^{b}\pm2,31$	$0,79^{b}\pm0,08$	$1,73^{b}\pm0,18$	$0,95^{a}\pm0,01$	$5,53^{a}\pm0,03$
C	$53,94^{a}\pm0,14$	$1,45^{c}\pm0,33$	$3,15^{c}\pm0,72$	$28,83^{b}\pm3,59$	$62,61^{a}\pm7,80$	$1,02^{a}\pm0,01$	$1,89^{a}\pm0,02$	$0,93^{a}\pm0,01$	$5,57^{a}\pm0,02$
D	$44,09^{b}\pm0,11$	$11,37^{b}\pm1,02$	$20,33^{c}\pm1,83$	$28,81^{b}\pm4,24$	$51,53^{b}\pm7,57$	$0,63^{b}\pm0,02$	$1,42^{b}\pm0,04$	$0,93^{a}\pm0,01$	$5,86^{a}\pm0,04$
E	$40,77^{b}\pm0,09$	$21,09^{ab}\pm1,66$	$35,61^{b}\pm2,82$	$30,25^{a}\pm0,47$	$51,07^{b}\pm0,77$	$0,76^{b}\pm0,03$	$1,86^{a}\pm0,08$	$0,94^{a}\pm0,01$	$5,54^{a}\pm0,03$
F	$54,04^{a}\pm1,06$	$4,02^{c}\pm0,15$	$8,75^{c}\pm0,22$	$24,47^{b}\pm1,01$	$53,26^{b}\pm2,09$	$1,04^{a}\pm0,03$	$1,92^{a}\pm0,07$	$0,96^{a}\pm0,01$	$5,54^{a}\pm0,05$
GG	$40,33^{b}\pm1,18$	$28,70^{a}\pm0,54$	$47,74^{a}\pm0,91$	$26,88^{b}\pm1,38$	$45,05^{c}\pm2,25$	$0,67^{b}\pm0,07$	$1,68^{b}\pm0,19$	$0,93^{a}\pm0,02$	$5,68^{a}\pm0,07$

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P\leq0,05$)
s.m. - sucha masa.
S/M- zawartość soli w fazie wodnej sera
Źródło: badania własne

Tabela 8. Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG)

Parametr	Woda	Białko	Białko w s.m.	NaCl	S/M	Tłuszcz	Tłuszcz w s.m.
Woda		-0,3382	0,7432	**0,8361***	0,3597	**-0,9034****	**-0,8865****
Białko	-0,3382		0,3719	-0,4253	-0,3267	0,1470	0,1675
Białko w s.m.	0,7432	0,3719		0,5351	0,1458	**-0,7739***	**-0,7476***
NaCl	0,8361	-0,4253	0,5351		**0,8116***	**-0,7561***	**-0,7761***
S/M	0,3597	-0,3267	0,1458	**0,8116***		-0,3210	-0,3701
Tłuszcz	**-0,9034****	0,1470	**-0,7739***	**-0,7561***	-0,3210		**0,9961****
Tłuszcz w s.m.	**-0,8865****	0,1675	**-0,7476***	-0,7761	-0,3701	**0,9961****	
WSN-TN	0,4572	0,0081	0,4048	0,2583	-0,0616	-0,7439	-0,7343
TCA-TN	0,1656	0,0558	0,1827	-0,0937	-0,3641	-0,4854	-0,4943
PTA-TN	0,1356	0,0139	0,1683	0,1209	0,0324	-0,4287	-0,4784
Wartość pH	-0,2828	0,0731	-0,2346	-0,7060	**-0,9185****	0,2396	0,2678
Aktywność wody	0,4509	-0,3042	0,1643	0,5024	0,3846	-0,4094	-0,3799

*$P \leq 0,05$
**$P \leq 0,01$
s.m. - sucha masa
S/M - zawartość soli w fazie wodnej sera
WSN-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
TCA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
PTA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
Źródło: badania własne

Redukcja zawartości tłuszczu w serach wiąże się z podwyższeniem zawartości białka i wody. Wzrost zawartości wody w składzie serów niskotłuszczowych ma za zadanie częściowe skorygowanie nadmiernej twardości wynikającej z redukcji fazy tłuszczowej, odpowiedzialnej za kształtowanie tekstury sera (Mistry i Kasperson 1998). Według Mistry i Anderson (1993), tłuszcz mlekowy o niskiej temperaturze topnienia zmniejsza twardość matrycy białkowej i zapewnia gładką teksturę sera. Właściwości emulgujące otoczki kuleczek tłuszczowych mogą również przyczyniać się do poprawy tekstury sera.

Cytowani autorzy wskazują, że wraz ze spadkiem zawartości tłuszczu w serze agregacja kuleczek tłuszczu jest ograniczona a matryca białkowa nie jest tak otwarta jak w serze pełnotłustym co powoduje, że ser jest twardy i gumowaty. Wyższa zawartość białka w serach niskotłuszczowych może wynikać również ze stosowania zamienników białkowo-tłuszczowych w celu obniżenia zawartości tłuszczu w tych serach (Anderson i in. 1993, Bullens i in. 1994, Ma i in. 1997). McCarthy i in. (2015) podali, że zmniejszenie zawartości tłuszczu z 33% do 22% lub 16% (w/w) spowodowało znaczny wzrost zawartości wody i białka a zmniejszenie zawartości soli w masie beztłuszczowej.

W przypadku serów o obniżonej zawartości tłuszczu badanych w tej pracy, modyfikacje w stosunku do konwencjonalnego procesu technologicznego serów pełnotłustych polegały najczęściej na obniżeniu temperatury dogrzewania (34-36^{o}C) w połączeniu ze zmniejszonym dodatkiem wody technologicznej. Niektórzy producenci stosowali dodatek zimnej wody technologicznej w celu obkurczenia ziarna i zamknięcia większej ilości wody/serwatki w strukturze ziarna (dane niepublikowane, informacje uzyskane bezpośrednio od producentów).

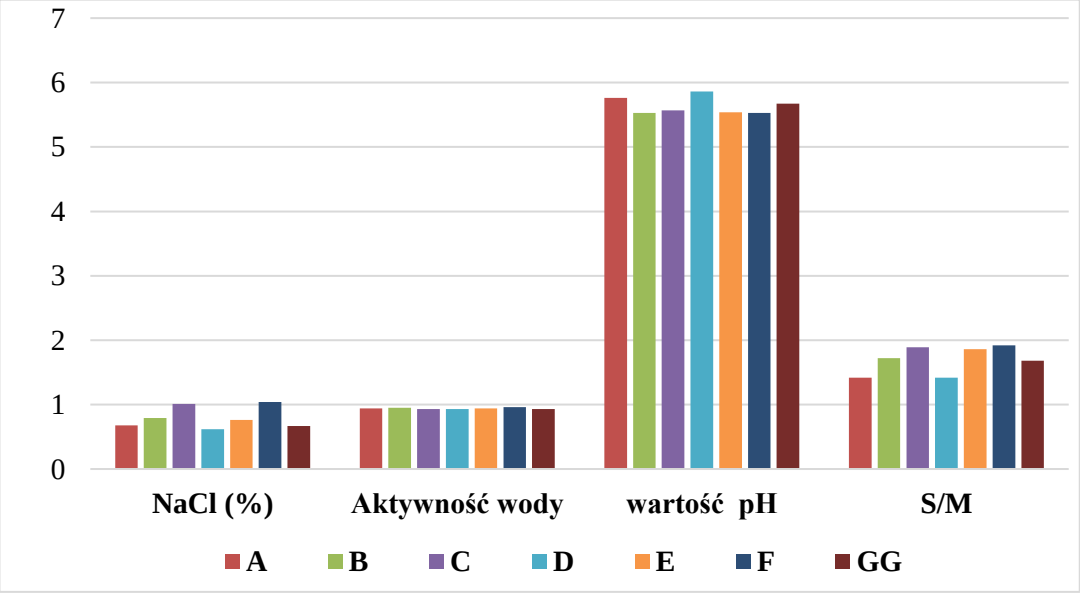
Zawartość NaCl w badanych serach kształtowała się na poziomie 0,63-1,04% (Rys. 4, Tab. 7) i była poniżej wartości deklarowanych przez producentów na opakowaniach (Tab. 4). Najwyższą zawartość NaCl oznaczono w serze F (1,04%) który charakteryzował się także najwyższą zawartością soli w fazie wodnej sera, na poziomie 1,92%. Nie stwierdzono różnic między zawartością soli w fazie wodnej sera pomiędzy serami C, E i F (Tab. 8). Stwierdzono silną korelację ($P \leq 0,05$) pomiędzy zawartością NaCl a zawartością soli w fazie wodnej sera (Tab. 8).

Solenie jest istotnym etapem produkcji serów podpuszczkowych, ponieważ w dużej mierze ukierunkowuje przemiany biochemiczne zachodzące podczas dojrzewania, które kształtują odpowiednie cechy smakowo-zapachowe sera i decydują o końcowej jakości produktu. Solenie ma wpływ na aktywność mikroflory oraz tempo przemian

enzymatycznych, zahamowanie rozwoju niepożądanych drobnoustrojów, a także powstanie skórki na powierzchni sera (pobrane z https://www.forummleczarskie.pl/raporty/763,produkcja-serowpodpuszczkowych, (9.01.2024).

Badania niskotłuszczowego sera Cheddar prowadzone przez Banks i in. (1993) wykazały, że dodatek NaCl na poziomie 1,8% podczas produkcji sera, wpłynął na wykształcenie charakterystycznego smaku sera Cheddar upodabniając go do pełnotłustego odpowiednika. Również Rodriguez (1998) podaje, że wzrost zawartości soli w fazie wodnej niskotłuszczowego sera Feta oraz Cheddar, upodabniał smak i zapach tych serów do serów pełnotłustych.

W badaniach sera Cheddar o obniżonej zawartości tłuszczu z dodatkiem NaCl w ilości 1,3%, 1,7% oraz 2% (odpowiednio: 2,7%, 3,7% i 4,5% soli w fazie wodnej sera) przeprowadzonych przez Mistry i Kasperson (1998) wykazano, że wzrost zawartości NaCl wpłynął na kształtowanie się smaku i zapachu sera, a wzrost zawartości soli w fazie wodnej sera ograniczało powstawanie gorzkiego smaku otrzymanego sera, ale wpływało na wzrost jego twardości. Wraz ze wzrostem zawartości NaCl zmniejszał się zakres i głębokość proteolizy oraz szybkość dojrzewania otrzymanych serów.



Rysunek 4. Właściwości fizykochemiczne serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG)
S/M – zawartość soli w fazie wodnej sera
Źródło: badania własne

Aktywność wody dla badanych serów mieściła się w przedziale 0,93-0,96 (Rys. 4, Tab. 7). Uzyskane wyniki badań są zbliżone do danych literaturowych (Bonczar i in., 2011). Aktywność wody wskazuje na stopień powiązania cząsteczek wody ze składnikami sera, zależy od etapu procesu produkcyjnego i wpływa na wiele właściwości użytkowych sera (Aljewicz in., 2011).

Istnieją dwa podstawowe sposoby regulacji aktywności wody w serze. Zawartość wody, a dokładniej ilość "wolnej" wody i substancji rozpuszczonych mogą być w dużym stopniu kontrolowane przez producenta sera. Do czynników regulujących wartość a_w należą czynniki wpływające na zawartość wody w serze, takie jak: synereza, przebieg ukwaszania i struktura ziaren skrzepu. Istotnym czynnikiem obniżającym a_w w serach miękkich i niedojrzewających jest solenie.

W przypadku serów twardych w regulacji a_w ważną rolę odgrywa również proteoliza. Wykazano, że składniki o niskiej masie cząsteczkowej pochodzące z hydrolizy kazeiny mają zbliżony wpływ na obniżenie a_w jak sól (Tomaszewska-Gras i in., 2019, Hicket i in., 2013, Aljewicz i in., 2011).

Badane sery charakteryzowały się zbliżonymi wartościami kwasowości czynnej (pH), które mieściły się w przedziale 5,53-5,86. Nie stwierdzono istotnych różnic ($P \leq 0,05$) w wartościach pH badanych serów (Rys. 4, Tab. 7).

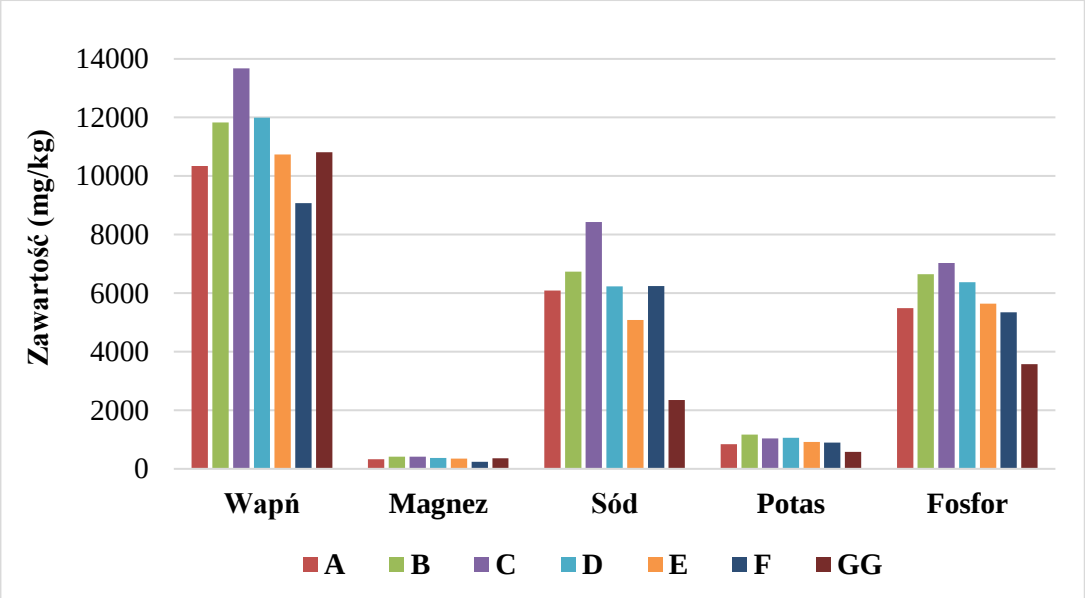
O wartości kwasowości czynnej decyduje stopień przemian fizykochemicznych zachodzący podczas dojrzewania sera w wyniku aktywności mikroflory wtórnej. Stwierdzono bardzo silną ujemną korelację ($P \leq 0,01$) pomiędzy wartością pH a zawartością soli w fazie wodnej sera (Tab. 8).

Kontrola kwasowości sera niskotłuszczowego ma kluczowe znaczenie dla jego jakości i wpływa na parametry tekstury. Skład mleka, w tym poziom laktozy, zmienia się wraz z czasem trwania laktacji i stwierdzono, że sery wytwarzane z mleka, z końcowego okresu laktacji charakteryzują się wyższymi wartościami pH, przy niższej początkowej zawartości laktozy w tych serach (Ibáñez i in., 2020).

Sery zawierają w swoim składzie związki mineralne łatwo przyswajalne przez człowieka, takie jak: wapń (Ca), magnez (Mg), sód (Na), potas (K) oraz fosfor (P). Szczególnie ważnymi związkami mineralnymi niezbędnymi dla prawidłowego rozwoju i funkcjonowania organizmu są wapń i fosfor. Istotny jest również stosunek Ca:P w serach dojrzewających podpuszczkowych, który nie powinien być mniejszy niż 1,3:1 (Kusiuk i in., 2009).

W badanych serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu stosunek Ca:P wynosił od 1,70 dla sera F do 1,94 dla sera E. W serze kontrolnym wartość ta wynosiła 3,20 i różniła się ($P \leq 0,05$) od serów o obniżonej zawartości tłuszczu (Tab. 9). W serze kontrolnym Grand Gouda było 10814,27 mg/kg wapnia (Rys. 5, Tab. 9). Najwyższą zawartość wapnia oznaczono w serze C (13676,83 mg/kg), natomiast najniższą w serze F (9076,39 mg/kg). Nie stwierdzono istotnych ($P > 0,05$) różnic w zawartości wapnia dla pozostałych serów, w tym sera kontrolnego GG (Tab. 9). Warto nadmienić, iż zawartość białka w suchej masie serów o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) była wyższa aniżeli w serze kontrolnym (ser GG) (Tab. 7). Ser C, który charakteryzował się najwyższą zawartością wapnia, wykazywał również najwyższą zawartość białka w suchej masie (Tab. 7, Tab. 9). Zawartość białka w suchej masie sera F, o najniższej zawartości wapnia, nie była na najniższym poziomie, niemniej ilość białka w suchej masie tego sera mieściła się w dolnym zakresie stwierdzonym w ocenianych serach (Tab. 7).

Dla serów o obniżonej zawartości tłuszczu stwierdzono, że zmiana warunków produkcyjnych, tj. zastosowanie niższej temperatury dogrzewania, skutkuje stosunkowo wyższym poziomem zatrzymywania wapnia w serze, który z kolei obniża jędrność produktu (Nauth i Ruffie, 1995).



Rysunek 5. Zawartość składników mineralnych w serach o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG)
Źródło: badania własne

Tabela 9. Średnia (n=3) zawartość składników mineralnych w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG)

Rodzaj sera	Wapń (Ca)	Magnez	Sód	Potas	Fosfor (P)	Ca:P
	mg/kg					
A	10338,32^{b}±666,14	329,20^{b}±72,22	6084,29^{b}±56,35	844,41^{b}±56,08	5487,12^{b}±73,00	1,86^{b}±0,14
B	11824,60^{b}±577,28	418,99^{a}±15,32	6736,28^{b}±883,61	1173,56^{a}±74,91	6645,63^{b}±184,73	1,81^{b}±0,28
C	13676,83^{a}±411,84	412,85^{a}±12,22	8431,49^{a}±538,62	1040,94^{b}±106,69	7026,49^{a}±334,26	1,93^{b}±0,07
D	11987,90^{b}±461,62	371,10^{b}±80,15	6230,85^{b}±430,84	1062,54^{b}±75,15	6372,58^{b}±385,39	1,88^{b}±0,17
E	10730,96^{b}±853,32	354,95^{b}±39,02	5082,69^{b}±723,76	920,45^{b}±104,73	5639,55^{b}±399,54	1,94^{b}±0,30
F	9076,39^{c}±366,53	245,29^{c}±21,89	6246,68^{b}±354,49	893,24^{b}±55,12	5344,76^{b}±100,01	1,70^{b}±0,26
GG	10814,27^{b}±652,45	361,43^{b}±45,67	2350,95^{c}±458,65	581,16^{c}±37,69	3574,43^{c}±84,40	3,20^{a}±0,56

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

Wapń jest jedną z najważniejszych substancji mineralnych występujących w serze, a jego ilość różni się w zależności od rodzaju sera (Altun i Aydemir, 2021). Wysoka zawartość wapnia w serach dojrzewających ma związek z procesem technologicznym produkcji sera podpuszczkowego, w którym wapń tworzy kompleks z kazeiną. Sery o obniżonej zawartości tłuszczu są bogatym źródłem zarówno białka jak i wapnia. Stwierdzono istotne różnice ($P \leq 0,05$) w zawartości związków mineralnych w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu.

Zawartość Mg w mleku jest zróżnicowana w zależności od okresu laktacji, sposobu żywienia zwierzęcia i obróbki termicznej surowca. Uważa się, że różnica w ilości Mg wynika ze składu mleka użytego do produkcji sera lub technik obróbki cieplnej stosowanych w produkcji (Altun i Aydemir, 2021). W naszych badaniach najwyższą zawartością magnezu charakteryzowały się próbki sera B (418,99 mg/kg) i C (412,85 mg/kg), a najniższą oznaczono w serze F (245,29 mg/kg).

Najwyższą zawartość sodu oznaczono w serze C (8431,49 mg/kg) (Rys. 5, Tab. 9), który charakteryzował się również wysoką zawartością NaCl (1,02%) (Tab. 7). Najniższą zawartość sodu stwierdzono w serze E (5082,69 mg/kg) oraz serze kontrolnym Grand Gouda (2350,95 mg/kg) (Rys. 5, Tab. 9). Stężenie sodu w serach jest w głównej mierze wynikiem dodatku NaCl w procesie produkcyjnym i może zmieniać się w zależności od stosowanej metody solenia (Altun i Aydemir, 2021).

Najwyższą zawartością potasu charakteryzował się ser B (1173,56 mg/kg), a najniższą ser A (844,41 mg/kg) oraz ser kontrolny Grand Gouda (581,16 mg/kg) (Rys. 5, Tab. 9).

Najwyższą ($P \leq 0,05$) zawartość fosforu oznaczono w serze C (7026,49 mg/kg), natomiast najniższą w serze kontrolnym (3574,43 mg/kg) (Rys. 5, Tab. 9). Poziom fosforu w pozostałych serach o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-B i D-F) nie wykazywał istotnych ($P > 0,05$) różnic (Rys. 5, Tab. 9). Badane sery charakteryzowały się istotnie wyższą ($P \leq 0,05$) zawartością potasu i fosforu w stosunku do sera pełnotłustego (GG) (Rys.5, Tab. 9). Zawartość potasu i fosforu w mleku jest zmienna i zależy głównie od okresu laktacji oraz sposobu żywienia zwierząt, a zatem ma także wpływ na sery wyprodukowane z określonego surowca (Altun i Aydemir, 2021).

Holland i in. (1995) badali zawartość pierwiastków mineralnych w serach pełnotłustych. Wykazano istotne różnice w zawartości mikroelementów w zależności od rodzaju badanego sera. Koncentrując się na trzech rodzajach serów: Cheddar, Edam i Gouda, stwierdzono, że najwyższa zawartość wapnia była w serze Cheddar

(780 mg/kg), a najniższa w serze Gouda (740 mg/kg). Zawartość magnezu kształtowała się na poziomie od 25 mg/kg dla sera Cheddar do 39 mg/kg dla sera Edam. Zawartość sodu była zróżnicowane i wynosiła 670 mg/kg dla sera Cheddar, 910 mg/kg dla sera Gouda i 1020 mg/kg dla sera Edam. Zawartość potasu wynosiła 97 mg/kg dla sera Edam i 77 mg/kg dla sera Cheddar.

Badania Crupi i in (2022) dotyczące włoskich produktów mlecznych, w tym sera Mozzarella, wykazały zróżnicowaną zawartość związków mineralnych. Zawartość wapnia w serze Mozzarella kształtowała się na poziomie 7673,8 mg/kg, natomiast zawartość magnezu wynosiła 178,9 mg/kg. Zawartość sodu wynosiła 2857,9 mg/kg a potasu 349,70 mg/kg (Crupi i in., 2022).

Altun i Aydemir (2021) badali zawartość składników mineralnych w serze z mleka owczego Urfa. Średnia zawartość wapnia w tym serze kształtowała się na poziomie 2712,66 mg/kg, zawartość magnezu 129,8 mg/kg a zawartość potasu 272,06 mg/kg.

5.1.2. Ocena stopnia rozkładu białek w serach

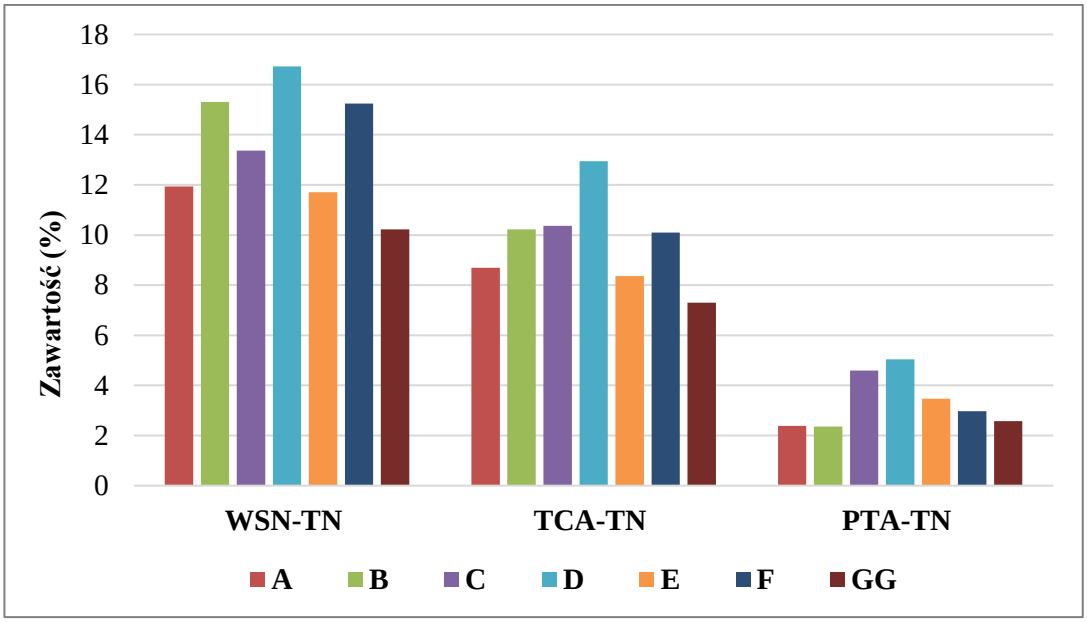
Monitorowanie przemian białkowych pozwala na ocenę jakości serów oraz przedstawia stopień rozkładu białek mleka od peptydów o średniej masie cząsteczkowej do aminokwasów. Na stopień proteolizy w pierwszym etapie produkcji i dojrzewania serów wpływają enzymy proteolityczne (Cichosz i in. 2005). Preparat koagulujący, hydrolizując kazeinę, prowadzi do powstania wysoko- i średnio-cząsteczkowych peptydów. Peptydy następnie ulegają dalszym przemianom, pod wpływem enzymów wytwarzanych przez kultury starterowe i endogenne enzymy mleka, dzięki którym powstają niskocząsteczkowe peptydy i aminokwasy odpowiadające za aromat serów (Ciółkowska i Gustaw, 2012).

W badanych serach stwierdzono istotne ($P \leq 0,05$) różnice w zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie wyrażonych jako procent azotu ogółem (WSN-TN) (Rys. 6, Tab. 10). Wyniki badań wykazały, że najwyższą zawartość WSN-TN spośród serów o obniżonej zawartości tłuszczu oznaczono w serze D (16,73%), natomiast najniższą w serze A (11,93%) i E (11,71%), podobnie jak w serze kontrolnym Grand Gouda (10,23%) (Rys**.** 6, Tab. 10).

Frakcja związków azotowych wytrącona 12% kwasem trichlorooctowym (TCA), oprócz peptydów wysokocząsteczkowych, zawiera także peptydy o mniejszej masie

cząsteczkowej, do których należą niskocząsteczkowe peptydy od 2 do 20 aminokwasów oraz wolne aminokwasy (Cichosz i in., 2005).

Najwyższą zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA jako procent azotu ogółem (TCA-TN) stwierdzono w serze D (12,95%), a najniższą w próbkach sera A (8,69%) oraz E (8,35%). Zawartość związków azotowych TCA-TN w serze kontrolnym Grand Gouda wynosiła 7,15% i nie różniła się istotnie (P>0,05) od wartości w serach A i E (Rys. 6, Tab. 10).



Rysunek 6. Zawartość związków azotowych:
WSN-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN),
TCA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN),
PTA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen,, TN) w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG)
Źródło: badania własne

Najwyższą zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (PTA-TN) w badanych serach komercyjnych oznaczono w serze D (5,04%), najniższą natomiast w serach A (2,38%), serze B (2,36%) i serze F (2,97%) (Rys. 6, Tab. 10). Stwierdzono istotne różnice (P≤0,05) w zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (PTA-TN) (Tab. 10). Ser kontrolny również wykazywał niską zawartość związków PTA-TN (2,58%). Przyczyną mógł być większy dodatek wody technologicznej zastosowany

przy produkcji tego sera, przez co wypłukano znaczną część laktozy, stanowiącej materiał fermentacyjny. Ponadto, wyższy poziom wody w serze ma wpływ na działanie mikroorganizmów i enzymów m.in. resztkowa podpuszczka (Romeih i in., 2002, Volikakis i in., 2004). Wskazuje to również na to, że smakowitość sera długodojrzewającego w dużej mierze zależy od zawartości tłuszczu, a nie jedynie stopnia proteolizy.

Różnice w stopniu hydrolizy kazeiny mogą wynikać z różnic w zawartości wody w serach. Wyższa zawartość wody w serze może przyczyniać się do większej aktywności mikroorganizmów i enzymów, w tym pozostałości podpuszczki (Romeih i in., 2002, Volikakis i in., 2004).

Z przeprowadzonych badań wynika, że uwalnianie dużej ilości produktów degradacji kazeiny świadczy o intensywnych przemianach proteolitycznych zachodzących w serach o obniżonej zawartości tłuszczu. Nie stwierdzono wysoce istotnych korelacji pomiędzy zawartością różnych form rozpuszczalnych związków azotowych (WSN-TN, TCA-TN, PTA-TN) a oceniamy wskaźnikami jakości serów (Tab. 11). Silna korelacja natomiast dotyczyła zależności między WSN-TN a TCA-TN ($P \leq 0,05$) oraz TCA-TN i PTA-TN ($P \leq 0,05$). Nie stwierdzono istotnych korelacji między wartością pH oraz aktywnością wody a wskaźnikami proteolizy (WSN-TN, TCA-TN, PTA-TN) (Tab. 11).

Sheibani i in. (2015) badając zakres proteolizy w serach o zredukowanej zawartości NaCl wyprodukowali 4 warianty produktów z dodatkiem 2,5%, 2%, 1,5% oraz 1% NaCl. Próbki pobierano co 2 tygodnie przez okres 2 miesięcy. W badaniach zastosowano frakcjonowanie związków azotowych 24% roztworem TCA oraz 10% roztworem PTA. Zmiany zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie - WSN (od 12,09 do 12,31) oraz TCA-SN (od 4,66 do 4,30) w tych serach, świadczą o tym, że redukcja NaCl miała duży wpływ na przebieg proteolizy podczas dojrzewania badanych serów.

Ayyash i in. (2012) prowadzili badania sera Akawi wyprodukowanego w 4 wariantach: z dodatkiem NaCl, z dodatkiem NaCl i KCl w proporcjach: 3:1, 1:1 oraz 1:3. Próbki pobierano w 0, 10, 20 i 30 dniu dojrzewania sera i frakcjonowano związki azotowe 12% roztworem TCA oraz 5% roztworem PTA. Stwierdzono, że dodatek NaCl oraz KCl wpłynął na proces proteolizy podczas dojrzewania sera. Badania wykazały wzrost wartości wskaźników proteolizy: WSN (od 4,77 do 5,20) oraz TCA-SN (od 1,53 do 1,66) po 30 dniach przechowywania. Zmniejszyła się natomiast wartość PTA-SN (od 0,50 do 0,42) (Ayyash i in., 2012).

Badania sera Gouda po 6 tygodniach dojrzewania prowadzone przez Cichosz i in. (2005) wykazały, że średnia zawartość azotu rozpuszczalnego w wodzie (WSN) wynosiła 17,27%. Frakcja związków azotowych wytrącona 12% roztworem TCA kształtowała się na poziomie 1,65%, natomiast frakcja wytrącona 5% roztworem PTA w zakresie od 3,5 do 10,66%.

Tabela 10. Średnia (n=3) zawartość związków azotowych: WSN-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), TCA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), PTA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen,, TN) w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG)

Rodzaj sera	WSN-TN	TCA-TN	PTA-TN
	%		
A	$11,93^{c}\pm0,34$	$8,69^{c}\pm0,68$	$2,38^{c}\pm0,91$
B	$15,31^{b}\pm2,95$	$10,23^{b}\pm0,81$	$2,36^{c}\pm0,87$
C	$13,63^{b}\pm2,31$	$10,37^{b}\pm0,63$	$4,59^{b}\pm0,70$
D	$16,73^{a}\pm2,62$	$12,95^{a}\pm1,34$	$5,04^{a}\pm0,51$
E	$11,71^{c}\pm3,41$	$8,35^{c}\pm0,43$	$3,47^{b}\pm0,52$
F	$15,24^{b}\pm2,35$	$10,10^{b}\pm0,76$	$2,97^{c}\pm0,20$
GG	$10,23^{c}\pm1,07$	$7,15^{c}\pm0,90$	$2,58^{c}\pm0,83$

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P\leq0,05$)
Źródło: badania własne.

Tabela 11. Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami, parametrami fizykochemicznymi a wskaźnikami proteolizy w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu i serze kontrolnym

Parametr	WSN-TN	TCA-TN	PTA-TN	pH	Aktywność wody
Woda	0,4572	0,1656	0,1356	-0,2828	0,4509
Białko	0,0081	0,0558	0,0139	0,0731	-0,3042
Białko w s.m.	0,4048	0,1827	0,1683	-0,2346	0,1643
NaCl	0,2583	-0,0937	0,1209	-0,7060	0,5024
S/M	-0,0616	-0,3641	0,0324	**-0,9185****	0,3846
Tłuszcz	-0,7439	-0,4854	-0,4287	0,2396	-0,4094
Tłuszcz w s.m.	-0,7343	-0,4943	-0,4784	0,2678	-0,3799
WSN-TN		**0,7853***	0,4695	0,0755	0,4448
TCA-TN	**0,7853***		**0,8120***	0,5258	-0,1686
PTA-TN	0,4695	**0,8120***		0,2438	-0,4415
pH	0,0755	0,5258	0,2438		-0,5309
Aktywność wody	0,4448	-0,1686	-0,4415	-0,5309	

*P≤0,05
**P≤0,01
s.m. - sucha masa.
S/M - zawartość soli w fazie wodnej sera
WSN-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
TCA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
PTA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
Źródło: badania własne

Podczas dojrzewania sera następują hydrolityczne przemiany białek, polegające na ich stopniowym rozpadzie do peptonów, peptydów i aminokwasów. Dalsze przemiany proteolityczne w serach zależą od ilości i rodzaju zastosowanego preparatu enzymatycznego oraz od ilości, aktywności i rodzaju dodanych do mleka kultur bakteryjnych (Bonczar i in., 2011). Na aktywność enzymów biorących udział w hydrolizie białek w trakcie dojrzewania sera wpływa również aktywności wody.

5.1.3. Profil kwasów tłuszczowych

Profil kwasów tłuszczowych jest istotnym czynnikiem warunkującym jakość serów bowiem tłuszcz jest nośnikiem substancji lotnych kształtujących smak, zapach i inne cechy sensoryczne wyrobów mleczarskich. Ogólnie rzecz biorąc, sery o obniżonej zawartości tłuszczu są uważane za mniej akceptowalne przez konsumentów niż ich pełnotłuste odpowiedniki ze względu na wady tekstury (zwiększona gumowatość, twardość, suchość i ziarnistość) i smaku (niska intensywność typowego smaku i aromatu sera, gorycz, cierpkość i nieczysty smak). Brak aromatu może wynikać z braku prekursorów związków zapachowych pochodzących z tłuszczu lub też z odmiennej struktury fizycznej sera o obniżonej zawartości tłuszczu, która hamuje reakcje enzymatyczne niezbędne w syntezie związków smakowych (Kondyli i in., 2003).

Sery podpuszczkowe dojrzewające, w zależności od rodzaju i zawartości tłuszczu, zawierają w 100 g: 6,0-10,0 g kwasów tłuszczowych jednonienasyconych oraz 0,5-1,0 g kwasów tłuszczowych wielonienasyconych. Niezbędne nienasycone kwasy tłuszczowe (NNKT) to kwasy egzogenne, których nasz organizm nie potrafi syntetyzować. Najważniejszymi NNKT są: kwas linolowy, kwas α-linolenowy, arachidonowy, eikozapentaenowy i dokozaheksaenowy. Kwasy omega-3 (kwas α-linolenowy, kwas eikozapentaenowy, kwas dokozaheksaenowy) oraz kwasy omega-6 (kwas linolowy, kwas γ-linolenowy, kwas arachidonowy) należą do wielonienasyconych kwasów tłuszczowych nieodzownych do prawidłowego funkcjonowania organizmu człowieka (https://www.forummleczarskie.pl/raporty/481,dodatki-funkcjonalne-do-serow?strona=2 (10.01.2024).

W badanych serach określono profil kwasów tłuszczowych. Wśród nasyconych krótko- i średniołańcuchowych dominowały, odpowiednio: kwas masłowy C4:0, kwas kaprynowy C10:0 oraz kwas laurynowy C12:0 (Tab. 12). Głównym nasyconym długołańcuchowym kwasem tłuszczowym był kwas mirystynowy C14:0 oraz kwas

palmitynowy C16:0. Stwierdzono obecność kwasu wakcenowy C18:1, który pełni rolę biologiczną w gliko- i fosfolipidach błon komórkowych. Kwasy tłuszczowe krótko- i średniołańcuchowe uznawane są za pożądane prozdrowotne składniki tłuszczu (Rutkowska i in., 2015).

Profil kwasów tłuszczowych oznaczony w badanych serach o obniżonej zawartości tłuszczu był podobny do profilu kwasów tłuszczowych w kontrolnym serze pełnotłustym (GG). Stwierdzono istotne różnice ($P \leq 0,05$) w zawartości kwasów nasyconych krótko- i średniołańcuchowych. Najwyższą zawartość sumy kwasów od C4:0 do C13:0 stwierdzono w serach A, B, D, E i serze kontrolnym GG, natomiast najniższą w serze F (7,62%) (Tab. 12), który charakteryzował się również najniższą zawartością tłuszczu (Tab. 7).

Najwyższą zawartość sumy kwasów C14:0 - C20:0 stwierdzono w serze B (59,12%) i C (58,94). Pozostałe sery wykazywały zbliżoną ($P \leq 0,05$) zawartość kwasów od C14:0 do C20:0, przy czym zawartość tych kwasów w serze C również nie różniła się istotnie ($P > 0,05$) w porównaniu od serów A-B, D-F (Tab. 12). Najniższą ilość kwasów C14:0 - C20:0 stwierdzono w serze E (54,81%), w którym zawartość tłuszczu (21,09%) była najwyższa spośród serów o obniżonej zawartości tłuszczu. W badanych serach komercyjnych oznaczono kwas heptadekenowy (C17:1), którego największą zawartością (37,13%) charakteryzował się ser F. W pozostałych serach niskotłuszczowych procentową zawartość tego kwasu oznaczono na poziomie 0,22%-0,25%. Innym kwasem o wysokiej procentowej zawartości był kwas oleinowy (C18:1 cis9), którego najwyższą zawartością charakteryzował się ser E (21,51%), a najniższą ser B (19,49%). W grupie tych kwasów oznaczono także kwas trans oleinowy (C18:1 trans) na poziomie od 1,54% dla sera B do 3,43% dla sera E (Tab. 12).

Sery o obniżonej zawartości tłuszczu zawierały również, podobnie jak ser pełnotłusty, cenny w aspekcie żywieniowym i zdrowotnym sprzężony kwas linolowy (CLA). Najwyższą zawartość kwasu CLA oznaczono w serze E (0,58%) i A (0,50%). Pozostałe sery (B, D, F i GG) charakteryzowały się zbliżoną zawartością tego kwasu CLA w zakres od 0,19% do 0,22% (Tab. 12). Nie stwierdzono obecności kwasu CLA w serze C, który charakteryzował się najniższą zawartością tłuszczu na poziomie 1,45% (Tab. 12 i 7, odpowiednio).

Tabela 12. Profil kwasów tłuszczowych w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG)

Symbol kwasu tłuszczowego		Rodzaj sera						
		A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**GG**
C4:0	%	2,85^{a}	2,85^{a}	2,87^{a}	2,88^{a}	2,93^{a}	2,89^{a}	2,85^{a}
C6:0	%	1,90^{a}	1,94^{a}	1,83^{a}	1,98^{a}	1,87^{a}	1,78^{a}	1,93^{a}
C8:0	%	1,20^{a}	1,22^{a}	1,18^{b}	1,22^{a}	1,17^{b}	1,20^{a}	1,22^{a}
C10:0	%	2,74^{b}	2,86^{a}	2,58^{b}	2,80^{a}	2,65^{b}	2,67^{b}	2,80^{a}
C11:0	%	0,05^{a}	0,06^{a}	0,05^{a}	0,05^{a}	0,05^{a}	0,05^{a}	0,06^{a}
C12:0	%	3,33^{b}	3,53^{a}	3,18^{b}	3,37^{b}	3,22^{b}	3,23^{b}	3,44^{a}
C13:0	%	0,08^{a}	0,08^{a}	0,06^{a}	0,07^{a}	0,07^{a}	0,07^{a}	0,08^{a}
Suma C4:0-C13:0	%	**12,37^{a}**	**12,69^{a}**	**11,83^{b}**	**12,43^{a}**	**12,06^{a}**	**7,62^{c}**	**12,45^{a}**
C14:0	%	11,41^{a}	11,95^{a}	11,37^{a}	11,76^{a}	11,19^{a}	11,45^{a}	11,80^{a}
C15:0	%	1,28^{b}	1,21^{b}	1,25^{b}	1,19^{c}	1,33^{a}	1,26^{b}	1,24^{b}
C16:0	%	32,25^{b}	35,40^{a}	33,80^{b}	33,58^{b}	30,10^{b}	32,39^{b}	34,34^{b}
C17:0	%	0,61^{a}	0,59^{ab}	0,65^{a}	0,61^{a}	0,65^{a}	0,15^{b}	0,59^{a}
C18:0	%	10,59^{b}	9,72^{b}	11,51^{a}	11,04^{a}	11,30^{a}	11,44^{a}	10,32^{b}
C 20:0	%	0,17^{c}	0,15^{c}	0,33^{a}	0,19^{c}	0,18^{c}	0,29^{b}	0,17^{c}
SumaC14:0-C20:0	%	**56,34^{b}**	**59,12^{a}**	**58,94^{ab}**	**58,40^{b}**	**54,81^{b}**	**56,98^{b}**	**58,50^{b}**
C10:1	%	0,31	0,32	0,27	0,30	0,29	0,28	0,32
C12:1	%	0,04^{a}	0,03^{a}	0,04^{a}	0,03^{a}	0,04^{a}	0,04^{a}	0,03^{a}
C13izo	%	0,08^{a}	0,08^{a}	0,06	0,07^{a}	0,07^{a}	-*	0,08^{a}
C13aizo	%	0,09^{a}	0,09^{a}	0,07^{a}	0,08^{a}	0,08^{a}	-*	0,09^{a}
C14izo	%	0,13^{a}	0,11^{a}	0,12^{a}	0,13^{a}	0,14^{a}	0,13^{a}	0,12^{a}
C15izo	%	0,29^{b}	0,24^{b}	0,27^{b}	0,28^{b}	0,33^{b}	31,74^{a}	0,25^{b}
C15aizo	%	0,52^{a}	0,47^{b}	0,51^{a}	0,50^{a}	0,59^{a}	-*	0,49^{b}
C14:1	%	1,07^{ab}	1,12^{a}	0,86^{b}	0,98^{b}	0,98^{b}	0,91^{b}	1,09^{ab}
C16izo	%	0,25^{a}	0,25^{a}	0,29^{a}	0,28^{a}	0,27^{a}	-*	0,26^{a}
C16:1	%	1,99^{b}	2,14^{a}	1,98^{b}	1,97^{b}	1,95^{b}	1,88^{b}	2,09^{a}
C17:1	%	0,25^{b}	0,22^{b}	0,22^{b}	0,25^{b}	0,25^{b}	37,13^{a}	0,21^{b}
TransC18:1	%	2,33^{b}	1,54^{c}	2,43^{b}	1,70^{c}	3,43^{a}	2,47^{b}	1,72^{c}
C18:1 cis9	%	20,96^{ab}	19,49^{b}	20,47^{ab}	20,30^{ab}	21,51^{a}	20,35^{ab}	20,05^{ab}
C18:1 cis11	%	0,61^{b}	0,62^{b}	0,76^{a}	0,63^{b}	0,70^{a}	-*	0,66^{b}

C18:1 cis12	%	0,18^{b}	0,16^{b}	0,22^{a}	0,18^{b}	0,16^{b}	-*	0,20^{a}
trans delta16	%	0,34^{a}	0,31^{a}	0,27^{b}	0,23^{b}	0,32^{a}	-*	0,23^{b}
trans C18:2	%	-*	0,13^{a}	0,16^{a}	0,12^{a}	0,19^{a}	0,15^{a}	0,14^{a}
C18:2 cis 9 cis12	%	0,91^{a}	0,47^{b}	0,20^{c}	0,73^{b}	0,65^{b}	-*	0,66^{b}
CLA	%	**0,50^{a}**	**0,21^{b}**	**-***	**0,19^{b}**	**0,58^{a}**	**0,20^{b}**	**0,22^{b}**

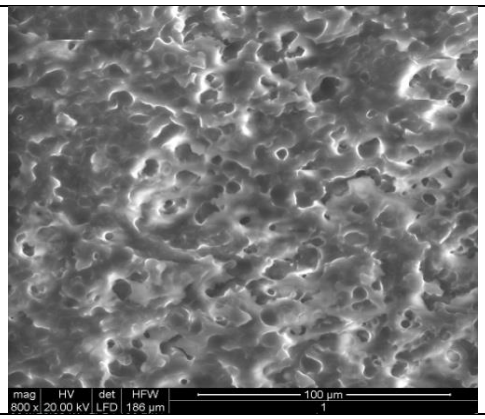
*Nie oznaczono parametru
$^{a-c}$ Wartości średnie w tym samym wierszu o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

5.1.4. Mikrostruktura serów wraz a analizą fraktalną

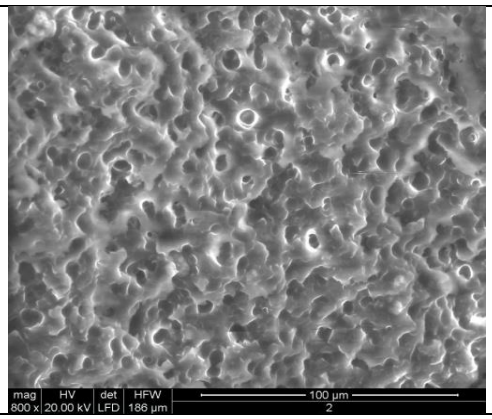
Fotografie mikrostruktury serów o obniżonej zawartości tłuszczu uwidoczniły przestrzenną sieć strukturalną złożoną z połączonych ze sobą jednostek miceli kazeinowych, w których są zamknięte kuleczki tłuszczu, woda i minerały (Fot. 1-7). Badania wykazały obecność dużych porów w mikrostrukturze ocenianych serów oraz zwiększoną włóknistość. Przestrzenne rozmieszczenie kuleczek tłuszczowych występuje w serze E o zawartości tłuszczu 21,09% (Fot. 5) oraz w serze kontrolnym GG o zawartości tłuszczu 28,70% (Fot. 7). Jak podaje Mistry i Anderson (1993) na typowych skaningowych mikrofotografiach sera matryca białkowa jest widoczna z równomiernie rozmieszczonymi otwartymi przestrzeniami o różnych kształtach i rozmiarach, które prezentują kuleczki tłuszczu. Stąd, im większa zawartość tłuszczu w serze, tym większa liczba otwartych przestrzeni. Na mikrofotografiach badanych serów o obniżonej zawartości tłuszczu, występowały gładkie puste przestrzenie w jednorodnej macierzy białkowej, obrazujące kuleczki tłuszczowe.

Bardzo często obrazy mikrostruktury preparatów pochodzenia biologicznego powodują trudności w ich słownym opisie i są trudne do porównania. Z tego powodu przydatnym narzędziem jest analiza obrazu połączona z określeniem wymiaru fraktalnego. Takie podejście umożliwia obiektywne porównanie za pomocą narzędzia matematycznego opisującego mikrostrukturę w liczbach.

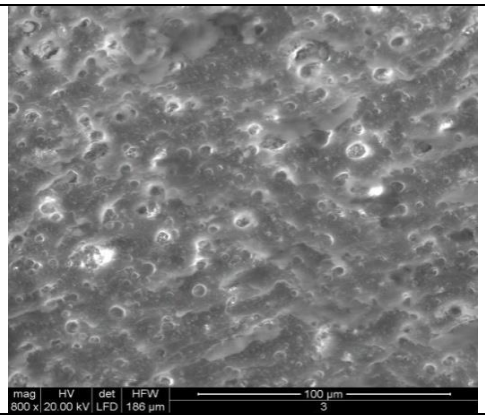
Otrzymane wartości współczynników determinacji (>0,90) wskazują na poprawność zastosowanego modelu matematycznego do uzyskanych wyników badanych serów. W uzyskanych mikrofotografiach maksymalnie zwiększono kontrast, co pozwoliło na ich binaryzację i uwydatniło pewne cechy mikrostruktury. Następnie z szeregu zależności logarytmicznych między zmierzonymi obwodami a obszarami obserwowanych obiektów wyznaczono wymiary fraktalne. Otrzymane w ten sposób wartości charakteryzowały porowatość obserwowanej mikrostruktury, stopień rozszerzenia powierzchni porów oraz ich strukturę.



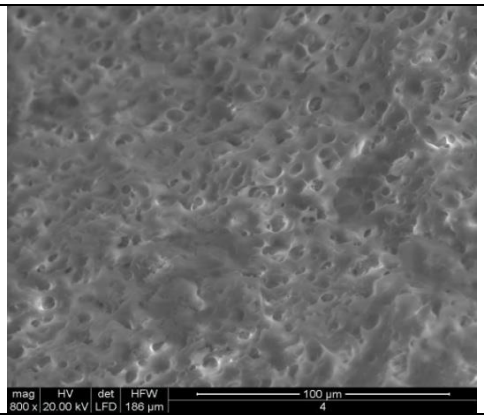
Fot. 1. Ser A



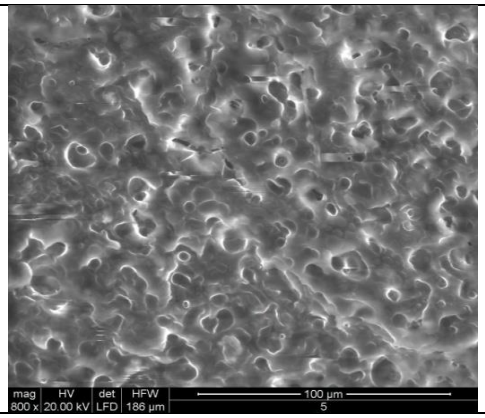
Fot. 2. Ser B



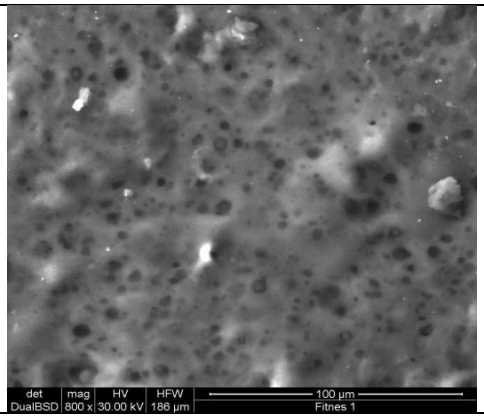
Fot. 3. Ser C



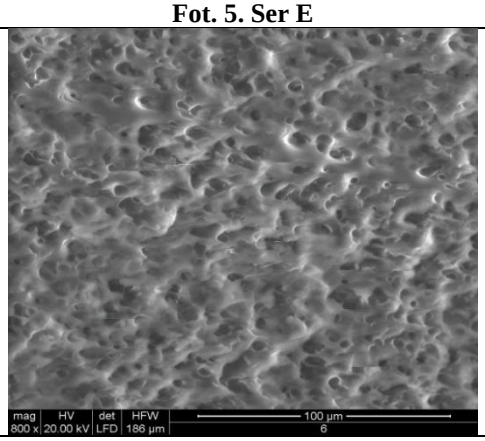
Fot. 4. Ser D



Fot. 5. Ser E



Fot. 6. Ser F



Fot. 7. Ser GG

Fotografia 1-7. Mikrofotografie serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (ser GG) (powiększenie 800x, napięcie 20.00 kV)
Źródło: badania własne

Najniższą wartość wymiaru fraktalnego 1,103 uzyskano dla sera C, co wynika z najsłabiej rozwiniętej linii brzegowej porów w tym serze (Tab. 13). Również sery A i E charakteryzowały się niskimi wartościami wymiaru fraktalnego, odpowiednio: 1,168 i 1,186, co świadczy o gładkiej i regularnej powierzchni porów w tych serach. Najwyższą wartość wymiaru fraktalnego (1,437) stwierdzono w serze F. Ta różnica jest wyraźna i wskazuje na silnie rozwiniętą, nieregularną i postrzępioną linię porów w tym serze. Skutkuje to większą powierzchnią porów i większą porowatością tego sera w porównaniu z innymi próbkami (Tab. 7). Zwiększona porowatość serów może wynikać z różnic w obróbce technologicznej lub różnic w składzie chemicznym użytego surowca. Z kolei te różnice mogą wpływać na szybkość procesu synerezy i szybkość procesu dojrzewania serów, a także na ostateczną ich teksturę i smak.

Tabela 13. Wyniki analizy fraktalnej serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG)

Rodzaj sera	Wymiar fraktalny D_L	Współczynnik determinacji R^2
A	1,168[b]	0,969
B	1,207[b]	0,943
C	1,103[c]	0,984
D	1,220[b]	0,961
E	1,186[b]	0,968
F	1,437[a]	0,943
GG	1,204[b]	0,965

[a-c] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

Redukcja tłuszczu w serze niskotłuszczowym wpływa na jego mikrostrukturę, która jest bardziej zwarta niż w przypadku serów pełnotłustych (Guinee i in., 2000, Mistry, 2001). Niższa zawartość tłuszczu w serach niskotłuszczowych jest związana z mniejszą liczbą kuleczek tłuszczu w matrycy białkowej (Ningtyas i in., 2017), co zostało potwierdzone na podstawie obrazów mikrostruktury.

5.1.5. Analiza profilu tekstury

Tekstura serów jest uzależniona od zawartości tłuszczu w suchej masie oraz jego stosunku do białka. W serach o obniżonej zawartości tłuszczu, większa zawartość białka w stosunku do tłuszczu ma wpływ na tworzenie się mocnej sieci wiązań białkowych, które są odpowiedzialne za zwięzłość, spoistość i twardość serów (Foegeding i in., 2003).

Analiza parametrów tekstury wykazała, że częściowe zastąpienie tłuszczu wodą wpływa na zmniejszenie twardości i adhezyjności serów. Stwierdzono istotne różnice ($P \leq 0,05$) w twardości badanych serów, która określa siłę potrzebną do osiągnięcia określonej deformacji produktu. Najwyższą wartość twardości oznaczono dla sera E (19065,56 g), najniższą natomiast dla serów A (10 346,72 g), B (12 755,75 g) i F (13 725,48 g) (Tab. 14). Twardość sera GG (15 610,49 g) nie różniła się ($P \leq 0,05$) od twardości serów D (16 658,98 g) i C (15 948,78 g).

Próbki serów A, B, C, F i kontrolnego były niełamliwe, nie zarejestrowano wartość tego parametru tekstury. Łamliwość charakteryzuje siłę, przy której próbka ulega przełamaniu. Natomiast próbki te nie łamały się, co miało związek z wyższą spoistością tych serów (Tab. 14).

Adhezyjność oznacza pracę potrzebną do pokonania sił przyciągania między powierzchnią elementu ściskającego a powierzchnią próbki. Parametry adhezyjności charakteryzują właściwości powierzchniowe serów (Surówka, 2002). Największą adhezyjność wykazywał ser F (-13,23 g.s), a najniższą sery E (-226,92 g.s), kontrolny GG (-225,45 g.s) i D (-147,22 g.s) (Tab. 14). Odnotowano istotne różnice ($P \leq 0,05$) dla adhezyjności pomiędzy poszczególnymi serami (Tab. 14).

Wykazano bardzo silną korelację ($P \leq 0,01$) między adhezyjnością a zawartością wody (Tab. 15). Silną korelację odnotowano dla zależności adhezyjność a zawartość tłuszczu ($P \leq 0,01$), ponadto tłuszczu w suchej masie ($P \leq 0,01$) oraz zawartości soli ($P \leq 0,05$) (Tab. 15).

Wszystkie badane sery charakteryzowały się sprężystością w zakresie od 0,99 do 1,00 (Tab. 14). Sprężystość analizowanych serów nie była skorelowana z ich składem, a badane próbki powracały do poprzedniego kształtu po ustąpieniu sił deformujących. Stwierdzono jedynie silną ($P \leq 0,05$) korelację między sprężystością a aktywnością wody badanych serów (Tab. 15).

Spoistość wyznacza stopień do jakiego można odkształcić dany produkt, ale go nie złamać. Określa także stosunek pracy potrzebnej do kompresji próbki podczas pierwszego i drugiego cyklu pomiaru. Nie stwierdzono ($P \leq 0,05$) różnic w spoistości serów A, B, C, E, F (Tab. 14). Wyjątek stanowił ser D, który charakteryzował się wartością tego parametru istotnie niższą ($P \leq 0,05$) od pozostałych serów (Tab. 14).

Generalnie, zawartość białka ma zasadniczy wpływ na żelowanie i spoistość obserwowaną w serach. Przy niższym poziomie tłuszczu i wody oczekuje się większej

zawartości kazeiny, co sprzyja interakcji białko-białko i promuje usztywnienie matrycy białkowej, dzięki czemu ser jest bardziej spójny (Borges i in., 2019).

Gumowatość charakteryzuje siłę potrzebną do zniszczenia wiązań wewnętrznych próbki, natomiast przeżuwalność określa energię wymaganą do ich zniszczenia. Stwierdzono różnice ($P \leq 0,05$) w gumowatości badanych serów, a najwyższe wartości tego parametru odnotowano dla sera F oraz E, odpowiednio: 17080,47 i 16458,12, natomiast najniższe dla serów A (11796,30) oraz D (12703,51) (Tab. 14).

Najwyższe wartości przeżuwalności obliczono dla serów E i F (odpowiednio 16441,68 i 16097,52), a najniższe dla sera A (11797,50) i D (12694,36) (Tab. 14). Pozostałe sery nie wykazywały istotnych ($P \leq 0,05$) różnic w wartościach tego parametru (Tab. 14).

Wartości współczynnika korelacji wskazują na silną ($P \leq 0,01$) korelację pomiędzy gumowatością i przeżuwalnością a zawartością soli w fazie wodnej sera i wartością pH (Tab. 15).

Elastyczność określa oporność próbki mierzoną podczas przyłożenia siły i jej natychmiastowy powrót do pierwotnej pozycji. Wartość ta określa różnicę między wysokością próbki przed i po pierwszej kompresji w teście TPA. Najwyższą wartością elastyczności charakteryzował się ser A (0,44), ser B (0,43) oraz ser C (0,46) i były to wartości różne ($P \leq 0.05$) od wartości zarejestrowanych dla pozostałych serów (Tab. 14). Pozostałe sery (D-F) nie wykazywały istotnych różnic ($P \leq 0,05$) w porównaniu do sera kontrolnego (GG) (Tab. 14).

Profile TPA próbek wskazują, że zawartość tłuszczu w serze odgrywa kluczową rolę w rozwoju tekstury; to znaczy, że zmniejszenie zawartości tłuszczu w serze ma odwrotny wpływ na teksturę sera (Katsiari i Voutsinas, 1994, Bryant i in.,1995, Rudan i in., 1999, Volikakis i in., 2004, Kahyaoglu i in., 2005). Kuleczki tłuszczu są uwięzione w matrycy białkowej i zapewniają gładkość i bardziej miękką teksturę (Romeih i in., 2002).

Fenelon i in. (1999) stwierdzili, że wzrost zawartości wody w niskotłuszczowym serze Cheddar wpłynął na poprawę jego tekstury, a przede wszystkim przyczynił się do zmniejszenia twardości oraz poprawy cech organoleptycznych badanego sera.

Badania McSweeney (2004) dotyczące przemian biochemicznych zachodzących podczas dojrzewania serów, dowodzą, że proteoliza przyczynia się do zmiękczania tekstury sera na skutek hydrolizy matrycy kazeinowej skrzepu, a także poprzez

zmniejszenie aktywności wody. Proteoliza ma bezpośredni wpływ na cechy organoleptyczne serów.

Tabela 14. Średnie (n=3) wartości parametrów tekstury serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG)

Rodzaj sera	Parametr tekstury							
	Twardość	**Łamliwość**	**Adhezyjność**	**Sprężystość**	**Spoistość**	**Gumowatość**	**Przeżuwalność**	**Elastyczność**
	g		g.s					
A	10346,72^{c}±737,17	-*	-120,45^{b}±51,71	1,00^{b}±0,05	1,20^{a}±0,02	11796,30^{c}±873,83	11797,50^{c}±877,94	0,44^{a}±0,06
B	12755,75^{c}±975,87	-*	-77,02^{b}±12,32	1,00^{b}±0,07	1,10^{a}±0,05	14153,52^{b}±934,08	14165,67^{b}±557,05	0,43^{a}±0,05
C	15948,78^{b}±768,18	-*	-57,28^{b}±20,03	0,99^{c}±0,06	1,10^{a}±0,04	15393,56^{b}±850,71	15384,56^{b}±759,87	0,46^{a}±0,03
D	16658,98^{b}±880,72	13247,40^{b}±557,66	-147,22^{c}±59,38	0,99^{c}±0,07	0,78^{c}±0,12	12703,51^{c}±481,76	12694,36^{c}±489,48	0,31^{b}±0,04
E	19065,56^{a}±845,98	17859,79^{a}±11,25	-226,92^{c}±49,37	0,99^{c}±0,08	0,99^{a}±0,05	16458,12^{ab}±520,36	16441,68^{a}±521,92	0,37^{b}±0,05
F	13725,48^{c}±894,96	-*	-13,23^{a}±6,45	1,10^{a}±0,05	1,11^{a}±0,07	17080,47^{a}±445,26	16097,56^{a}±620,59	0,31^{b}±0,03
GG	15610,49^{b}±853,76	-*	-225,45^{c}±71,81	0,99^{c}±0,08	0,97^{b}±0,03	15168,68^{b}±905,78	15153,52^{b}±904,26	0,35^{b}±0,02

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)

*nie oznaczono parametru

Źródło: badania własne

Tabela 15. Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami, parametrami fizykochemicznymi i wskaźnikami proteolizy a parametrami tekstury serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu i w serze kontrolnym

Parametr	Twardość	Adhezyjność	Sprężystość	Spoistość	Gumowatość	Przeżuwalność	Elastyczność
Woda	-0,3926	**0,9312****	0,6298	0,5230	0,1711	0,0696	0,2660
Białko	0,0141	-0,2820	0,0137	0,0362	-0,5024	-0,3832	0,6047
Białko w s.m.	-0,3458	0,6942	0,5630	0,5397	-0,1712	-0,1768	0,7272
NaCl	-0,0238	**0,7528***	0,4236	0,4721	0,6635	0,5975	0,1614
S/M	0,3591	0,2892	0,0658	0,2861	**0,9384***	**0,9362***	0,0289
Tłuszcz	0,1622	**-0,8982****	-0,6858	-0,2230	-0,1328	-0,0543	-0,1697
Tłuszcz w s.m.	0,0878	**-0,8736****	-0,6366	-0,1766	-0,1892	-0,1175	-0,1454
WSN-TN	-0,0753	0,6383	0,7339	-0,2510	-0,1262	-0,2035	-0,2214
TCA-TN	0,2387	0,2135	0,2121	-0,6557	-0,3339	-0,3606	-0,3306
PTA-TN	0,6545	0,0257	-0,1799	-0,6699	0,0552	0,0869	-0,2287
pH	-0,1349	-0,3017	-0,2333	-0,4839	**-0,7905****	**-0,8005****	-0,2363
Aktywność wody	-0,4400	0,6591	**0,8270***	0,4443	0,3384	0,2175	-0,1540

*P≤0,05
**P≤0,01
s.m. - sucha masa
S/M - zawartość soli w fazie wodnej sera
WSN-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
TCA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
PTA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
Źródło: badania własne

Rudan i in. (1999) badając ser Mozzarella o zróżnicowanej zawartości tłuszczu zaobserwowali, że w serach Mozzarella o wyższej zawartości tłuszczu występują niższe wartości twardości, kohezyjności oraz elastyczności w porównaniu do pozostałych poddanych badaniom serów.

Badania Bryant i in. (1995) dotyczące sera Cheddar o zawartości tłuszczu od 13% do 34%, wykazały wpływ redukcji tłuszczu na teksturę sera. Wraz ze zmianą zawartości tłuszczu zmieniała się twardość i sprężystość serów. Sery o najwyższej zawartości tłuszczu były mniej twarde od sera o zawartości tłuszczu na poziomie 13%. Adhezyjność i spójność serów zmniejszała się wraz ze spadkiem zawartości tłuszczu w serze

Rogers i in. (2009) w badaniach nad wpływem zawartości tłuszczu na teksturę sera Cheddar stwierdzili, że sery z zawartością tłuszczu na poziomie 6% charakteryzowały się większą twardością i sprężystością niż sery, w których jego zawartość wynosiła 16% i 33%. W serach tych niższa zawartość tłuszczu wpływała na zwiększenie zawartości białka co skutkowało bardziej zwartą i twardą teksturą sera.

5.1.6. Analiza sensoryczna tekstury

W analizie sensorycznej serów komercyjnych stwierdzono istotne ($P \leq 0,05$) różnice w twardości badanych serów. Najwyższą twardością ocenianą przez dotyk ręką, charakteryzował się ser D (5,70), najniższą odnotowano dla sera F (2,80) oraz serów A i B, odpowiednio 3,20 i 3,50 (Tab. 16).

Najwyższą wartością sprężystości, ocenianą przez dotyk ręką, charakteryzował się ser A (4,90). Sprężystość serów B, E i F nie różniła się ($P \leq 0,05$) zarówno w stosunku do sera A jak i sera kontrolnego (GG) (Tab. 16). Najniższą wartość sprężystości stwierdzono dla sera D (2,50) i C (3,10) (Tab. 16). Wyniki sprężystości określonej testem TPA nie były tak zróżnicowane jak podczas oceny przez dotyk ręką a wartości mieściły się w bardzo wąskim przedziale 0,99-1,10 (Tab. 14).

Najwyższą wartość tempa odkształcenia podczas ściskania próbki w palcach charakteryzował się ser kontrolny GG (5,30), w którym oznaczono także najwyższą procentową zawartością tłuszczu i najniższą procentową zawartością białka. Tempo odkształcenia sera A nie różniło się ($P \leq 0,05$) od tempa odkształcenia sera kontrolnego (Tab. 16). Najniższą wartość tego parametru oznaczono w serze D (2,70) i C (3,20) (Tab. 16).

Największą twardością, określoną metodą pierwszego kęsa, charakteryzował się ser C (5,10), najmniejszą natomiast sery A, E i F (zakres od 2,20 do 3,70). Ogólnie wyniki oceny twardości metodą dotyku ręką i pierwszego kęsa wykazywały podobne tendencje zależności (Tab. 16).

Przeżuwalność serów: B, C, E i F nie wykazywała istotnych różnic ($P \leq 0,05$), a najwyższą jej wartość przypisano próbkom sera F (3,10). Sery A i D charakteryzowały się niższymi wartościami przeżuwalności i nie wykazywały różnic ($P \leq 0,05$) w porównaniu z serem kontrolnym (GG) (Tab. 16).

Według oceniających najwyższą spoistość wykazywał ser F (3,60). Badane sery charakteryzowały się podobnymi wartościami spoistości (Tab. 16). Jedynie ser B (2,90) różnił się ($P \leq 0,05$) od pozostałych serów, za wyjątkiem sera D. Adhezyjność sera F (3,80) była najwyższa i znacznie odbiegała od pozostałych serów. Z kolei najniższą adhezyjnością charakteryzowały się ser D (2,40) (Tab. 16).

Gładkość próbek sera po żuciu (3,30) i pozostałości po żuciu (3,50) według oceniających były najbardziej wyczuwalne w ocenie sera F, który charakteryzował się najniższą zawartością białka spośród wszystkich badanych serów. Najniższą ocenę pod względem gładkości otrzymał ser E (2,40). Nie stwierdzono różnic ($P > 0,05$) w gładkości po żuciu w przypadku pozostałych serów (Tab. 16). Pozostałość po żuciu dla większości analizowanych serów była na zbliżonym poziomie, za wyjątkiem sera F i B (Tab. 16).

Badania Bryanta i in. (1995) dotyczące wpływu redukcji tłuszczu na parametry sensoryczne sera wykazały, że podczas przeżuwania sery pełnotłuste szybciej ulegały rozdrobnieniu niż sery o obniżonej zawartości tłuszczu.

Sharafi i in. (2020) badali teksturę testem TPA i właściwości sensoryczne ultrafiltrowanego sera niskotłuszczowego (zawartość tłuszczu 7,9%) z dodatkiem galaktomannanu (żel celulozowy) i gumy guar (Preparat Novagel). Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że dodatek galaktomannanu w ilości 0,5% i preparatu Novagel w ilości 0,3% przyczynił się do uzyskania podobnego profilu tekstury badanego sera a jego właściwości sensoryczne były zbliżone do sera pełnotłustego.

Właściwości serów o obniżonej zawartości tłuszczu są ściśle związane ze zmianą składu i struktury. Poprawę właściwości sensorycznych serów o obniżonej zawartości tłuszczu można osiągnąć poprzez modyfikację procesu produkcji oraz dostosowanie parametrów technologicznych (Hauque i in., 1997).

Tabela 16. Średnie (n=10) wartości oceny sensorycznej serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG)

Rodzaj sera	Twardość (dotyk ręką)	Sprężystość (dotyk ręką)	Tempo odkształcania (dotyk ręką)	Twardość (pierwszy kęs)	Przeżuwalność (pierwszy kęs)	Spoistość (pierwszy kęs)	Adhezyjność (pierwszy kęs)	Gładkość próby po żuciu	Pozostałość po żuciu
A	$3{,}20^{c}$	$4{,}90^{a}$	$5{,}20^{a}$	$3{,}30^{c}$	$2{,}60^{b}$	$3{,}50^{a}$	$3{,}10^{ab}$	$3{,}10^{ab}$	$2{,}50^{b}$
B	$3{,}50^{c}$	$4{,}50^{a}$	$4{,}50^{b}$	$4{,}00^{b}$	$3{,}00^{a}$	$2{,}90^{b}$	$2{,}80^{b}$	$3{,}10^{ab}$	$3{,}10^{ab}$
C	$4{,}90^{b}$	$3{,}10^{c}$	$3{,}20^{c}$	$5{,}10^{a}$	$3{,}10^{a}$	$3{,}40^{a}$	$2{,}90^{b}$	$3{,}00^{ab}$	$3{,}50^{a}$
D	$5{,}70^{a}$	$2{,}50^{c}$	$2{,}70^{c}$	$4{,}80^{b}$	$2{,}60^{b}$	$3{,}10^{ab}$	$2{,}40^{b}$	$2{,}50^{b}$	$2{,}40^{b}$
E	$4{,}20^{b}$	$4{,}20^{ab}$	$4{,}50^{b}$	$3{,}70^{c}$	$3{,}00^{a}$	$3{,}50^{a}$	$3{,}30^{ab}$	$2{,}40^{b}$	$3{,}00^{ab}$
F	$2{,}80^{c}$	$4{,}50^{a}$	$4{,}80^{b}$	$2{,}20^{c}$	$3{,}10^{a}$	$3{,}60^{a}$	$3{,}80^{a}$	$3{,}30^{a}$	$3{,}50^{a}$
GG	$5{,}10^{a}$	$4{,}00^{b}$	$5{,}30^{a}$	$4{,}80^{b}$	$2{,}80^{b}$	$3{,}50^{a}$	$2{,}50^{b}$	$2{,}90^{ab}$	$3{,}00^{ab}$

[a-c] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0{,}05$)
Źródło: badania własne

5.2. Charakterystyka serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych oraz mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny

5.2.1. Skład fizykochemiczny

Wyprodukowanie sera niskotłuszczowego o smaku i konsystencji porównywalnej z pełnotłustym serem jest technicznie trudne. Sery te często wykazują szereg wad smakowo-zapachowych, głównie gorycz i niską intensywność smaku. Ich tekstura w porównaniu do sery pełnotłustych jest bardziej twarda, gumowata, woskowa i bardziej krucha, a także mniej lepka i spójna (Amelia i in., 2013). Im większa redukcja tłuszczu, tym poważniejsze są wady smaku i konsystencji sera. Zasadę tę jasno określili Childs i Drake (2009) poprzez połączoną analizę opartą na wyborach i testach akceptacji konsumentów, które wykazały, że smak, a następnie tekstura sera są najważniejszymi atrybutami determinującymi ich spożycie i akceptację przez konsumentów.

Aby poprawić teksturę serów o obniżonej zawartości tłuszczu producenci starają się zmaksymalizować zatrzymywanie wody tj. zwiększyć dodatek substancji wiążących wodę w skrzepie (Amelia i in., 2013). Woda w serach o zmniejszonej zawartości tłuszczu pełni funkcję plastyfikatora oraz wpływa na cechy reologiczne gotowego produktu (Pluta, 2009). W celu zwiększenia zawartości wody w masie sera modyfikuje się technologię jego wytwarzania stosując wyższą temperaturę pasteryzacji mleka, płukanie skrzepu wodą o temperaturze 22°C lub dodając zdenaturowane białka serwatkowe, hydrokoloidy czy też kultury starterowe wytwarzające egzopolisacharydy (Amelia i in., 2013).

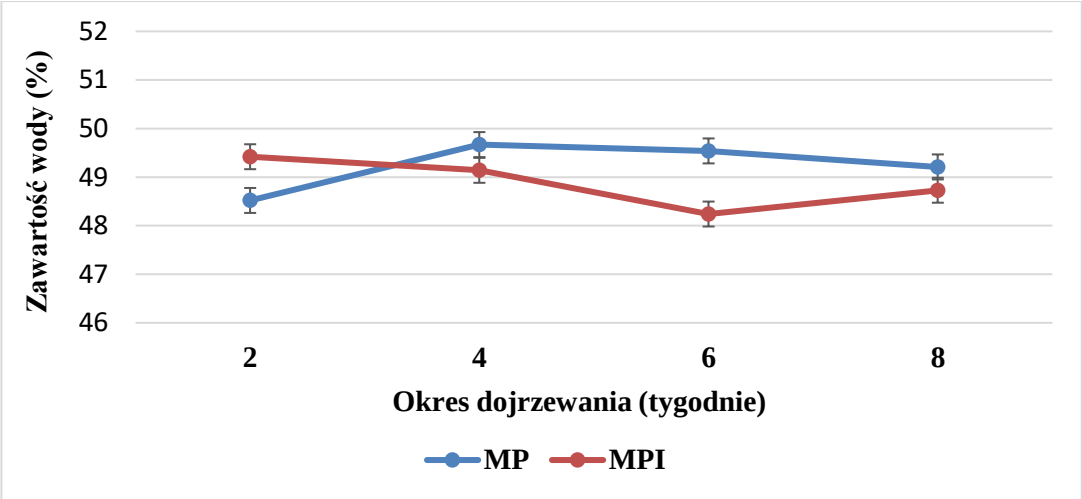
Wśród produktów stosowanych jako substytuty tłuszczu znajduje się inulina, która jest polimerem węglowodanowym składającym się z jednostek fruktozy (2-60 jednostek fruktozy), zbudowanym z β(2,1)-połączonych reszt fruktozylowych w większości zakończonych resztami glukozy (Karimi i in., 2015, Modzelewska-Kapituła i Kłębukowska, 2009). Inulina ma wiele zastosowań, w tym jako zamiennik tłuszczu i cukru (Kocer i in., 2007, Rodríguez-García i in., 2014), niskokaloryczny środek wypełniający i teksturujący. Jest stosowana również ze względu na swoje właściwości fizjologiczne jako rozpuszczalny błonnik pokarmowy, posiada także właściwości prebiotyczne (Tungland i Meyer, 2002).

Inulina wydaje się szczególnie odpowiednia do zastępowania tłuszczu w serach o niskiej zawartości tłuszczu, ponieważ może przyczyniać się do poprawy odczucia w ustach (Meyer i in., 2011). Zastępująca tłuszcz właściwość inuliny opiera się na jej zdolności do stabilizowania struktury fazy wodnej, co przyczynia się do poprawy kremowości (Ibrahim i in., 2004). Kremowy smak w ustach uzyskuje się, gdy inulina jest stosowana jako zamiennik tłuszczu w produktach mlecznych ze względu na jej interakcje z białkami serwatkowymi i kazeinianami (Bot i in., 2004, Karaca i in., 2009).

W badanych próbkach serów produkowanych z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP), z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI) i kontrolnych (SK) nie stwierdzono różnic (P>0,05) w zawartości wody (Rys. 7, Tab. 17). Sery z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z dodatkiem i bez dodatku inuliny sklasyfikowano jako sery twarde, dla których zawartość wody w suchej masie beztłuszczowej mieści się w przedziale 49-56% (Codex Alimentarius, 2011). Natomiast ser kontrolny był serem półtwardym, dla którego zawartość wody w suchej masie beztłuszczowej powinna mieścić się w przedziale 54-63% (Codex Alimentarius, 2011).

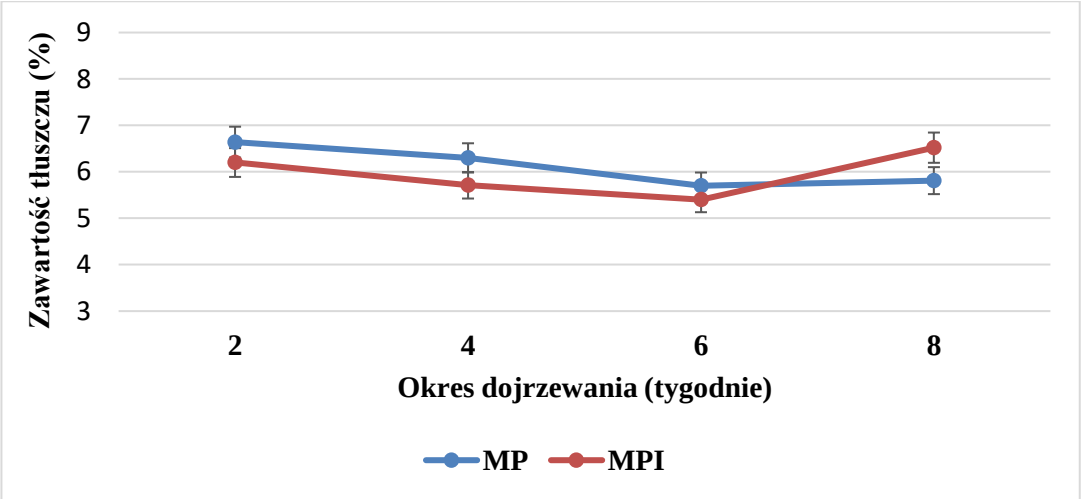
Inulina wykazuje zdolność wiązania wody, niemniej w niniejszych badaniach nie stwierdzono różnic w zawartości wody między serem z dodatkiem tylko mikropartykułowanych białek serwatkowych a serem z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny. Do podobnych konkluzji doszli również Borges i in. (2019) oraz Fadaei i in. (2012).

Najwyższy wydatek uzyskano podczas produkcji sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny. Średnio ze 100 kg mleka otrzymano 8,36 kg sera. Wydatek podczas produkcji sera z mikropartykulatem biełek serwatkowych wynosił 8,34 kg/100kg. Najmniejszy (7,75 kg/100kg) wydatek uzyskano podczas produkcji sera bez dodatków (ser kontrolny).



Rysunek 7. Zmiany zawartości wody w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

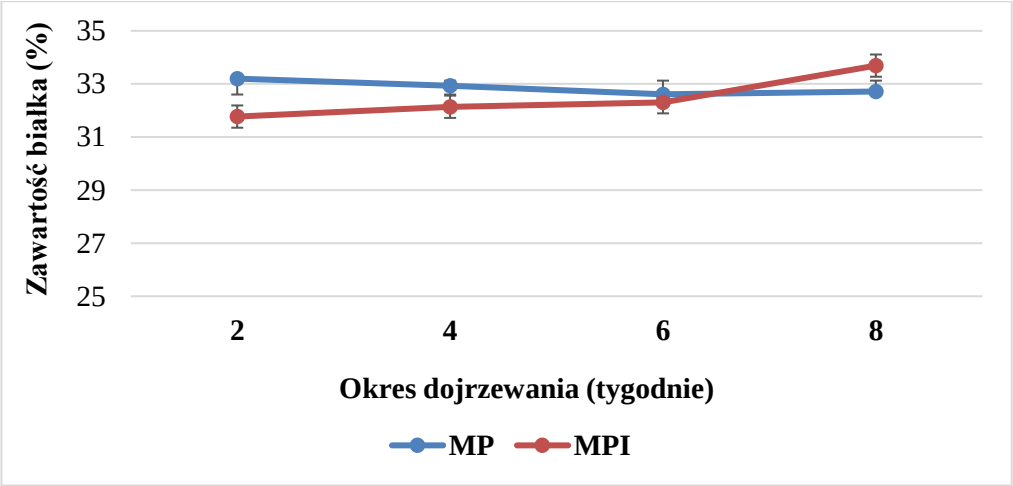
Wszystkie wyprodukowane sery sklasyfikowano jako sery częściowo odtłuszczone (niskotłuste), w których zawartość tłuszczu w suchej masie jest równa lub większa niż 10% ale mniejsza niż 25% (Codex Alimentarius, 2011). Ser kontrolny o obniżonej zawartości tłuszczu, ale bez dodatku mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny charakteryzował się zawartością tłuszczu na poziomie 12,49% (24,85% tłuszczu w s.m.), która była istotnie różna ($P \leq 0,05$) od pozostałych serów (Rys. 8, Tab. 17).



Rysunek 8. Zmiany zawartości tłuszczu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

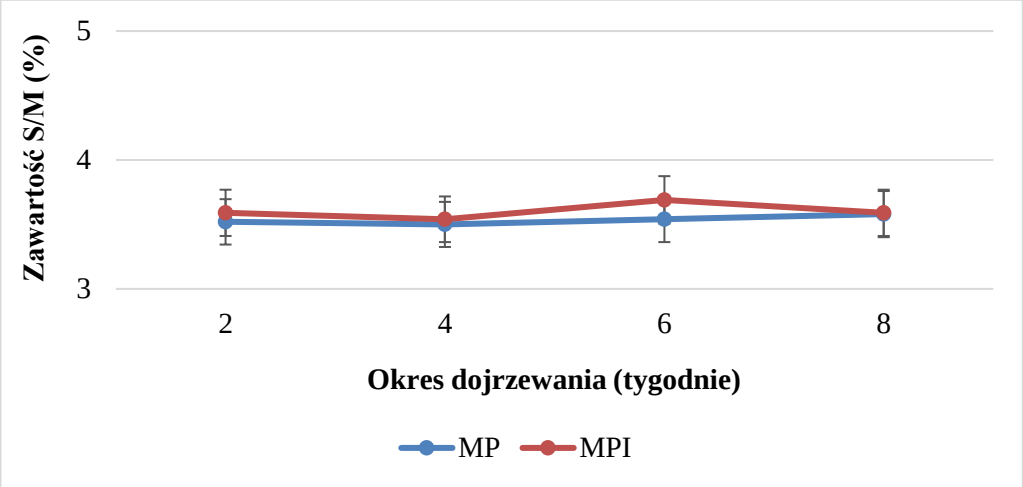
Dodatek koncentratów białkowych do serów o obniżonej zawartości tłuszczu, powoduje zwiększenie zawartości suchej masy sera poprzez włączanie białek serwatkowych w sieć kazeiny (Anderson, 1999). Należy jednak mieć na uwadze fakt, że zakres i głębokość proteolizy mogą zależeć od udziału białek serwatkowych. Uważa się, że za mniejszą akceptowalność serów o zredukowanej zawartości tłuszczu w stosunku do serów pełnotłustych odpowiada mniej zaawansowany proces pierwotnej proteolizy w serach o niższej zawartości tłuszczu (Amelia i in., 2013). Ponadto związki lotne, odpowiedzialne za smakowitość produktu mają różne poziomy progowe w zależności od środowiska, w którym się znajdują.

Zawartość białka w badanych serach mieściła się w zakresie od 33,69% do 31,77% (Rys. 9, Tab. 17). Stwierdzono niewielkie lecz istotne ($P \leq 0,05$) różnice w zawartości białka między serem kontrolnym a serami a serami doświadczalnymi MP i MPI (Tab. 17). Nie wykazano różnic ($P > 0,05$) w zawartości białka w suchej masie między analizowanymi serami (Tab. 17). Końcowa zawartość białka w produkcie jest rezultatem stopnia zatrzymania tego składnika w strukturze sera. W serach miękkich zatrzymanie białek mikropartykulatu może sięgać 100%, natomiast w serach twardych zaledwie 50% przy dodatku 0,3 kg na 100 litrów mleka kotłowego. Im większy stopień denaturacji tym większa jest retencja mikropartykulatu w serze.



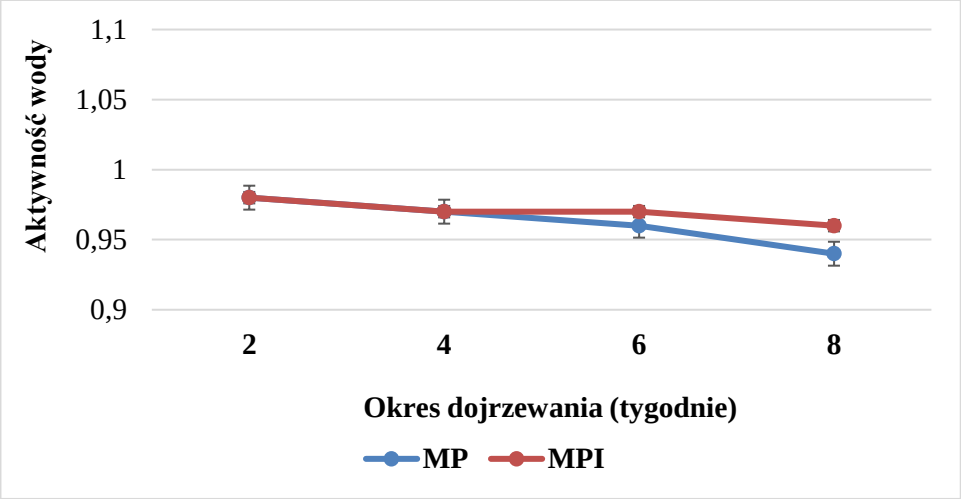
Rysunek 9. Zmiany zawartości białka w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Nie stwierdzono różnic w zawartości soli (NaCl) między badanymi serami (Tab. 17). Zawartość soli w fazie wodnej sera (S/M) kształtowała się na podobnym poziomie (Rys.10, Tab. 17).



Rysunek 10. Zmiany zawartości soli w fazie wodnej sera (S/M) w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Aktywność wody w badanych serach kształtowała się w przedziale od 0,94 do 0,98 (Rys.11, Tab. 17). Nie stwierdzono istotnych (P>0,05) zmian w aktywności wody podczas 8 tygodni dojrzewania serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z i bez inuliny.



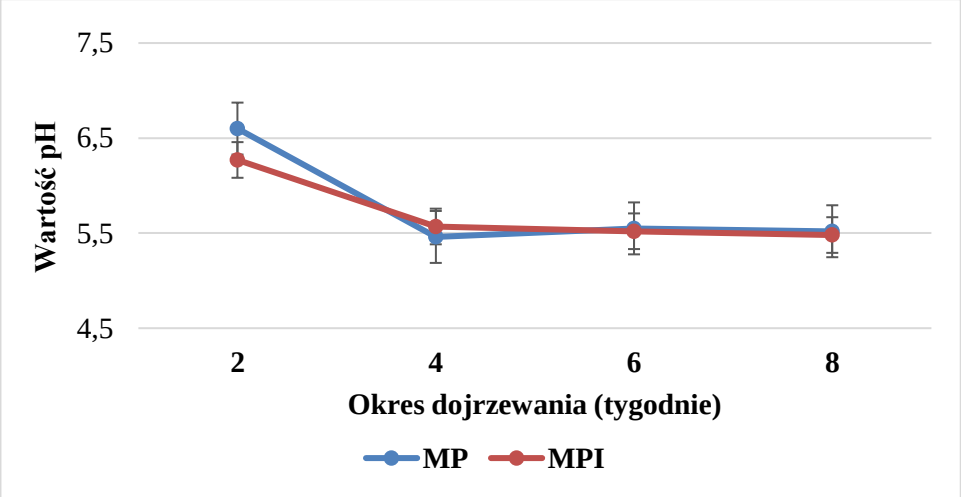
Rysunek 11. Zmiany aktywności wody sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Tabela 17. Właściwości fizykochemiczne (n=3) serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) i bez dodatku (MP) oraz w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania

Rodzaj sera	Okres dojrzewania (tygodnie)	Woda	Tłuszcz	Tłuszcz w s.m.	Białko	Białko w s.m.	NaCl	S/M	Aktywność wody	Wartość pH
		%								
MP-2	2	48,52^{a}±0,50	6,64^{b}±0,35	12,30^{b}±0,26	33,20^{b}±0,06	68,01^{a}±0,16	1,71^{a}±0,13	3,52^{a}±0,30	0,98^{a}±0,09	6,60^{a}±0,19
MP-4	4	49,67^{a}±0,11	6,30^{b}±0,28	12,52^{b}±0,12	32,93^{b}±1,08	65,43^{a}±2,13	1,72^{a}±0,16	3,47^{a}±0,12	0,97^{a}±0,11	5,46^{b}±0,15
MP-6	6	49,54^{a}±0,10	5,70^{c}±0,19	11,30^{c}±0,15	32,61^{b}±0,22	64,63^{a}±0,33	1,75^{a}±0,11	3,54^{a}±0,11	0,96^{a}±0,09	5,55^{b}±0,16
MP-8	8	49,21^{a}±0,57	5,81^{c}±0,18	11,99^{b}±0,23	32,71^{b}±0,20	67,51^{a}±0,67	1,76^{a}±0,18	3,58^{a}±0,18	0,94^{a}±0,08	5,52^{b}±0,18
MPI-2	2	49,42^{a}±0,27	6,20^{b}±0,14	12,26^{b}±0,28	31,77^{b}±0,20	62,81^{a}±0,06	1,78^{a}±0,16	3,59^{a}±0,13	0,98^{a}±0,10	6,27^{a}±0,17
MPI-4	4	49,14^{a}±0,15	5,71^{c}±0,15	11,22^{c}±0,22	32,14^{b}±0,73	63,19^{a}±1,43	1,74^{a}±0,11	3,54^{a}±0,22	0,97^{a}±0,07	5,57^{b}±0,16
MPI-6	6	48,24^{a}±0,18	5,40^{c}±0,21	11,04^{c}±0,12	32,31^{b}±0,09	66,14^{a}±0,19	1,78^{a}±0,14	3,69^{a}±0,10	0,97^{a}±0,08	5,52^{b}±0,19
MPI-8	8	48,73^{a}±0,57	6,52^{b}±0,17	13,15^{b}±0,13	33,69^{b}±1,02	67,92^{a}±2,05	1,75^{a}±014	3,59^{a}±0,12	0,96^{a}±0,11	5,48^{b}±0,18
SK	8	49,74^{a}±0,10	12,49^{a}±0,14	24,85^{a}±0,10	34,24^{a}±0,34	68,12^{a}±0,68	1,79^{a}±0,16	3,59^{a}±0,11	0,97^{a}±0,08	5,59^{b}±0,17

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
s.m. - sucha masa
S/M- zawartość soli w fazie wodnej sera
Źródło: badania własne

Kwasowość czynną określono w przedziale wartości pH od 5,46 do 6,60 (Rys. 12, Tab. 17). Nie stwierdzono różnic (P>0,05) w wartościach pH serów w ostatnim dniu badań (po 8 tygodniach dojrzewania). Dla serów MP i MPI zmiany wartości pH miały podobny charakter (Rys. 12) - odnotowano spadek wartości pH między 2 a 4 tygodniem dojrzewania. Juan i in. (2013) wykazali, że dodatek inuliny nie miał wpływu na wartość pH badanych serów, ale znacząco przyczynił się do zwiększenia zawartości białka w serze o obniżonej zawartości tłuszczu. Obniżenie wartości pH podczas przechowywania, powszechne w serach i fermentowanych produktach mlecznych, jest naturalnym zjawiskiem ze względu na ciągłą produkcję kwasu mlekowego i innych kwasów organicznych jako produktów fermentacji laktozy przez kultury starterowe i może powodować zmiany sensoryczne i technologiczne produktu (Cardarelli i in., 2008). Odczyn pH sera ma ogromne znaczenie dla jego końcowej jakości, ponieważ wpływa na teksturę, wygląd i smak produktu.



Rysunek 12. Zmiany wartości pH sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Mikropartykułowane białka serwatkowe i inulina roztworzono w wodzie technologicznej za pomocą linii do roztwarzania. Roztwór inuliny połączono z ochłodzonym i pasteryzowanym mlekiem dopiero w kotle serowarskim. Takie podejście miało ograniczyć hydrolizę inuliny do fruktozy pod wpływem wysokiej temperatury podczas pasteryzacji. Ten polisacharyd w temperaturze 60-80^{o}C przy pH 6-7 ulega degradacji w ilości około 2-3% (Glibowski i Bukowska, 2011). Po rozpadzie do fruktozy inulina traci swoje właściwości funkcjonalne, tj. kształtowanie struktury oraz

smakowitości sera. Czas koagulacji w przypadku produkcji sera z mikropartykulatem białek serwatkowych oraz mikropartykulatem białek serwatkowych i inuliną był krótszy o 4 minuty w porównaniu do sera bez dodatków i wynosił 24 min. Skrzep w próbach z dodatkami charakteryzował się większą zwięzłością. Serwatka w tych próbach charakteryzowała się bardziej żółtozielonym odcieniem. Nie stwierdzono innych różnic podczas produkcji różnych wariantów serów o obniżonej zawartości tłuszczu w tym etapie badań.

Odnotowano istotne różnice ($P \leq 0,05$) w zawartości składników mineralnych w badanych serach. Najwyższą zawartość wapnia oznaczono w serze z mikropartykulatem i inuliną w 4 tyg. badań (MPI-4) 14168,08 mg/kg, najniższą natomiast w serze z mikropartykulatem w 2 tyg. badań 10752,48 mg/kg. Zawartość wapnia w serze kontrolnym wynosiła 13303,51 mg/kg (Rys.13, Tab. 18). Nie stwierdzono istotnych różnic ($P > 0,05$) w zawartości tego pierwiastka w serach w ostatnim dniu badań (Rys.13, Tab. 18).

Zawartość magnezu kształtowała się na poziomie od 391,37 do 494,46 mg/kg (Tab. 18). Nie stwierdzono różnic ($P > 0,05$) w zawartości magnezu dla serów MP i MPI (Rys.15, Tab. 18). Ser kontrolny charakteryzował się niższą ($P \leq 0,05$) zawartością magnezu w porównaniu do serów MP i MPI (Rys.14, Tab. 18).

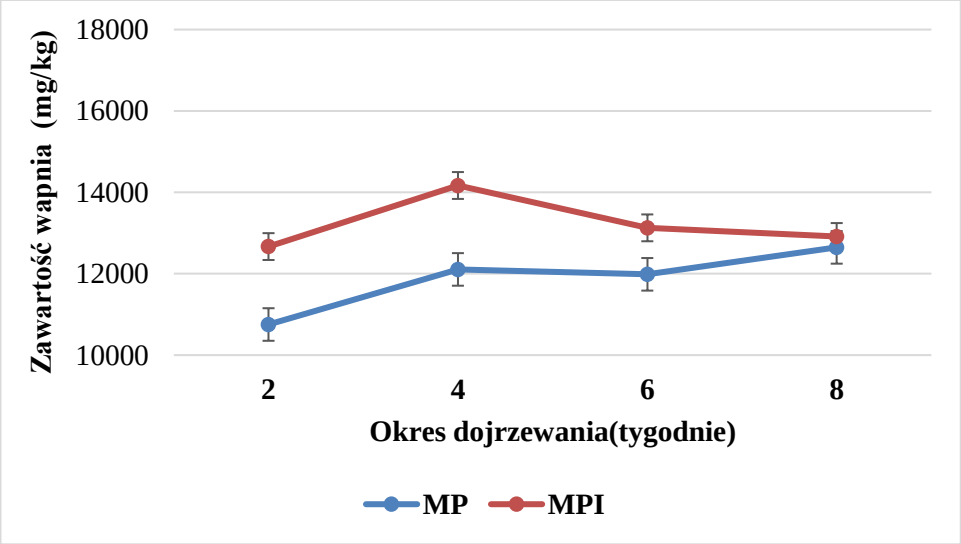
Nie stwierdzono różnic ($P \leq 0,05$) w zawartości sodu dla serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z i bez inuliny oraz dla sera kontrolnego (Tab. 18). Jedynym wyjątkiem była próbka MP-2, która wykazywała istotnie niższą zawartość sodu (Rys. 15, Tab. 18).

Stwierdzono zmiany w zawartości potasu w czasie dojrzewania serów. Najwyższy poziom potasu wykazywały próbki MP i MPI po 8 tygodniach dojrzewania (Rys. 16, Tab. 18), który różnił się ($P \leq 0,05$) od zawartości potasu w próbkach sera kontrolnego (Tab. 18).

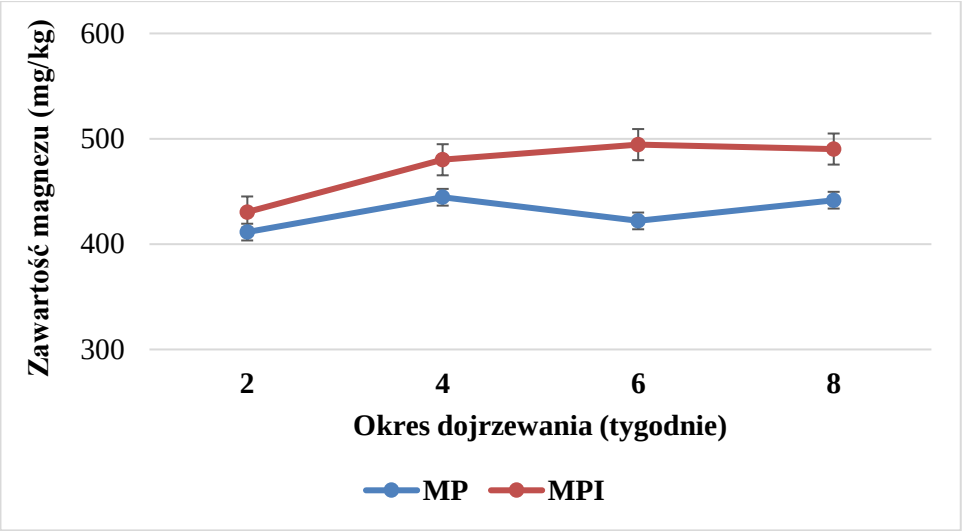
Stwierdzono istotne ($P \leq 0,05$) różnice w zawartości fosforu między analizowanymi próbkami. Generalnie, ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) charakteryzował się niższą ($P \leq 0,05$) zawartością fosforu w porównaniu do sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI). Nie stwierdzono różnic ($P > 0,05$) w zawartości fosforu w ostatnim dniu badań dla serów MP i SK (Rys. 17, Tab. 18).

Nie stwierdzono istotnych różnic w stosunku Ca:P dla wszystkich analizowanych serów. Stosunek Ca:P był większy niż rekomendowany 1,3:1 i wynosił od 3,11 do 3,78 (Tab 18).

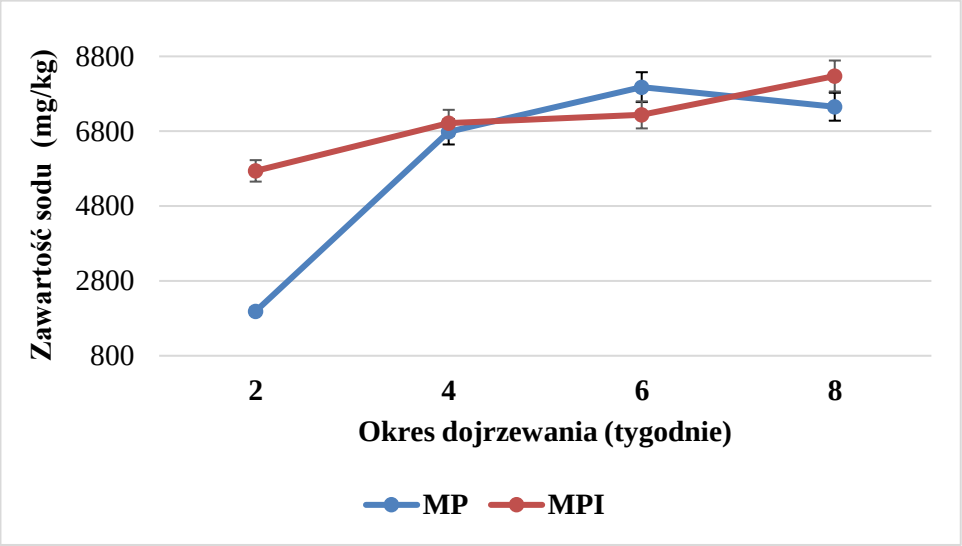
Szereg badań naukowych wskazuje, że inulina poprawia biodostępność pewnych składników mineralnych. Coudray i in. (1997) udowodnili, że inulina przyczyniła się do podniesienia biodostępności wapnia o 58% u mężczyzn karmionych przez miesiąc porcją 40 g inuliny dziennie. Karmienie szczurów inuliną w ilości 10% ich masy codziennie przez okres 10 tygodni podniosło biodostępność magnezu o ponad 15% oraz doprowadziło do zwiększenia zawartości tego składnika mineralnego w kości udowej o ponad 5% (Krejpcio i in., 2009). Spożywanie inuliny pozytywnie wpływa na układ pokarmowy człowieka, wchłanianie składników mineralnych oraz odpowiedni poziom cholesterolu co zmniejsza ryzyko chorób cywilizacyjnych jak otyłość czy cukrzyca.



Rysunek 13. Zmiany zawartości wapnia w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne



Rysunek 14. Zmiany zawartości magnezu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne



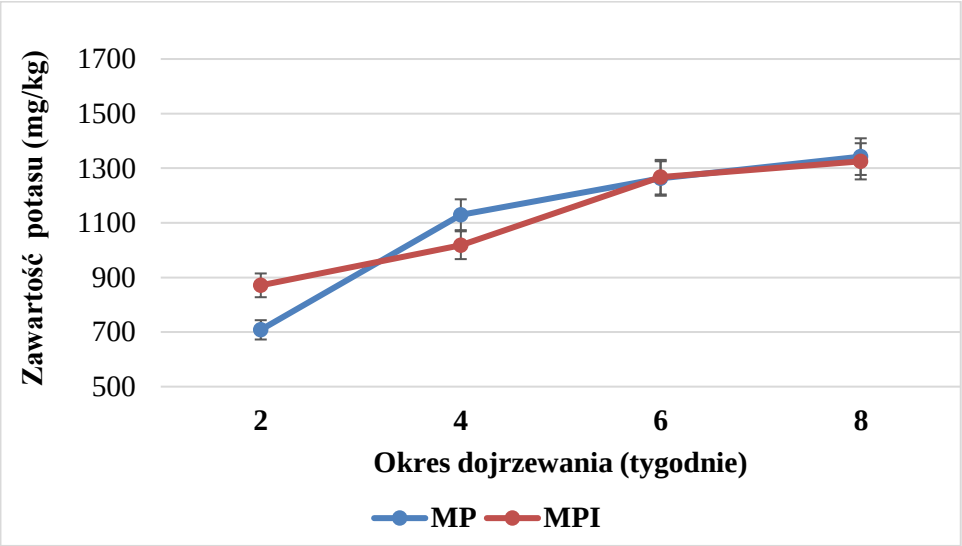
Rysunek 15. Zmiany zawartości sodu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Tabela 18. Średnia (n=3) zawartość składników mineralnych w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania

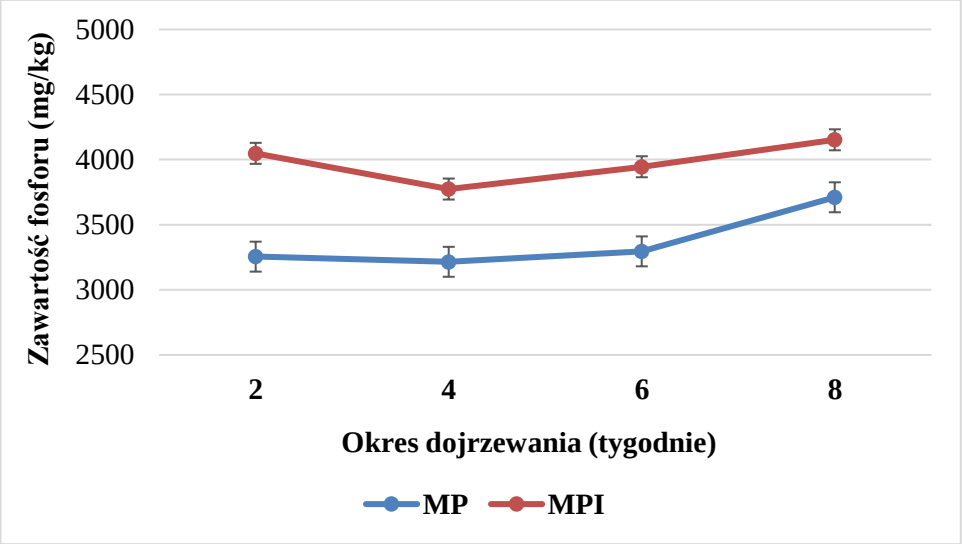
Rodzaj sera	Okres dojrzewania (tygodnie)	Wapń (Ca)	Magnez	Sód	Potas	Fosfor (P)	Ca:P
		mg/kg					
MP-2	2	10752,48^{b}±17,87	411,42^{a}±11,91	1990,05^{b}±12,81	708,08^{c}±10,45	3255,27^{b}±16,66	3,30^{a}±0,15
MP-4	4	12106,10^{a}±16,69	444,50^{a}±14,89	6785,04^{a}±10,83	1129,72^{b}±10,71	3215,79^{b}±11,47	3,76^{a}±0,17
MP-6	6	11985,11^{b}±24,42	422,02^{a}±12,42	7977,95^{a}±13,54	1262,43^{a}±13,16	3295,87^{b}±10,76	3,64^{a}±0,13
MP-8	8	12647,51^{a}±17,50	441,71^{a}±14,62	7454,67^{a}±11,77	1342,54^{a}±14,44	3711,15^{b}±12,66	3,42^{a}±0,11
MPI-2	2	12667,33^{a}±42,50	430,47^{a}±11,58	5740,58^{a}±26,50	871,09^{c}±14,03	4048,60^{a}±57,83	3,13^{a}±0,17
MPI-4	4	14168,08^{a}±18,01	480,08^{a}±15,49	7021,09^{a}±10,98	1018,04^{b}±13,07	3774,30^{b}±17,36	3,76^{a}±0,18
MPI-6	6	13127,39^{a}±16,43	494,46^{a}±16,25	7237,09^{a}±12,01	1267,22^{a}±30,01	3945,66^{a}±27,92	3,33^{a}±0,12
MPI-8	8	12914,74^{a}±26,03	490,25^{a}±15,16	7275,14^{a}±13,78	1325,33^{a}±16,51	4152,55^{a}±37,83	3,11^{a}±0,10
SK	8	13303,51^{a}±25,51	391,37^{b}±10,97	4974,04^{a}±25,97	1100,18^{b}±11,94	3940,93^{a}±44,31	3,37^{a}±0,11

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)

Źródło: badania własne



Rysunek 16. Zmiany zawartości potasu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne



Rysunek 17. Zmiany zawartości fosforu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Li i in. (2019) badali zastosowanie inuliny, maltitolu i lecytyny jako zamienników tłuszczu podczas produkcji sera Mozzarella o obniżonej zawartości tłuszczu.

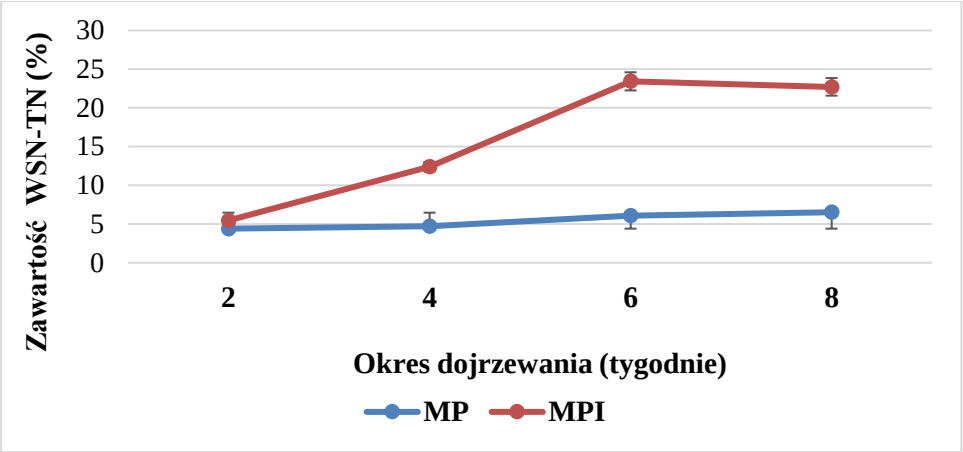
Stwierdzono, że dodatki te mogą być skutecznym zamiennikiem tłuszczu w serze Mozzarella o obniżonej zawartości tłuszczu, ponieważ poprawiają właściwości fizykochemiczne oraz parametry tekstury badanego sera.

Inulina jest funkcjonalnym składnikiem żywności, zapewniającym unikalne właściwości technologiczne. Ma neutralny smak, jest bezbarwna i przez to \w minimalnym stopniu wpływa na cechy organoleptyczne produktu. Wysoka rozpuszczalność inuliny umożliwia jej zastosowanie w produktach mlecznych jako zamiennika tłuszczu. Badania wykazały, że inulina może działać jako prebiotyk, wpływając na metabolizm lipidów i zmniejszając ryzyko osteoporozy poprzez zwiększenie wchłaniania wapnia (Nair i in., 2010).

Według Broadbenta i in. (2001) jedną z najważniejszych strategii poprawy właściwości serów o obniżonej zawartości tłuszczu jest zwiększenie udziału wody na tyle, jej stosunek do białka był równy lub wyższa niż w serach pełnotłustych.
Koca i Metin (2004) zaobserwowali efekt zmniejszenia twardości sera niskotłuszczowego po dodaniu 5 g/100 g inuliny. Można to tłumaczyć zarówno większym stosunkiem wody do białka oraz zwiększeniem objętości wypełniacza, co powoduje rozluźnienie matrycy białkowej.

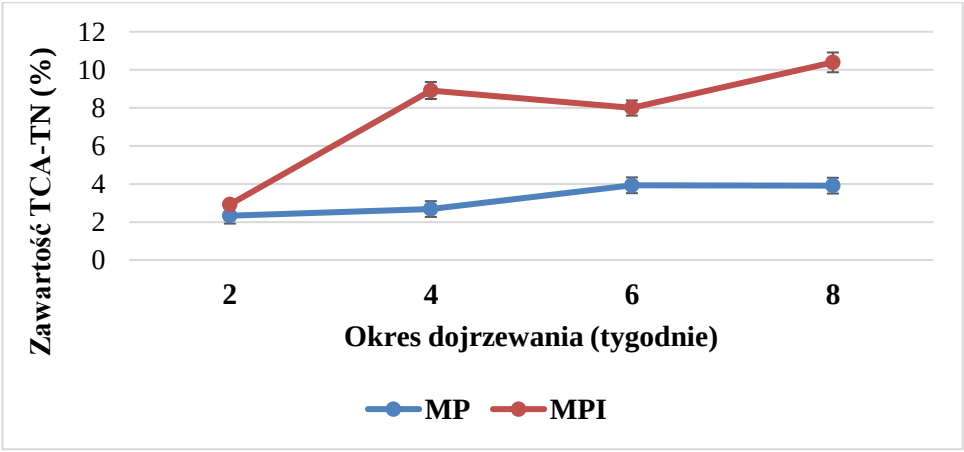
5.2.2. Ocena stopnia rozkładu białek w serach

Stwierdzono różnice ($P \leq 0,05$) w stopniu rozkładu białek w badanych serach. Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny charakteryzował się wyższą ($P \leq 0,05$) zawartością związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie jako procent azotu ogółem w porównaniu do serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i sera kontrolnego (Rys. 18, Tab. 19). Wraz z postępem czasu dojrzewania wartość WSN-TN dla serów MP i MPI wzrastała (Rys. 18).

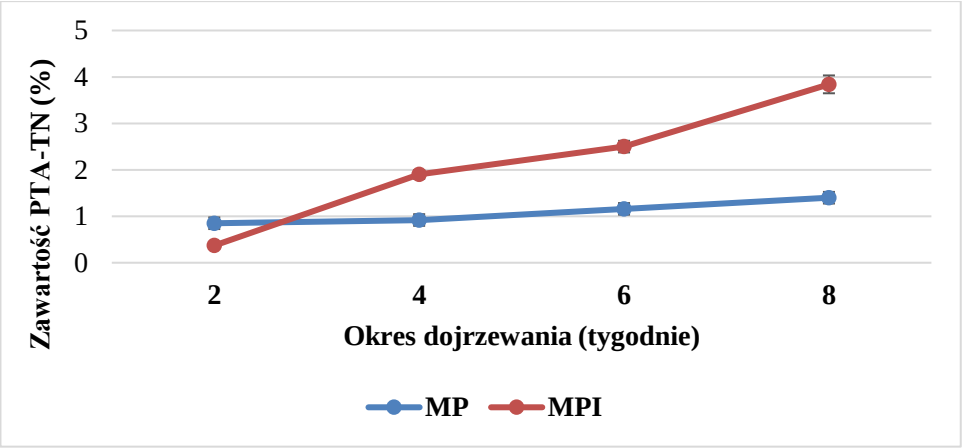


Rysunek 18. Zmiany zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (WSN-TN) w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Najwyższą procentową zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (10,39%) oraz w 5% PTA (3,84%) stwierdzono w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny w 8 tyg. badań (MPI-8) (Rys. 19-20, Tab. 19). Sery z dodatkiem mikropartykulowanych białek serwatkowych (MP) wykazywały niższą ($P \leq 0,05$) zawartość związków TCA-TN niż w serze MPI w całym okresie dojrzewania (Rys. 19-20, Tab. 19). Podobną zależność obserwowano w odniesieniu do związków azotowych PTA-TN z wyjątkiem wartości oznaczonych w 2 tyg. badania (Rys. 20, Tab. 19)



Rysunek 19. Zmiany zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (TCA-TN) w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne



Rysunek 20. Zmiany zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolfromowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (PTA-TN) w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Zazwyczaj w serach o wyższej zawartości tłuszczu degradacja kazeiny ma większy zakres niż w serach niskotłuszczowych ze względu na mniejszy udział białka w serach pełnotłustych. Według Fenelon i Guinee (2000) zmniejszenie zawartości tłuszczu w serach niskotłuszczowych Cheddar miało wpływ na wzrost stężenia kazeiny co mogło mieć wpływ na ograniczenie stopnia rozkładu białek.

Jednym z powodów spowolnienia proteolizy w serze niskotłuszczowym może być wyższa kwasowość oraz niższa temperatura dogrzewania co przyczynia się do mniejszej retencji podpuszczki do sera i niższej aktywności plazminy. W badaniach Rudan i in. (1999) zmniejszenie zakresu proteolizy do poziomu nie przekraczającego 15% pozwoliło zachować odpowiednią topliwość oraz funkcjonalność sera Mozzarella.

Wyższy poziom proteolizy w serach z dodatkiem inuliny może wynikać z wpływu tego oligosacharydu na przeżywalność drobnoustrojów. Stwierdzono, że przeżywalność *Lactobacillus* i *Bifidobacterium* w lodach o właściwościach symbiotycznych była wyższa w przypadku zastosowania inuliny (Szosland-Fołtyn, 2008). Jednoznaczne określenie dlaczego poziom proteolizy w serach z inuliną był wyższy niż w przypadku serów z dodatkiem tylko mikropartykułowanych białek serwatkowych czy sera kontrolnego wymaga dalszych badań.

Nelson i Barbano (2005) stwierdzili, że usunięcie 95% białek serwatkowych, głównie β-laktoglobuliny i α-laktoglobuliny, z mleka odtłuszczonego przed standaryzacją śmietanką w procesie produkcji sera Cheddar wpłynęło znacząco na proteolizę sera. Białka serwatkowe, w szczególności β-laktoglobulina, α-laktoalbumina

i immunoglobuliny, ograniczają proteolizę serów wytwarzanych metodą ultrafiltracji. Wyższa zawartość białka serwatkowego uzyskiwana w tym procesie, ma wpływ na wyższy wydatek sera, ale z drugiej strony niższy stopień proteolizy towarzyszący wyższej retencji białek serwatkowych pogarsza smak sera Cheddar (Nelson i Barbano, 2005).

W tej pracy nie stwierdzono jednak wyższego stopnia degradacji związków azotowych w serze kontrolnym, do którego nie dodano białek serwatkowych.

Schenkel i in. (2013) zaobserwowali, że sery ze zintegrowanymi cząsteczkami Simplesse (mikropartykułowane białka serwatkowe) wykazały nieco wyższy rozkład proteolityczny w porównaniu z partiami kontrolnymi na początku dojrzewania, a od 8 tygodnia trend ten został odwrócony. Niemniej, w badaniach tych wykazano, że WSN jako wskaźnik dla rozpadu sieci para-kazeiny nie był znaczący między serami z SM i odpowiadającymi im serami kontrolnymi w różnych okresach dojrzewania (4, 8 i 16 tygodni). Niższy stosunek resztkowej podpuszczki do poziomu białka w serach o niższej zawartości tłuszczu, może wyjaśniać niższe wskaźniki proteolityczne w tych serach (Fenelon i Guinee, 2000).

Rozwój cech sensorycznych w większości serów zachodzi w wyniku zmian biochemicznych zachodzących w czasie dojrzewania. Duża różnorodność lotnych związków, które odpowiadają za typowy aromat sera powstaje w wyniku metabolizmu jego głównych składników w wyniku glikolizy, metabolizmu cytrynianów, lipolizy i katabolizmu wolnych kwasów tłuszczowych i wolnych aminokwasów (Fox, McSweeney, Cogan i Guinee, 2004).

Tabela 19. Średnia (n=3) zawartość związków azotowych: WSN-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), TCA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), PTA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolfromowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania

Rodzaj sera	Okres dojrzewania (tygodnie)	WSN-TN	TCA-TN	PTA-TN
		%		
MP-2	2	$4,41^{c}\pm0,17$	$2,33^{c}\pm0,34$	$0,85^{c}\pm0,07$
MP-4	4	$4,72^{c}\pm0,35$	$2,68^{c}\pm0,08$	$0,92^{c}\pm0,03$
MP-6	6	$6,10^{c}\pm0,40$	$3,93^{c}\pm0,14$	$1,16^{c}\pm0,17$
MP-8	8	$6,53^{c}\pm0,06$	$3,91^{c}\pm0,30$	$1,40^{c}\pm0,14$
MPI-2	2	$5,47^{c}\pm0,24$	$2,92^{c}\pm0,05$	$0,37^{c}\pm0,14$
MPI-4	4	$12,40^{b}\pm0,58$	$8,91^{b}\pm0,18$	$1,90^{b}\pm0,38$
MPI-6	6	$23,43^{a}\pm3,50$	$7,99^{b}\pm0,12$	$2,50^{b}\pm0,11$
MPI-8	8	$22,72^{a}\pm2,91$	$10,39^{a}\pm0,37$	$3,84^{a}\pm0,30$
SK	8	$10,85^{b}\pm0,59$	$7,37^{b}\pm0,08$	$2,13^{b}\pm0,02$

[a-c] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P\leq0,05$)
Źródło: badania własne

5.2.3. Profil kwasów tłuszczowych

Podczas dojrzewania sera kwasy tłuszczowe są uwalniane głównie w wyniku lipolizy tłuszczu mlecznego. Proces ten znacząco wpływa na profil smakowo-zapachowy produktu końcowego (Di Cagno i in., 2014).

Profil kwasów tłuszczowych serów ze stosowanymi w badaniach dodatkami był zbliżony do profilu kwasów tłuszczowych sera kontrolnego. W badanych serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych oraz z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną określono podobnie jak w serze kontrolnym, zawartość kwasów nasyconych krótko- i średniołańcuchowych, wśród których dominował kwas masłowy C4:0, kwas kaprynowy C10:0 oraz kwas laurynowy C12:0 (Tab. 20). Kwasy te maja istotny udział w kształtowaniu cech smakowo-zapachowych sera, a także uznawane są za pożądane składniki prozdrowotne serów (Rutkowska i in., 2015).

Tabela 20. Profil kwasów tłuszczowych serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz sera kontrolnego (SK) po 8 tygodniach dojrzewania

Symbol kwasu tłuszczowego		**Rodzaj sera**		
		MP	**MPI**	**SK**
C4:0	%	2,19^{a}	2,09^{a}	1,78^{b}
C6:0	%	1,74^{b}	1,61^{b}	1,96^{a}
C8:0	%	1,11^{b}	1,05^{b}	1,32^{a}
C10:0	%	2,63^{b}	2,47^{b}	3,07^{a}
C11:0	%	0,06^{a}	0,05^{a}	0,06^{a}
C12:0	%	3,29^{b}	3,06^{b}	3,90^{a}
C13:0	%	0,06^{b}	0,08^{b}	0,13^{a}
Suma C4:0-C13:0	%	**11,08^{b}**	**10,41^{b}**	**12,74^{a}**
C14:0	%	11,09^{b}	10,18^{b}	12,99^{a}
C14:1	%	1,06^{a}	0,98^{b}	1,27^{a}
C15:0	%	0,78^{a}	0,80^{a}	0,81^{a}
C15:1	%	31,65^{b}	29,08^{b}	39,08^{a}
C16:0	%	0,80^{a}	0,01^{b}	0,01^{b}
C 16:1	%	1,73^{a}	1,66^{b}	1,81^{a}
C17:0	%	0,52^{a}	0,12^{c}	0,21^{b}
C17:1	%	0,18^{b}	0,24^{a}	0,18^{b}
C18:0	%	9,26^{b}	8,34^{b}	10,20^{a}
Suma C14:0-C18:0	%	**64,27^{a}**	**51,40^{b}**	**66,55^{a}**
C18:1 trans 9	%	15,47^{a}	14,77^{b}	14,81^{b}
C 18:1 cis 9	%	0,37^{a}	0,38^{a}	0,31^{a}

$^{a-c}$ Wartości średnie w tym samym wierszu różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

Stwierdzono różnice ($P \leq 0,05$) w zawartości kwasów nasyconych krótkołańcuchowych i średniołańcuchowych. Najwyższą zawartość kwasów od C4:0 do C13:0 stwierdzono w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych 11,08%, a najniższą w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną 10,41%. Suma kwasów od C4:0 do C13:0 w serze kontrolnym była wyższa i wynosiła 12,74% (Tab. 20).

Stwierdzono istotne ($P \leq 0,05$) różnice w zawartości kwasów od C14:0 do C18:0 w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (64,27%), z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (51,40%) oraz sera kontrolnego (66,55%) (Tab. 20).

Domingos i in. (2019) w badaniach nad serem Prato z dodatkiem 0,5% koncentratu białek serwatkowych, stwierdzili niższe stężenie związków lotnych oraz kwasów tłuszczowych w serze z dodatkiem koncentratu białek serwatkowych w porównaniu z serem kontrolnym. Krishna i Ghosh (2019) podają, że fermentacja inuliny może stymulować tworzenie krótkołańcuchowych kwasów organicznych takich jak kwas masłowy.

Badania niskotłuszczowego sera Caciotta z dodatkiem 0,5% koncentratu białek serwatkowych prowadzone przez Di Cagano i in. (2014) wykazały, że zawartość krótko- i średniołańcuchowych kwasów tłuszczowych w serze niskotłuszczowym była niższa niż w serze pełnotłustym. Przyczyną mógł być łagodniejszy przebieg lipolizy zachodzący w tych serach.

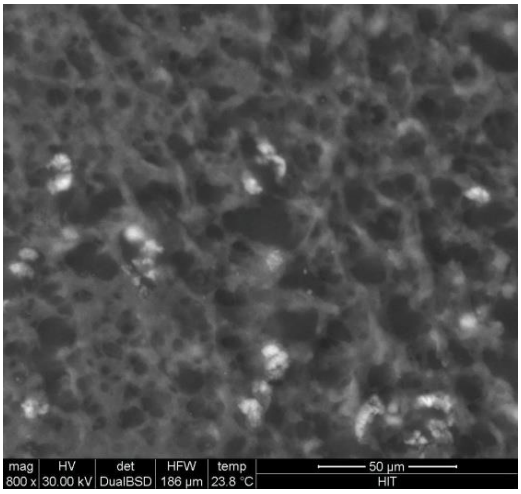
5.2.4. Mikrostruktura serów wraz z analizą fraktalną

Usunięcie tłuszczu z matrycy kazeinowej powoduje powstanie znacznie ściślejszej sieci parakazeinowej, co skutkuje wzrostem lepkości masy serowej. Zabieg ten może powodować problemy podczas rozdrabniania, a zapobiegać temu można zmieniając skład matrycy sera poprzez dodatek zamienników tłuszczu (Urgu i in., 2019).

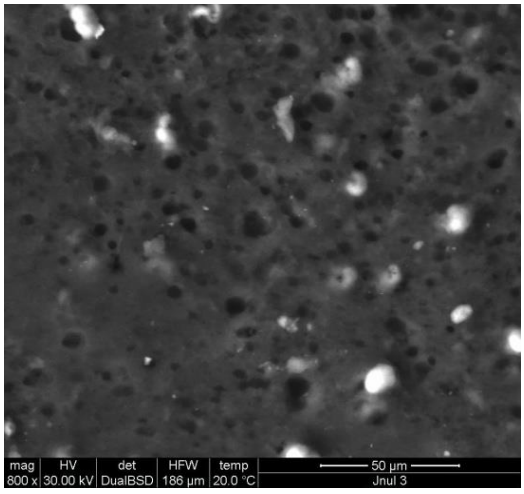
Wykonane zdjęcia mikrostruktury serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną uwidoczniły sieć strukturalną połączonych ze sobą micel kazeinowych, w których zamknięte są kuleczki tłuszczowe, woda oraz składniki mineralne (Fot. 8-10). Nieregularność na powierzchni badanych serów, może być spowodowana dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych, które

upodabniają mikrostrukturę sera o obniżonej zawartości tłuszczu do pełnotłustych odpowiedników (Urgu i in., 2019).

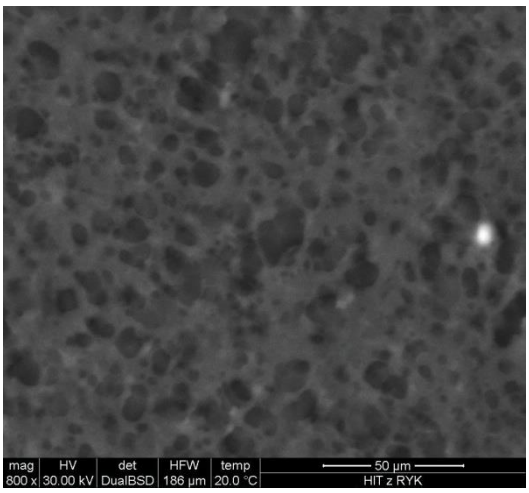
Fotografia mikrostruktury sera kontrolnego SK, o wyższej zawartość tłuszczu niż w MP i MPI, charakteryzuje się bardziej przestrzennym rozmieszczeniem kuleczek tłuszczowych i obrazuje zwartą strukturę sera. Kuleczki tłuszczowe występują jako gładkie puste przestrzenie w jednorodnej macierzy białkowej, a Liu i in. (2008) podaje, że wyższa zawartość tłuszczu ma odzwierciedlenie w zwartości struktury oraz większej zwięzłości sera.



Fot. 8. Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP)



Fot. 9. Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI)



Fot. 10. Ser kontrolny (SK)

Fotografia 8-10. Mikrofotografie serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) (powiększenie 800x, napięcie 20.00 kV)
Źródło: badania własne

Najniższą wartość wymiaru fraktalnego 1,2 uzyskano dla sera kontrolnego SK, co wynika z najsłabiej rozwiniętej linii brzegowej porów w tym serze i świadczy o gładkiej i regularnej ich powierzchni w tych serach (Tab. 21). Sery z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez (MP) inuliny charakteryzowały się wyższymi wartościami wymiaru fraktalnego (Tab. 21), co wskazuje na większą powierzchnię porów i większą porowatość tych serów w porównaniu z próbką kontrolną. Sery MP i MPI charakteryzowały się niższą zawartością tłuszczu w stosunku do próbki SK (Tab. 17).

Tabela 21. Wyniki analizy fraktalnej serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz sera kontrolnego (SK) po 8 tygodniach dojrzewania

Rodzaj sera	Wymiar fraktalny D_L	Współczynnik determinacji R^2
MP-8	1,503[a]	0,970[a]
MPI-8	1,554[a]	0,894[a]
SK-8	1,200[b]	0,920[a]

[a-c] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

Badania mikrostruktury Sera Cheddar i sera Mozzarella o obniżonej zawartości tłuszczu wykazały, że białka serwatkowe w mikrocząstkach zachowują się jak wypełniacz w matrycy sera (Mackey i Desai, 1995, Stankey i in., 2017).

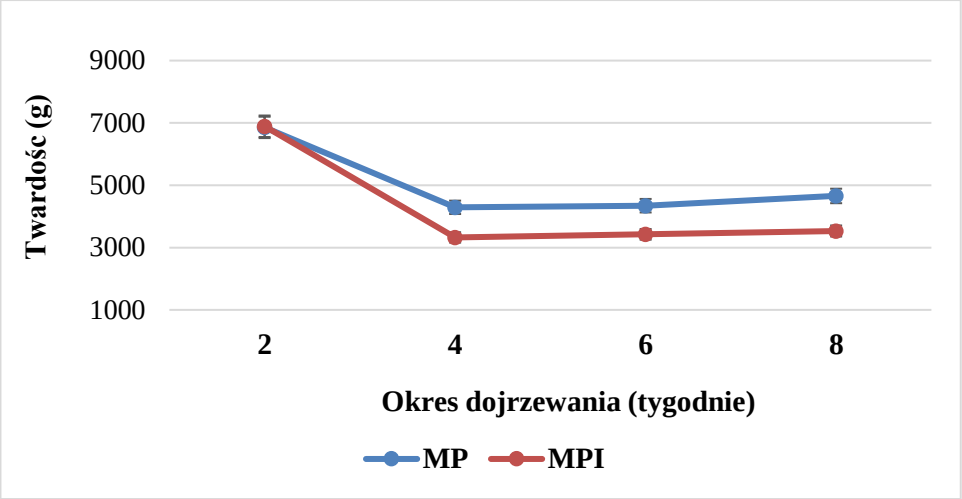
Badania mikrostruktury niskotłuszczowego sera Mozzarella przeprowadzone przez Moghiseh i in. (2021), wykazały, że dodatek 6% inuliny i 0,1% roztworu kefiranu podczas produkcji sera, przyczynił się do uzyskania bardziej upakowanej sieci białkowej i nienaruszonej kazeiny (Moghiseh i in., 2021).

Smoczyński (2020) badał mikrostrukturę próbek mleka odtłuszczone w proszku o zawartości tłuszczu 0,26%, białka 2,96%, laktozy 4,24% i suchej masy 8,24% otrzymywanych przy różnej temperaturze suszenia: 140, 150 i 160°C. Badania wykazały, że na mikrostrukturę proszków mlecznych istotny wpływ ma skład chemiczny ich powierzchni. Kształt cząstek proszku był zbliżony do kulistego ale nieregularny, a na ich powierzchni można było zaobserwować liczne wgłębienia. Wymiar fraktalny, wyznaczony z zależności od obwodu i pola powierzchni cząstki, wskazywał na stopień rozwinięcia powierzchni analizowanych cząstek i pozwalał na dokładne i bezstronne porównanie mikrostruktur cząstek uzyskanych w różnych temperaturach suszenia.

5.2.5. Analiza profilu tekstury

Niskotłuszczowe odmiany sera najczęściej wykazują niewystarczający rozkład kazeiny, zwłaszcza frakcji α_{s1} i zawierają wysoki poziom wapnia, co prowadzi do stosunkowo twardej tekstury (Di Cagano i in., 2014).

Stwierdzono istotne różnice ($P \leq 0,05$) w parametrach tekstury badanych serów. Najwyższą twardością charakteryzowały się próbki sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI-2) (6855,85 g) oraz sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP-2) (6891,93 g) w 2 tygodniu badań (Tab. 22). Wraz z postępem czasu dojrzewania twardość tych serów zmniejszała się (Rys. 21), prawdopodobnie z powodu rozkładu α_{s1}-kazeiny na peptydy o niższej masie cząsteczkowej w serze i uwodnienia matrycy białkowej. Istotne ($P \leq 0,05$) zmiany w twardości serów MP i MPI wystąpiły między 2 a 4 tygodniem dojrzewania. Wykazano istotny ($P \leq 0,01$) wpływ czasu dojrzewania i dodatku inuliny na parametry tekstury (Tab. 23).

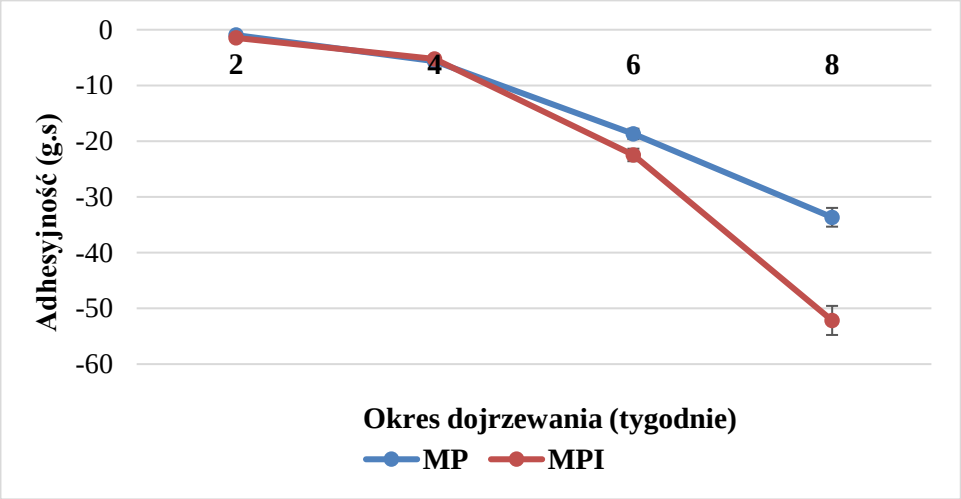


Rysunek 21. Zmiany twardości w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Im mniej tłuszczu jest obecne w żelu, takim jak ser, tym większa objętość jest zajmowana przez białko. Reakcja wywołana ściskaniem (podobnie jak w teście TPA) jest zdominowana przez fazę białkową, w tym silne interakcje między molekułami kazeiny (Lucey i in., 2003). Kuleczki tłuszczu zostały opisane jako słabe punkty w strukturze inicjujące pękanie i zmniejszające jędrność (Rogers i in., 2009). W wyniku zastąpienia

tłuszczu przez mikropartykułowane białka serwatkowe działają one jako słabe punkty, obniżając twardość. Mikropartykułowane białka serwatkowe, zachowujące się jak obojętny wypełniacz w matrycy para-kazeiny (CN), przypuszczalnie przerywają ciągłość sieci para-CN i tworzą słabe punkty w matrycy, a tym samym zmniejszają twardość sera (Fenelon i Guinee, 1997). Schenkel i in. (2011) stwierdzili również zmniejszenie twardości serów (na podstawie analizy profilu tekstury po 30 dniach) w miarę wzrostu stężenia mikropartykułowanych białek serwatkowych.

Najwyższą adhezyjność wykazywał sery z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych MP oraz MPI z dodatkowym udziałem inuliny w 2 tygodniu badań (odpowiednio: -0,96 g·s i -1.47 g·s) (Rys. 21, Tab. 22). Nie stwierdzono różnic w adhezyjności dla serów MP, MPI i SK po 8 tygodniach dojrzewania (Rys. 22, Tab. 22). Parametry adhezyjności charakteryzują właściwości powierzchniowe serów (Surówka, 2002). Czas i dodatek inuliny stanowiły istotne ($P \leq 0{,}01$) czynniki determinujące adhezyjność serów (Tab. 23).

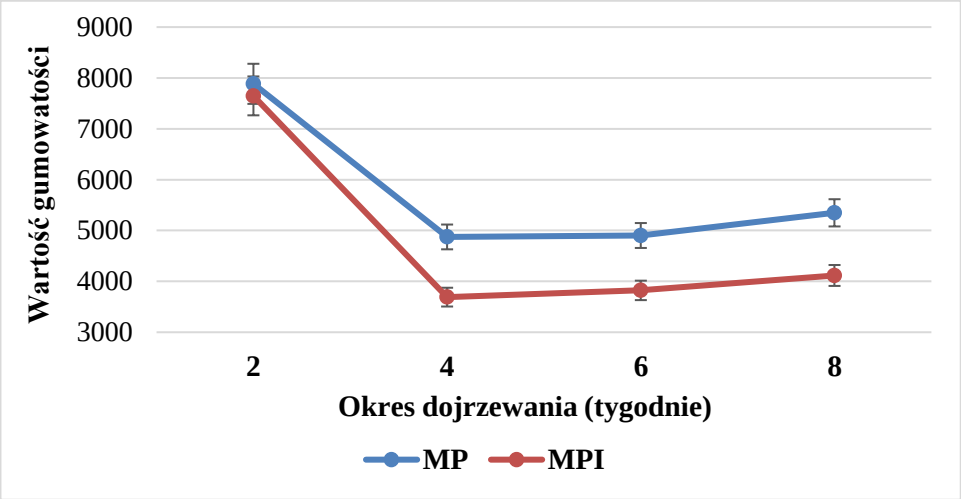


Rysunek 22. Zmiany adhezyjności w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

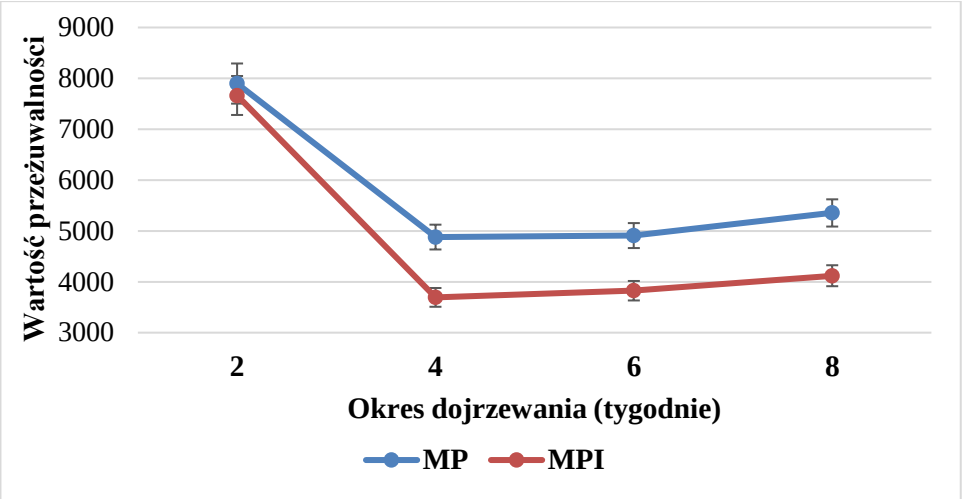
Sprężystość lub elastyczność to stopień regeneracji zdeformowanego kawałka sera pod wpływem działania siły odkształcającej (Fox i in., 2000). Nie stwierdzono różnic w sprężystości serów, wszystkie osiągnęły wartość równą 1,0 (Tab. 22). Spójność to stopień, w jakim może być ser zdeformowany przed pęknięciem lub stosunek powierzchni do sekundy kompresji do tej przy pierwszej kompresji (Fox i in., 2000). Spoistość serów kształtowała się w zakresie od 0,82 do 1,17 (Tab. 22). Zarówno czas

dojrzewania jak i dodatek inuliny nie wpływały (P>0,05) na sprężystość i spoistość badanych serów (Tab. 23).

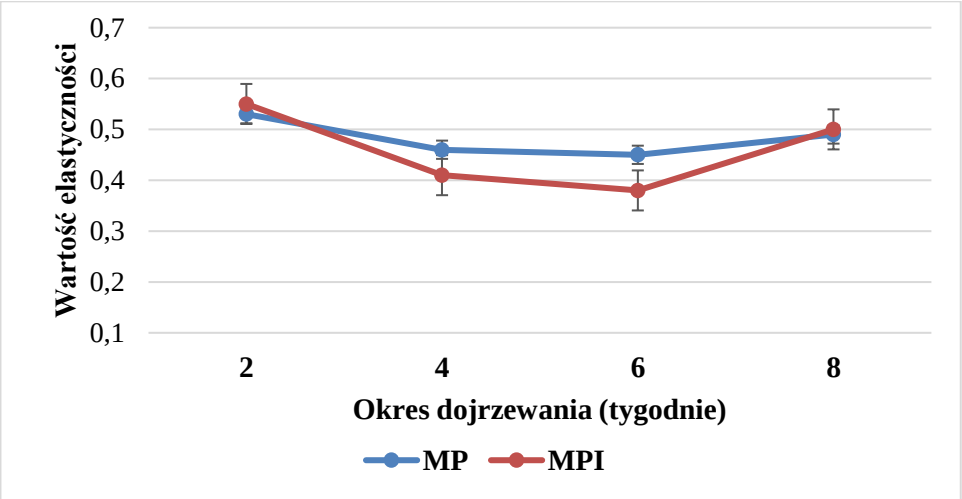
Gumowość definiuje się jako energię potrzebną do rozdrobnienia kawałka sera do stanu gotowego do połknięcia (Kahyaoglu i in., 2005). Najwyższą gumowatością, przeżuwalnością i elastycznością charakteryzował się ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP-2) oraz ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI-2) po 2 tygodniach dojrzewania (Rys. 23-25, Tab. 22). Wraz z upływem czasu dojrzewania wartości tych parametrów tekstury ulegały zmniejszeniu. W odniesieniu do gumowatości, przeżuwalności i elastyczności analizowanych serów wpływ czasu, dodatku inuliny i interakcji tych parametrów był istotny (P≤0,01) (Tab. 23).



Rysunek 23. Zmiany gumowatości w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne



Rysunek 24. Zmiany przeżuwalności w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne



Rysunek 25. Zmiany elastyczności w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Tabela 22. Średnie (n=3) wartości parametrów tekstury TPA w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania

Rodzaj sera	Okres dojrzewania (tygodnie)	Parametr tekstury						
		Twardość	Adhezyjność	Sprężystość	Spoistość	Gumowatość	Przeżuwalność	Elastyczność
		g	g.s					
MP-2	2	6855,85^{a}±116,92	-0,96^{a}±0,02	1,00^{a}±0,01	1,15^{a}±0,01	7884,50^{a}±159,96	7897,69^{a}±163,95	0,53^{a}±0,02
MP-4	4	4290,92^{b}±14,09	-5,63^{b}±0,02	1,00^{a}±0,01	0,82^{b}±0,57	4874,45^{c}±164,98	4879,33^{c}±165,15	0,46^{b}±0,07
MP-6	6	4343,14^{b}±40,01	-18,69^{c}±0,60	1,00^{a}±0,01	1,17^{a}±0,07	4902,24^{c}±86,43	4908,81^{c}±89,40	0,45^{b}±0,04
MP-8	8	4656,14^{b}±40,39	-33,65^{c}±1,23	1,00^{a}±0,01	1,15^{a}±0,01	5348,34^{b}±46,11	5353,71^{b}±49,03	0,49^{b}±0,08
MPI-2	2	6891,93^{a}±52,51	-1,47^{a}±0,48	1,00^{a}±0,01	1,11^{a}±0,01	7647,76^{ab}±93,75	7663,17^{ab}±108,25	0,55^{a}±0,05
MPI-4	4	3325,22^{c}±45,60	-5,25^{b}±0,36	1,00^{a}±0,01	1,11^{a}±0,05	3690,81^{c}±179,67	3693,26^{c}±179,49	0,41^{b}±0,31
MPI-6	6	3423,72^{c}±10,95	-22,47^{c}±6,56	1,00^{a}±0,01	1,12^{a}±0,01	3823,19^{c}±31,01	3824,48^{c}±32,51	0,38^{c}±0,09
MPI-8	8	3531,57^{c}±38,64	-53,00^{c}±6,56	1,00 ^{a}±0,01	1,16^{a}±0,01	4116,58^{c}±44,66	4119,34^{c}±46,93	0,50^{a}±0,07
SK	8	5882,17^{b}±10,82	-52,16^{c}±3,13	1,00^{a}±0,01	1,14^{a}±0,03	6731,17^{b}±194,96	6733,40^{b}±191,92	0,42^{b}±0,04

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

Tabela 23. Dwu-czynnikowa analiza wariancji dla parametrów jakościowych serów produkowanych z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z lub bez inuliny poddanych dojrzewaniu przez okres 8 tygodni

	Czas		**Inulina**		**Czas: Inulina**	
df / Parametr	3		2		6	
	SS	P	SS	P	SS	P
Twardość	**39303520****	3,94E-24	**3315817****	8,32E-17	**1249911****	2,91E-12
Adhezyjność	**6470,431****	2,04E-14	**203,1413****	5,54E-05	**434,0348****	8,53E-06
Sprężystość	4,50E-06	0,236685	6,67E-07	0,416528	1,33E-06	0,711533
Spoistość	0,14387*	0,367076	0,015555	0,553614	0,115234	0,460878
Gumowatość	**49899835****	3,53E-19	**5220693****	1,11E-12	**987281****	3,00E-06
Przeżuwalność	**50211349****	4,95E-19	**5243370****	1,56E-12	**998442,9****	3,83E-06
Elastyczność	**0,0578****	4,77E-16	**0,0026****	3,68E-07	**0,010255****	3,27E-10

df – stopnie swobody
SS – suma kwadratów
*****$P \leq 0,05$
**$P \leq 0,01$
Źródło: badania własne

Badania Moghiseh i in. (2021) dotyczące niskotłuszczowego sera Mozzarella wykazały, że zastosowanie dodatków w postaci inuliny i roztworu kefiranu, wpłynęło na obniżenie twardości, sprężystości i spoistości badanego sera.

Wpływ inuliny jako zamiennika tłuszczu na jakość sera owczego Frescal badał Borges i in. (2019). Badano ser kontrolny z mleka pełnego, ser półtłusty oraz ser półtłusty z zawartością inuliny w ilości 5 g/100 g sera. Stwierdzono, że dodatek inuliny w produkcji sera półtłustego, umożliwił uzyskanie wartości parametrów tekstury (twardość, adhezyjność, spoistość i gumowatość) zbliżonych do sera owczego pełnotłustego. Badacze stwierdzili, że dodatek inuliny umożliwia produkcję sera o niższej kaloryczności i korzystnych właściwościach sensorycznych cenionych przez konsumentów.

Zdolność inuliny do zatrzymywania wody powoduje, że ser staje się bardziej miękki i łatwiej się odkształca (Creamer i Olson, 1982).

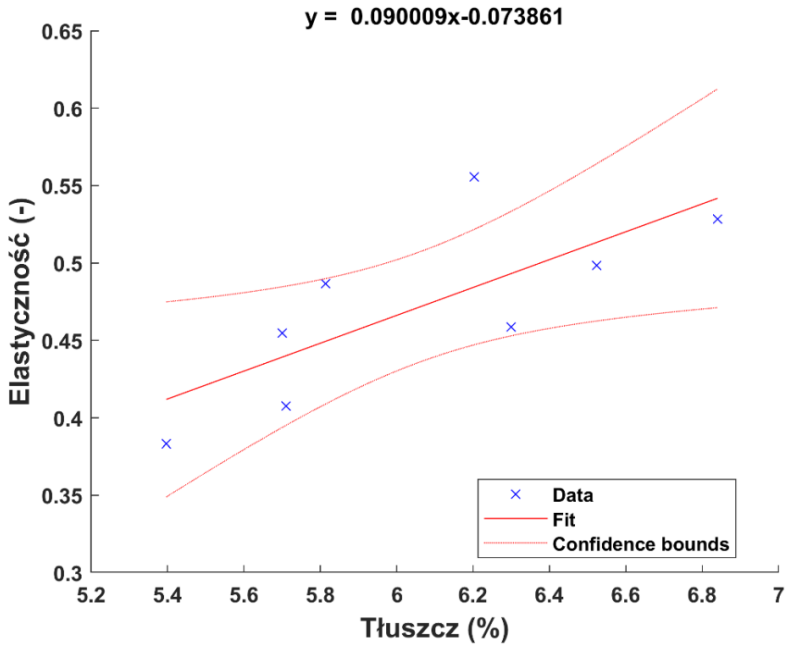
W badaniach Juan i in. (2013) stwierdzono, że sery z dodatkiem inuliny były bardziej podobne do serów pełnotłustych niż sery o obniżonej zawartości tłuszczu bez inuliny. Juan i in. (2013) badali trzy rodzaje serów: ser pełnotłusty (zawartość tłuszczu w mleku 3,5%), ser o obniżonej zawartości tłuszczu (zawartość tłuszczu w mleku 1,5%) oraz ser o obniżonej zawartości tłuszczu (zawartość tłuszczu w mleku 1,5%) z dodatkiem inuliny w ilości 5%. Badania wykazały wyższą zawartość białka w serze z dodatkiem inuliny w porównaniu z serem kontrolnym pełnotłustym. W serze niskotłuszczowym z dodatkiem inuliny zaobserwowano także poprawę parametrów tekstury, głównie mniejszą twardość i większą ich elastyczność serów, co było efektem zastosowania inuliny.

Podobne wyniki badań otrzymał także Koca i Metin (2004) badając ser Kashar, produkowany z dodatkiem białkowego zamiennika tłuszczu w ilości 1% oraz zamiennika na bazie węglowodanów w ilości 5%. Autorzy stwierdzili, że dodatek zamienników tłuszczu zmniejszył twardość, sprężystość i gumowatość badanego sera oraz poprawił jego cechy sensoryczne. Ten efekt zmiękczający można przypisać zarówno wyższemu stosunkowi wody do białka jak i zwiększeniu objętości wypełniacza w matrycy białkowej sera oraz udziału w niej białka (Koca i Metin, 2004).

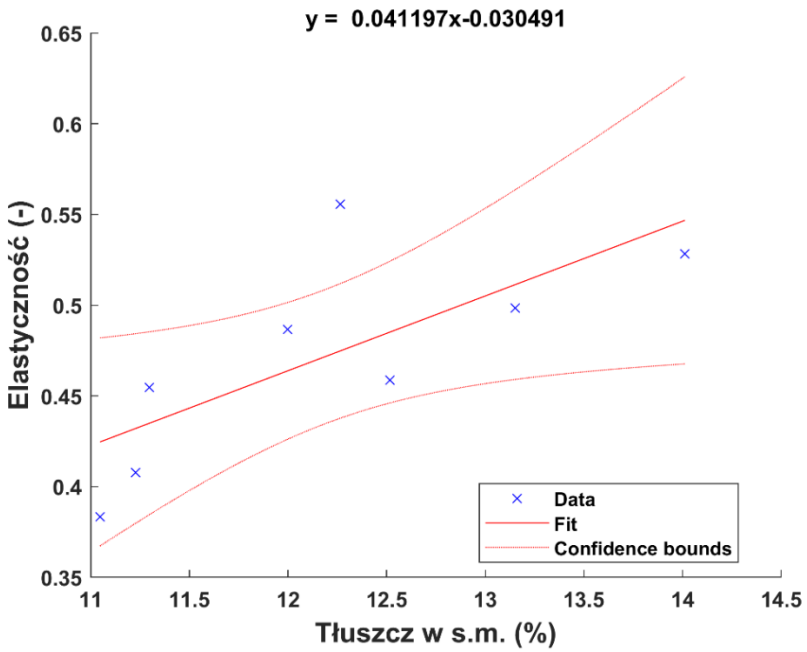
Substancje zastępujące tłuszcz stosowane w tym badaniu były związkami rozpuszczalnymi w wodzie, a po dodaniu do mleka serowarskiego woda jest wiązana w serze ze względu na ich polarny charakter. Woda odgrywa rolę plastyfikatora między cząsteczkami białka, dzięki czemu ser jest bardziej miękki (Drake i Swanson, 1995).

Obecność inuliny w serze wyprodukowanym z odtłuszczonego mleka przyczynia się do otrzymania właściwości tekstury jak w serze pełnotłustym. Dla konsumentów jest to ważne, ponieważ tłuszcz odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu tekstury sera. Cząsteczki inuliny i kuleczki tłuszczu mają zbliżone właściwości funkcjonalne i są rozproszone między micelami kazeiny. Takie zachowanie powoduje zakłócenia w tworzeniu sztywnej matrycy białkowej. W rezultacie powstaje bardziej miękki żel (Paseephol i in., 2008). Z kolei sery odtłuszczone mają zwartą matrycę białkową z mniejszą liczbą przestrzeni, a zatem są twardsze (Brennan i Tudorica, 2008). Inulina ma zdolność do tworzenia mikrokryształów, które oddziałują ze sobą i pochłaniają dużą ilość wody, tworząc delikatną teksturę imitującą właściwości tłuszczu mlecznego (Brennan i Tudorica, 2008).

W niniejszych badaniach stwierdzono silną ($P \leq 0{,}05$) korelację między zawartością tłuszczu i zawartością tłuszczu w suchej masie a elastycznością (Rys. 26, Rys. 27, Tab. 24) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z i bez dodatku inuliny.



Rysunek 26. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu (%) a elastycznością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI)
Źródło: badania własne



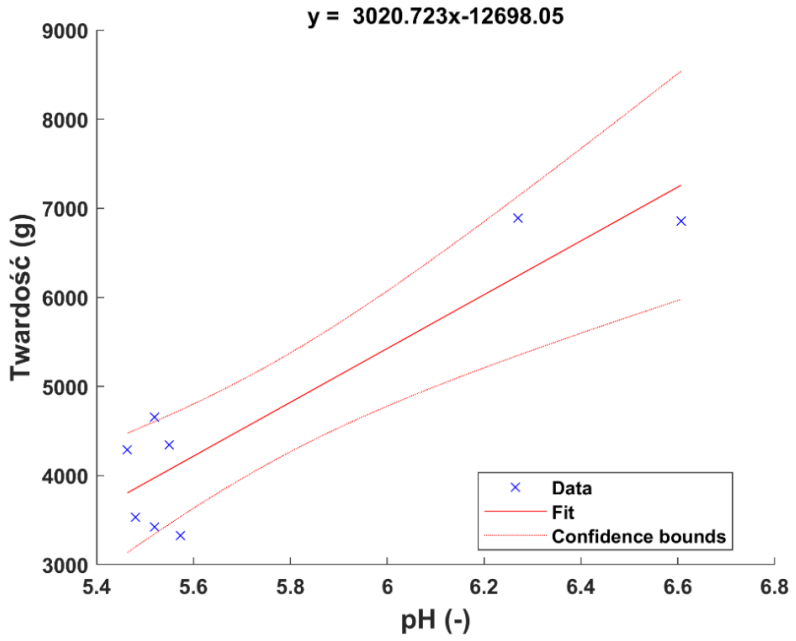
Rysunek 27. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a elastycznością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI)
Źródło: badania własne

Stwierdzono słabą ($P \leq 0{,}01$) korelację między wartością pH a twardością, gumowatością i przeżuwalnością serów (Tab. 24). Rozkład wartości w modelu zależności liniowej (Rys. 28-30) nie daje jednak solidnych podstaw do uwzględnienia tej korelacji.

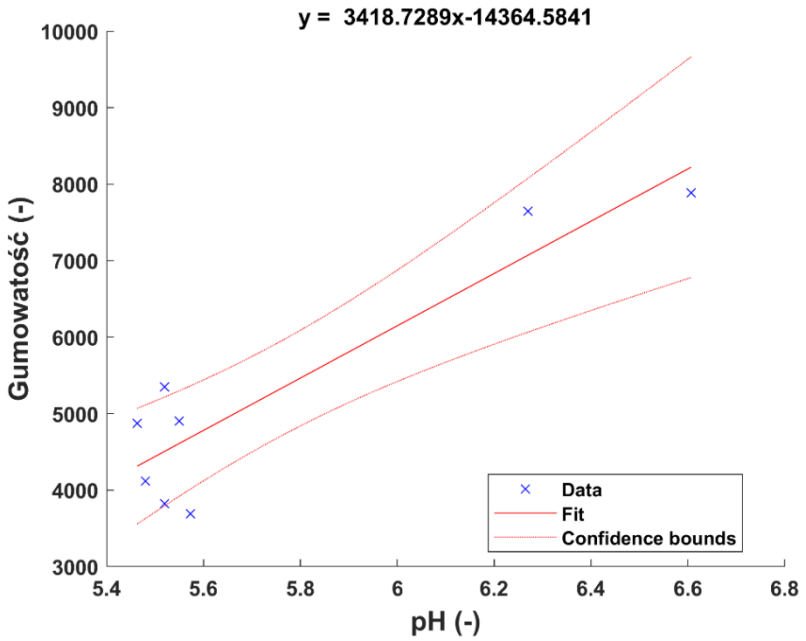
Tabela 24. Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami, parametrami fizykochemicznymi, wskaźnikami proteolizy a parametrami tekstury serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK)

Parametr	Twardość	Adhezyjność	Sprężystość	Spoistość	Gumowatość	Przeżuwalność	Elastyczność
Woda	0,0889	-0,3493	-0,1980	0,2976	0,1259	0,1253	0,0482
Tłuszcz	0,5741	0,6271	0,5003	-0,1265	0,6070	0,6068	**0,7542***
Tłuszcz w s.m.	0,5706	0,5275	0,4376	-0,0495	0,6103	0,6100	**0,7314***
Białko	-0,4299	0,3783	-0,3670	0,0362	-0,4381	-0,4380	-0,4294
Białko w s.m	-0,4393	0,3218	-0,4445	0,1158	-0,4385	-0,4386	-0,4479
NaCl	-0,3426	-0,1559	-0,2170	0,0905	-0,3665	-0,3663	-0,1246
S/M	-0,3402	-0,0968	-0,1777	0,0489	-0,3690	-0,3687	-0,1252
pH	**-0,2263****	-0,1678	-0,1179	-0,3261	**-0,2079****	**-0,2081****	-0,1150
Aktywność wody	-0,2749	-0,2591	-0,1601	-0,0034	-0,2611	-0,2613	-0,0918
WSN-TN	0,2360	-0,1627	-0,0539	0,2489	0,2796	0,2790	0,2444
TCA-TN	0,5706	0,5275	0,4376	-0,0495	0,6103	0,6100	**0,7314***
PTA-TN	-0,1460	-0,2661	0,0289	0,0538	-0,1322	-0,1322	-0,0630

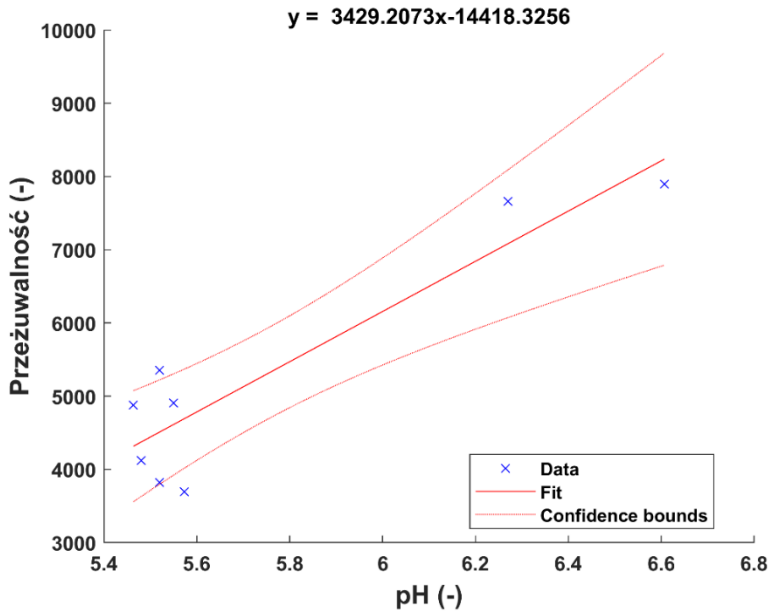
*P≤0,05
**P≤0,01
s.m. - sucha masa
S/M - zawartość soli w fazie wodnej sera
WSN-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
TCA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
PTA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
Źródło: badania własne



Rysunek 28. Model zależności liniowej między zawartością pH (-) a twardością (g) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI)
Źródło: badania własne



Rysunek 29. Model zależności liniowej między zawartością pH (-) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI)
Źródło: badania własne



Rysunek 30. Model zależności liniowej między zawartością pH (-) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI)
Źródło: badania własne

Wyniki badań Stankey i in. (2017) podkreślają rolę mikropartykułowanych białek serwatkowych jako obojętnego wypełniacza matrycy serowej, poprawiającego wydajność sera, który również ma wpływ na bardziej miękką teksturę bez pogarszania sensorycznej jakości sera.

5.2.6. Analiza sensoryczna tekstury

Stwierdzono istotne różnice ($P \leq 0,05$) w wynikach analizy sensorycznej serów o obniżonej zawartości tłuszczu (Tab. 25). Największą twardością wyznaczoną dotykiem ręką charakteryzował się ser (MPI) z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną - 5,0 pkt oraz ser z dodatkiem mikropratykułowanych białek (MP) - 4,9 pkt, a najmniejszą twardością charakteryzował się ser kontrolny 4,2 pkt (Tab. 25).

Najwyższą wartością sprężystości określoną metodą dotyku ręką charakteryzował się ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych oraz ser kontrolny (5,5 pkt), a najniższą ($P \leq 0,05$) ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną 3,5 pkt (Tab. 25).

Najszybszym tempem odkształcenia charakteryzował się ser kontrolny (5,5 pkt) (Tab. 25), który zawierał najwięcej tłuszczu (Tab. 17).

Największą twardością określoną metodą pierwszego kęsa charakteryzował się ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych oraz ser kontrolny (4,2 pkt) Najmniejszą ($P \leq 0,05$) twardość wykazywał ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (Tab. 25). Podobne zależności stwierdzono analizując twardość testem TPA (Tab. 23).

Nie stwierdzono różnic wartości ($P > 0,05$) przeżuwalności, spoistości i adhezyjności określanych metodą pierwszego kęsa pomiędzy analizowanymi serami (Tab. 25).

Dodatek inuliny wpłynął negatywnie ($P \leq 0,05$) na gładkość próby po żuciu (Tab. 25). Zarówno dodatek mikropartykułowanych białek serwatkowych jak i inuliny wpłynęły niekorzystnie ($P \leq 0,05$) na wartości pozostałości po żuciu (Tab. 25).

Badania niskotłuszczowego sera Kashar z dodatkiem 1% mikropartykułowanych białek serwatkowych oraz zamiennika węglowodanowego w ilości 5%, wykazały, że dodatki te mogą poprawić teksturę i właściwości sensoryczne badanego sera przy krótkotrwałym przechowywaniu do 60 dni (Koca i Metin, 2004).

Urgu i in. (2019) badali sery o obniżonej zawartości tłuszczu z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych o różnych stężeniach. Ich kluczowe właściwości porównano z serem kontrolnym pełnotłustym. Stwierdzono, że redukcja zawartości tłuszczu w serze jest kompensowana przez wzrost zawartości białka i wody a zawartość tłuszczu zmniejszała się wraz ze wzrostem ilości stosowanego dodatku mikropartykulatu. Badania przywołanych autorów pozwoliły na stwierdzenie, że zastosowanie białek serwatkowych w produkcji serów o obniżonej zawartości tłuszczu wpływa na poprawę właściwości reologicznych, teksturalnych i sensorycznych badanych serów.

Di Cagano i in. (2014) badali niskotłuszczowy ser Caciotta wytwarzany z mleka odtłuszczonego (zawartość tłuszczu ~0,3%) z dodatkiem 0,5% koncentratu białek serwatkowych. Analiza tekstury wykazała, że dodatek białek serwatkowych pozytywnie wpłynął na teksturę sera, zmniejszając jego twardość. Cechy sensoryczne w tym smak i zapach były zbliżone do wariantu sera pełnotłustego.

Stankey i in. (2017) badali ser Cheddar z dodatkiem 0,15%, 0,35% oraz 0,50% mikrocząsteczkowego białka serwatkowego (MWP). Badania wykazały, że dodatek białek serwatkowych poprawił parametry tekstury sera oraz właściwości sensoryczne

badanych serów. Wyniki tych autorów potwierdzają rolę białek serwatkowych jako wypełniacza w matrycy kazeinowej w poprawie parametrów tekstury, bez pogorszenia cech sensorycznych serów.

Badania prowadzone przez Amelia i in. (2013) dotyczące niskotłuszczowego sera Cheddar (zawartość tłuszczu 6%) wykazały, że redukcja tłuszczu przez dodatek koncentratu kazeiny i zastosowanie trzyetapowej ultrafiltracji, pozwala na uzyskanie sera niskotłuszczowego o zawartości białka na poziomie 28% i parametrach tekstury zbliżonych do sera pełnotłustego.

Juan i in. (2013) wykazali, że w serze niskotłuszczowym z dodatkiem inuliny zaobserwowano poprawę parametrów tekstury. Obecność inuliny modyfikuje strukturę sera niskotłuszczowego, co wpływa pozytywnie na wyniki oceny sensorycznej. Panel sensoryczny określił ser o obniżonej zawartości tłuszczu z inuliną jako bardziej akceptowalny niż jego odpowiednik bez inuliny. Badania tych autorów wykazały, że inulina może być z powodzeniem stosowana jako zamiennik tłuszczu w serach o obniżonej zawartości tłuszczu. Sery z inuliną charakteryzowały się cechami sensorycznymi bardziej zbliżonymi do serów pełnotłustych, dodatkowo sery zawierające 3% inuliny mogą stanowić żywność funkcjonalną o korzystnym działaniu zdrowotnym (Juan i in., 2013).

Zdolność inuliny jako zamiennika tłuszczu jest związana nie tylko z modyfikacją właściwości reologicznych czy też twardości produktu, ale także ze zmianami w innych atrybutach podczas żucia produktu, takich jak kremowość lub gładkość (Meyer i in., 2011). Gdy inulina jest dodawana do żywności w niskich stężeniach, właściwości reologiczne i jakość sensoryczna produktu nie ulegną znacznemu pogorszeniu ze względu na neutralny lub lekko słodki smak inuliny i jej ograniczony wpływ na lepkość (Kalyani i in., 2010). Uzyskanie produktu o niskiej zawartości tłuszczu i cechach reologicznych oraz twardości zbliżonej do produktów pełnotłustych, wymaga zastosowania wyższych stężeń inuliny aniżeli te, które wymagane są jedynie do naśladowania ich kremowości lub gładkości (Meyer i in., 2011).

Tabela 25. Średnie (n=10) wartości oceny sensorycznej serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz sera kontrolnego (SK) po 8 tygodniach dojrzewania

Rodzaj sera	Parametr tekstury								
	Twardość (dotyk ręką)	**Sprężystość (dotyk ręką)**	**Tempo odkształcania (dotyk ręką)**	**Twardość (pierwszy kęs)**	**Przeżuwalność (pierwszy kęs)**	**Spoistość (pierwszy kęs)**	**Adhezyjność (pierwszy kęs)**	**Gładkość próbki po żuciu**	**Pozostałość po żuciu**
Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych MP	4,9[a]	5,0[a]	4,9[b]	4,2[a]	4,5[a]	4,2[a]	4,2[a]	4,5[a]	3,5[b]
Ser z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną MPI	5,0[a]	3,5[b]	4,3[b]	3,5[b]	4,0[a]	4,2[a]	4,0[a]	3,5[b]	3,0[b]
Ser kontrolny SK	4,2[b]	5,0[a]	5,5[a]	4,2[a]	4,0[a]	4,3[a]	4,2[a]	4,2[a]	4,9[a]

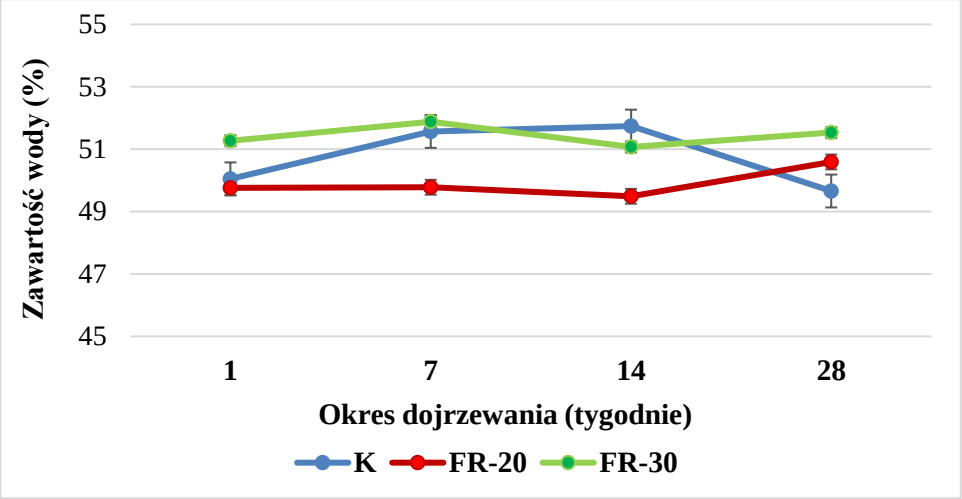
[a-b] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

5.3. Sery z dodatkiem frakcji tłuszczu mlekowego

5.3.1. Skład fizykochemiczny

Odnotowano istotne różnice ($P \leq 0,05$) w zawartościach poszczególnych składników chemicznych badanych serów (Tab. 26).

Wyprodukowane sery z dodatkiem frakcji tłuszczu mlekowego należały do grupy serów półtwardych. Zawartość wody w masie beztłuszczowej mieściła się w zakresie 54-63% (Codex Alimentarius, 2011). Stwierdzono niewielkie lecz istotne ($P \leq 0,05$) różnice w zawartości wody w analizowanych serach podczas całego okresu dojrzewania (Tab. 26). Zawartość wody mieściła się w przedziale od 49,66% do 51,88% (Rys. 31, Tab. 26).



Rysunek 31. Zmiany zawartości wody w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Zawartość tłuszczu w serze kontrolnym była wyższa niż w serach eksperymentalnych z dodatkiem frakcji tłuszczu (Tab. 26). Mogło to wynikać z większych strat tłuszczu w serach z dodatkiem frakcji i przejściem jego części do serwatki.

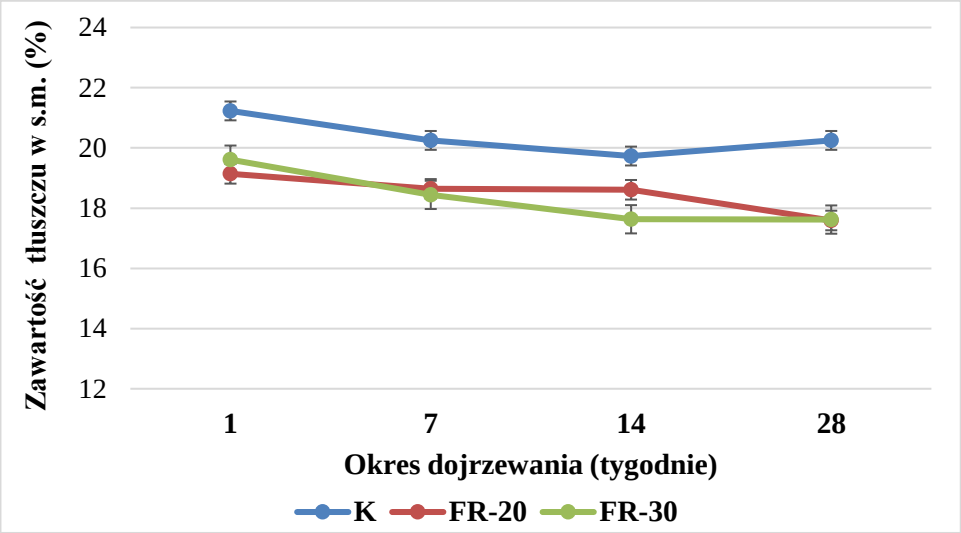
Tabela 26. Właściwości fizykochemiczne (n=3) serów z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serów z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania

Symbol sera	Okres dojrzewania (dni)	Woda	Tłuszcz	Tłuszcz w s.m.	Białko	Białko w s.m.	NaCl	S/M	Aktywność wody	Wartość pH
		%								
SK-1	1	50,05^{b}±1,36	10,60^{a}±0,04	21,23^{a}±0,51	30,76^{a}±1,92	61,68^{a}±5,30	1,99^{a}±0,12	3,99^{a}±0,09	0,98^{b}±0,01	5,28^{a}±0,03
SK-7	7	51,57^{a}±2,75	9,80^{b}±0,50	20,25^{a}±0,19	28,80^{b}±1,78	59,58^{b}±4,00	1,97^{a}±0,11	3,82^{a}±0,21	0,98^{b}±0,02	5,37^{a}±0,12
SK-14	14	51,74^{a}±1,51	9,51^{b}±0,35	19,73^{b}±1,03	29,50^{b}±1,22	61,19^{a}±3,35	1,92^{a}±0,13	3,72^{a}±0,11	0,99^{b}±0,01	5,30^{a}±0,04
SK-28	28	49,66^{b}±0,93	10,19^{a}±0,22	20,25^{a}±0,69	29,45^{b}±1,32	58,50^{b}±2,06	1,83^{a}±0,14	3,68^{a}±0,07	1,00^{a}±0,01	5,43^{a}±0,11
FR20-1	1	49,76^{b}±0,14	9,61^{b}±0,16	19,14^{b}±0,28	30,93^{a}±0,50	61,57^{a}±0,94	1,98^{a}±0,11	3,98^{a}±0,01	0,99^{b}±0,04	5,36^{a}±0,03
FR20-7	7	49,78^{b}±0,40	9,36^{b}±0,13	18,64^{c}±0,26	30,56^{a}±2,67	60,83^{a}±5,09	1,87^{a}±0,15	3,75^{a}±0,03	0,97^{a}±0,01	5,57^{a}±0,05
FR20-14	14	49,49^{b}±0,59	9,40^{b}±0,14	18,61^{c}±0,24	31,48^{a}±0,16	62,32^{a}±0,70	1,78^{a}±0,12	3,59^{a}±0,04	1,00^{b}±0,05	5,35^{a}±0,11
FR20-28	28	50,59^{b}±0,24	8,69^{c}±0,13	17,59^{c}±0,35	30,06^{a}±1,19	60,85^{a}±2,63	1,74^{a}±0,14	3,44^{a}±0,01	0,99^{b}±0,01	5,41^{a}±0,07
FR30-1	1	51,27a±0,70	9,55^{b}±0,15	19,61^{b}±0,26	30,55^{a}±2,33	62,74^{a}±5,38	1,98^{a}±0,10	3,85^{a}±0,05	0,99^{b}±0,03	5,32^{a}±0,10
FR30-7	7	51,88a±0,69	8,87^{c}±0,36	18,44^{c}±0,94	29,10^{b}±1,15	60,48^{a}±2,23	1,85^{a}±0,17	3,57^{a}±0,04	0,99^{a}±0,01	5,44^{a}±0,12
FR30-14	14	51,07^{a}±0,58	8,62^{c}±0,19	17,63^{c}±0,33	31,25^{a}±0,26	63,87^{a}±0,76	1,76^{a}±0,14	3,45^{a}±0,04	0,99^{b}±0,03	5,33^{a}±0,09
FR30-28	28	51,53^{a}±0,53	8,54^{c}±0,25	17,62^{c}±0,60	29,48^{b}±1,28	60,81^{a}±2,34	1,73^{a}±0,18	3,35^{a}±0,39	0,99^{b}±0,01	5,41^{a}±0,03

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
s.m. - sucha masa
S/M- zawartość soli w fazie wodnej sera
Źródło: badania własne

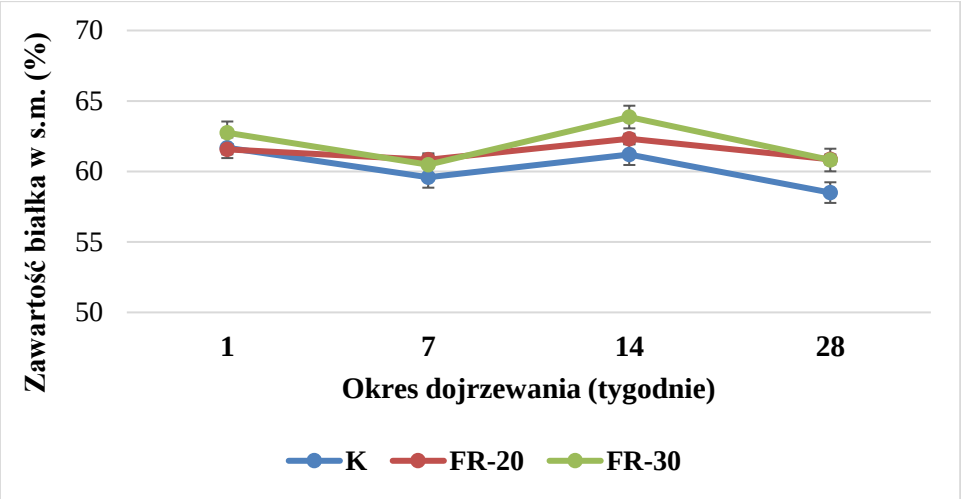
Zawartość tłuszczu w odniesieniu do składników suchej masy w serze kontrolnym była generalnie wyższa ($P \leq 0,05$) niż w serach z dodatkiem frakcji tłuszczu (Rys.32, Tab. 26).

Normalizacja zawartości tłuszczu w mleku serowarskim odbywa się najczęściej przez bezpośrednie odwirowanie odpowiedniej ilości śmietanki z mleka pełnego, mieszanie w określonej proporcji mleka pełnego z mlekiem odtłuszczonym lub dodawanie śmietanki do mleka odtłuszczonego. Dodatek śmietanki do mleka odtłuszczonego może powodować uzyskanie mniejszego wydatku produkcji sera, co wynika ze strat tłuszczu. Można przypuszczać, że w niniejszych badaniach również stopień wbudowania tłuszczu z frakcji płynnych uzyskanych w temperaturze 20°C lub 30°C w matrycę sera był jeszcze mniejszy niż w przypadku zastosowania śmietanki.



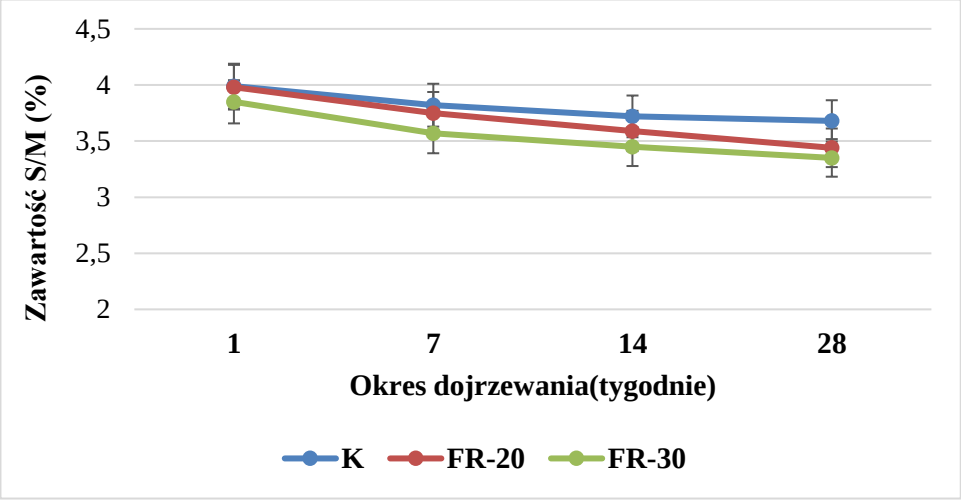
Rysunek 32. Zmiany zawartości tłuszczu w suchej masie w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Najwyższą zawartość białka 31,48%, oznaczono w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20°C po 14 dniach dojrzewania FR20-14, natomiast najniższą zawartością białka charakteryzował się ser kontrolny po 7 dniach dojrzewania SK-7 28,80% (Tab. 26). Najwyższą zawartością białka w suchej masie 63,87%, charakteryzował się ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 30°C również po 14 dniach dojrzewania FR30-14, a najniższą 58,50% ser kontrolny po 28 dniach dojrzewania SK-28 (Rys. 33, Tab. 26).



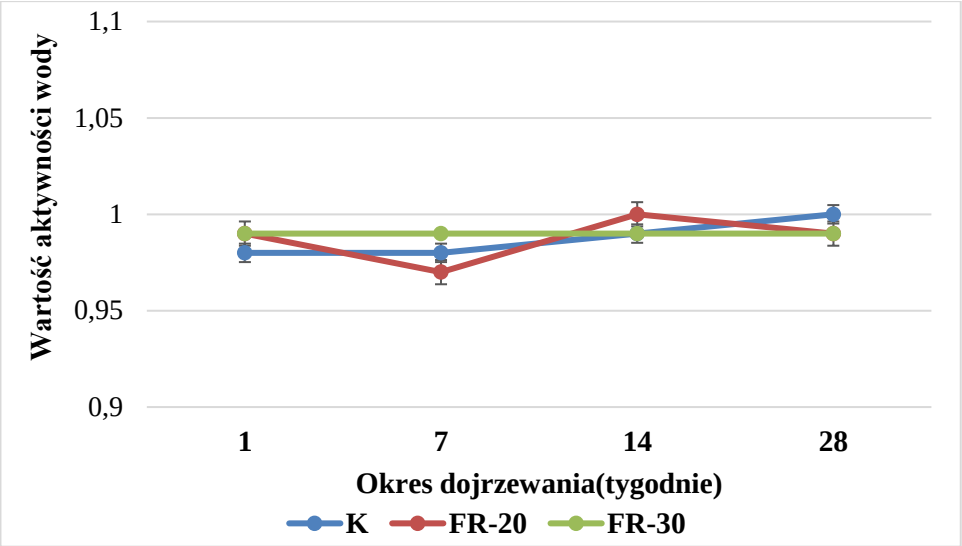
Rysunek 33. Zmiany zawartości białka w suchej masie w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Nie stwierdzono istotnych różnic w zawartości soli oraz soli w fazie wodnej sera między analizowanymi próbkami serów (Rys. 34, Tab. 26).



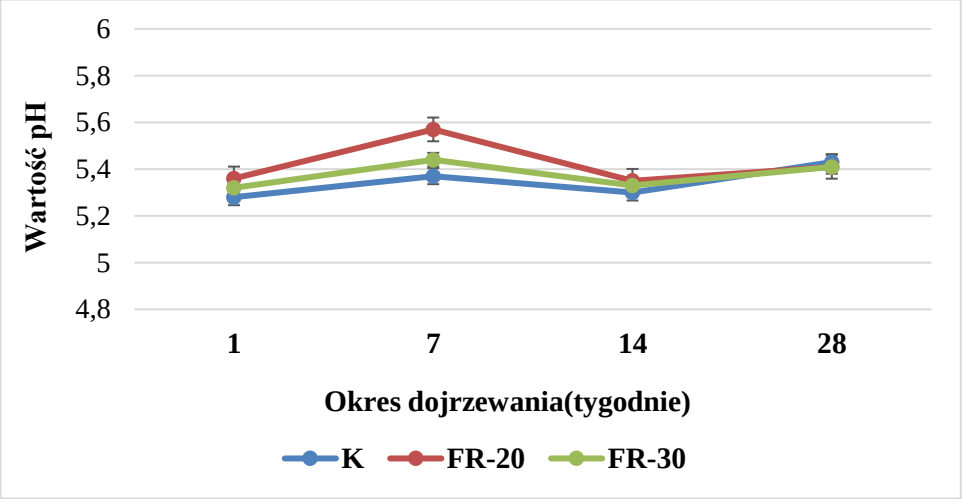
Rysunek 34. Zmiany zawartości soli w fazie wodnej sera (S/M) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.
Źródło: badania własne

Nie stwierdzono różnic ($P \leq 0{,}05$) w aktywności wody dla wszystkich badanych serów w całym analizowanym okresie dojrzewania (28 dni) (Rys. 35, Tab. 26).



Rysunek 35. Zmiany aktywności wody w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Nie stwierdzono również różnic ($P \leq 0,05$) w wartościach pH dla wszystkich badanych serów w całym analizowanym okresie dojrzewania (28 dni) (Rys. 36, Tab. 26).



Rysunek 36. Zmiany wartości pH w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Stwierdzono istotne różnice ($P \leq 0,05$) w zawartości mikroelementów w badanych serach (Tab. 27). Ser wyprodukowany z dodatkiem frakcji płynnej w temp. 20ºC charakteryzował się wyższą ($P \leq 0,05$) zawartością wapnia (14551,20 mg/kg), sodu (8583,76 mg/kg), potasu (643,79 mg/kg) i fosforu (5067,85 mg/kg) niż ser kontrolny i ser

z dodatkiem frakcji płynnej w temp. 30^{o}C (Tab. 27). Nie stwierdzono różnic (P>0,05) w proporcji Ca:P w analizowanych serach (Tab. 27).

Tabela 27. Średnia (n=3) zawartość składników mineralnych w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniach dojrzewania

Rodzaj sera	Symbol sera	Wapń (Ca)	Magnez	Sód	Potas	Fosfor (P)	Ca: P
		mg/kg					
Ser kontrolny	**SK-28**	$11888,70^{c}\pm98,98$	$392,62^{a}\pm39,09$	$8102,66^{b}\pm88,18$	$604,76^{c}\pm49,03$	$4657,59^{b}\pm22,50$	$2,55^{a}\pm0,17$
Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C	**FR20-28**	$14551,20^{a}\pm78,78$	$342,22^{b}\pm24,33$	$8583,76^{a}\pm54,45$	$643,79^{a}\pm87,16$	$5067,85^{a}\pm11,33$	$2,87^{a}\pm0,10$
Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C	**FR30-28**	$12042,33^{b}\pm45,84$	$316,97^{c}\pm13,82$	$8038,38^{c}\pm81,09$	$625,92^{b}\pm26,58$	$4563,25^{b}\pm35,12$	$2,75^{a}\pm0,14$

[a-c] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

5.3.2. Ocena stopnia rozkładu białek w serach

Stwierdzono różnice *(P*≤0,05) w ocenie stopnia rozkładu białek w serach z dodatkiem frakcji tłuszczu mlekowego płynnych w temp. 20ºC i 30ºC (Tab. 28). Generalnie, ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20ºC (FR20) wykazywał wyższe (*P*≤0,05) wartości wskaźników proteolizy niż ser FR30 i kontrolny (Tab. 28).

Badania Fenelon i in. (2000) dotyczące niskotłuszczowego sera Cheddar wykazały, że zmniejszenie zawartości tłuszczu w serach wpłynęło na wzrost zawartości białka oraz wzrost wartości pH. Zmianie uległa też szybkość proteolizy, a degradacja kazeiny była większa w serach o wyższej zawartości tłuszczu.

Ahmad i in. (2015) badając niskotłuszczowy ser Cheddar z dodatkiem niskotopliwych frakcji tłuszczu mlekowego, płynnych w temp. 10°C, 15°C, 25°C stwierdzili, że sery z frakcjami dojrzewały szybciej niż ser kontrolny z powodu nadmiernej lipolizy zachodzącej podczas dojrzewania.

Badane sery charakteryzowały się dość znaczną zawartością soli (Tab. 26), co mogło przyczynić się do zahamowania proteolizy oraz zwiększyć sztywność sera (Banks i in. 1993).

Tabela 28. Średnia (n=3) zawartość związków azotowych: zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (WSN-TN), zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12%TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (TCA-TN), zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA(kwas fosforowoplfromowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (PTA-TN) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniach dojrzewania

Rodzaj sera	**WSN-TN[1]**	**TCA-TN[2]**	**PTA-TN[3]**
	%		
SK-28	$6,64^{b}\pm0,32$	$4,78^{b}\pm0,27$	$1,53^{b}\pm0,32$
FR20-28	$7,08^{a}\pm0,17$	$5,43^{a}\pm0,98$	$1,81^{a}\pm0,11$
FR30-28	$6,78^{b}\pm0,54$	$4,50^{b}\pm0,12$	$1,45^{c}\pm0,39$

[a-c] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

5.3.3. Profil kwasów tłuszczowych

Stwierdzono istotne ($P \leq 0,05$) różnice w profilu kwasów tłuszczowych dla badanych serów. W serach z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej zarówno w temp. 20^{o}C (FR20) jak i 30^{o}C (FR30) wykazano dwukrotnie wyższą zawartość kwasów nasyconych krótko- i średniołańcuchowych w porównaniu z serem kontrolnym (Tab. 29). Stwierdzono niewielkie, ale istotne statystycznie różnice w zawartości kwasów C4:0-C13:0 dla sera FR20 (12,38%) i sera (FR30) (11,52%). Ser kontrolny charakteryzował się zawartością kwasów C4:0-C13:0 na poziomie 7,95% (Tab. 29).

W serach z dodatkiem frakcji tłuszczu wykazano wysokie procentowe zawartości kwasu masłowego C4:0, który odgrywa istotną rolę w profilaktyce i leczeniu nowotworów oraz wysokie procentowe ilości kwasu kaprynowego C10:0 oraz kwasu laurynowego C12:0, który działa bakteriobójczo na wiele patogenów (Tab. 29).

Stwierdzono istotne ($P \leq 0,05$) różnice dla sumy kwasów tłuszczowych C14:0-C18:0 pomiędzy SK, FR30 a FR20. Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20°C (FR20) charakteryzował się zawartością tych kwasów tłuszczowych na poziomie 23,80%, podczas gdy sery z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 30°C (FR30) i ser kontrolny wykazywały ponad 2-krotnie wyższe stężenia kwasów C14:0-C18:0, odpowiednio: 55,21% i 55,36% (Tab. 29).

Sery z dodatkiem frakcji tłuszczu FR20 i FR30 zawierały także w swoim składzie wyższą zawartość izomerów kwasu linolenowego C18:3, które należą do kwasów wielonienasyconych.

Stężenie nienasyconych kwasów tłuszczowych w tłuszczu mleka może być zwiększone przez dodatek frakcji tłuszczu pozyskiwanych metodą frakcjonowanie na sucho (Nadeem i in., 2015). Zmiany w składzie kwasów tłuszczowych przy braku modyfikacji są natomiast ważnym kryterium oceny stabilności tłuszczu (Gulla i Waghray, 2011).

Badania Ahmad i in. (2015) dotyczące produkcji niskotłuszczowego sera Cheddar z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej (frakcjonowanie na sucho) w temperaturze 10°C, 15°C i 25°C wykazały również, że dodatek tych frakcji powoduje wzbogacanie nienasyconych kwasów tłuszczowych. Po 60 dniach dojrzewania sera zawartość krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych w serach z dodatkiem frakcji tłuszczu była wyższa niż w serze kontrolnym. Monitorowanie zmian w składzie kwasów tłuszczowych jest ważnym parametrem określającym stopień lipolizy tłuszczu (Ahmad i in., 2015).

Nadeem i in. (2015) badali wpływ niskotopliwych frakcji tłuszczu mlekowego na stabilność oksydacyjną lodów. Śmietankę frakcjonowano w trzech różnych temperaturach: 25°C, 15°C i 10°C. Wszystkie niskotopliwe frakcje zostały indywidualnie włączone do lodów i porównane z kontrolnym, z niemodyfikowanym tłuszczem mlekowym. Badania wykazały, że frakcjonowanie wpłynęło na zmiany w składzie kwasów tłuszczowych wszystkich frakcji. Stężenie nienasyconych kwasów tłuszczowych wzrosło we frakcjach o niskiej temperaturze topnienia. Stężenie krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych i długołańcuchowych nienasyconych kwasów tłuszczowych zwiększało się również w zmodyfikowanej wersji tłuszczów z udziałem wszystkich frakcji pozyskiwanych w trzech ustalonych temperaturach frakcjonowania (Nadeem i in., 2015).

Jones i in. (2023) badali masło z dodatkiem bezwodnego tłuszczu mlekowego, który był frakcjonowany w temperaturze 20°C, 25°C i 30°C. Badania wykazały, że najliczniejszymi kwasami tłuszczowymi uzyskanymi w tym badaniu były kwas kaprylowy (C10:0), kwas laurynowy (C12:0), kwas mirystynowy (C14:0), kwas palmitynowy (C16:0), kwas stearynowy (C18:0), kwas oleinowy (C18:1) i kwas linolenowy (C18:2). Ilość nasyconych kwasów tłuszczowych wzrastała wraz ze wzrostem temperatury frakcjonowania. Najbardziej znaczący wzrost stwierdzono w przypadku kwasu palmitynowego i stearynowego (Jones i in., 2023).

Kwak i in. (2002) badali przemiany zachodzące podczas dojrzewania niskotłuszczowego sera Cheddar i stwierdzili, że w wyniku lipolizy zaszły znaczne zmiany w profilu kwasów tłuszczowych, które spowodowały wzrost stężenia krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych.

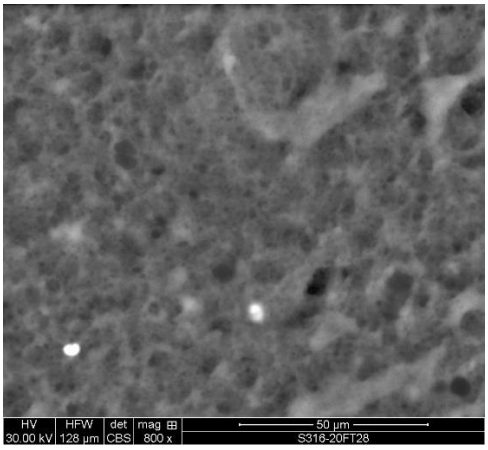
Tabela 29. Profil kwasów tłuszczowych w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniach dojrzewania

Symbol kwasu tłuszczowego		**Rodzaj sera**		
		Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20°C (FR20-28)	**Ser z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 30°C (FR30-28)**	**Ser kontrolny (SK)**
C4:0	%	2,62[a]	2,30[a]	1,92[b]
C6:0	%	1,91[a]	1,67[a]	1,41[b]
C8:0	%	1,18[a]	1,08[a]	0,94[b]
C10:0	%	2,84[a]	2,70[a]	0,10[b]
C10:1	%	0,30[a]	0,30[a]	0,26[b]
C11:0	%	0,06[a]	0,07[a]	0,09[a]
C12:0	%	3,36[a]	3,29[a]	3,11[a]
C13:0	%	0,11[a]	0,11[a]	0,12[a]
Suma C4:0-C13:0	%	**12,38[a]**	**11,52[b]**	**7,95[c]**
C14:0	%	11,00[a]	10,94[b]	10,30[b]
C14:1	%	1,26[a]	1,13[a]	1,08[b]
C15:0	%	1,15[a]	0,25[b]	0,06[c]
C15:1	%	0,25[c]	31,50[a]	30,50[b]
C 16:0	%	0,11[c]	1,34[b]	2,70[a]
C16:1	%	0,32[b]	0,08[c]	0,42[a]
C17:0	%	0,56[a]	0,54[a]	0,45[b]
C17:1	%	0,41[a]	0,39[b]	0,31[b]
C 18:0	%	8,74[b]	9,04[a]	9,54[a]
Suma C14:0-C18:0	%	**23,8[b]**	**55,21[a]**	**55,36[a]**
C 18:1 trans 9	%	0,27[a]	0,28[a]	0,25[a]
C 18:1 cis 9	%	0,44[a]	0,20[b]	0,19[b]
C 18:2 trans 6	%	0,35[a]	0,09[c]	0,13[b]
C 18:2 cis 6	%	1,56[a]	1,47[a]	0,18[b]
C18:3 n3	%	0,46[a]	0,44[a]	0,34[b]
C 20:1	%	0,37[a]	0,36[a]	0,34[a]

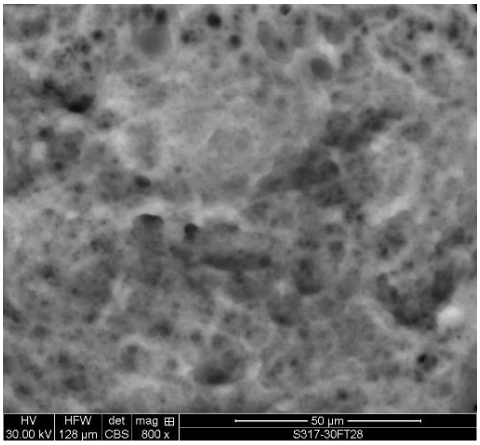
[a-c] Wartości średnie w tym samym wierszu o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

5.3.4. Mikrostruktura serów wraz z analizą fraktalną

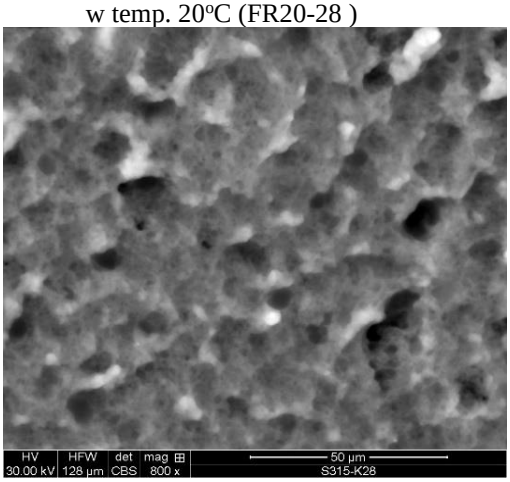
Wykonane zdjęcia mikrostruktury serów z dodatkiem płynnych frakcji tłuszczu mlekowego (FR20 i FR30), wykazały obecność sieci krystalicznej złożonej z kryształów tłuszczu i przestrzeni pomiędzy nimi, wypełnionej płynnym tłuszczem (Fot. 11-13).



Fot. 11. Ser z frakcją tłuszczu płynną w temp. 20ºC (FR20-28)



Fot. 12. Ser z frakcją tłuszczu płynną w temp. 30ºC (FR30-28)



Fot. 13. Ser kontrolny (SK-28)

Fotografia 11-13. Mikrofotografie sera z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), sera z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i sera kontrolnego (SK) po 28 dniach dojrzewania powiększenie 800x, napięcie 20.00 kV).
Źródło: badania własne.

Różnice obrazów mikrostruktury analizowanych serów uzyskane w badaniach mogły być wynikiem różnicowej zawartości kwasów tłuszczowych, które wpływają na ich cechy fizykochemiczne i strukturalne. Frakcje ciekłe tłuszczu mlekowego charakteryzują się dużą liczbą drobnych kryształów, a te otrzymane w wyższej temperaturze (30ºC) zawierały mniejsze kryształy niż pozyskane w niższej temperaturze

(20°C) (Małkowska i in., 2021). Próbki badanych serów różniły się między sobą stopniem zagęszczenia kryształów. W serach z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20°C średnica kryształów była większa niż w przypadku serów z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 30°C. Nie stwierdzono różnic ($P \leq 0,05$) w wartościach wymiaru fraktalnego pomiędzy badanymi serami (Tab. 30).

Tabela 30. Wyniki analizy fraktalnej w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniu dojrzewania

Rodzaj sera	Wymiar fraktalny D_L	Współczynnik determinacji R^2
SK-28	1.440[a]	0.903[a]
FR20-28	1.494[a]	0.885[a]
FR30-28	1.460[a]	0.924[a]

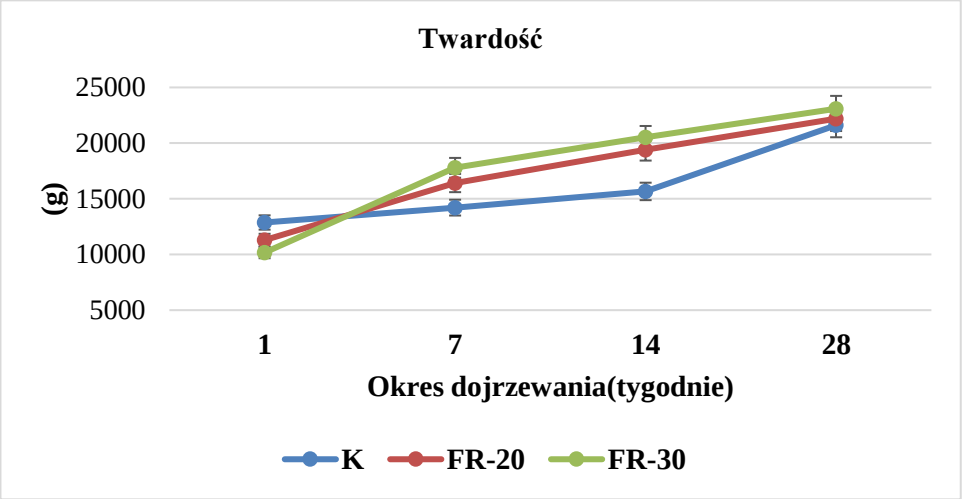
[a-c] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

Małkowska i in. (2021) stwierdzili, że we frakcjach pozyskiwanych w wyższej temperaturze większa część tłuszczu miała postać płynną i pod wpływem nacisku stawała się bardziej podatna na powierzchniowe odkształcanie, co w efekcie powodowało mniejsze postrzępienie krawędzi obserwowanych na mikrofotografiach kształtów i wygładzenie ich konturów. Im niższa wartość wymiaru fraktalnego tym mniejsza nieregularność. Niestety takiej zależności nie stwierdzono w niniejszej pracy.

5.3.5. Analiza profilu tekstury

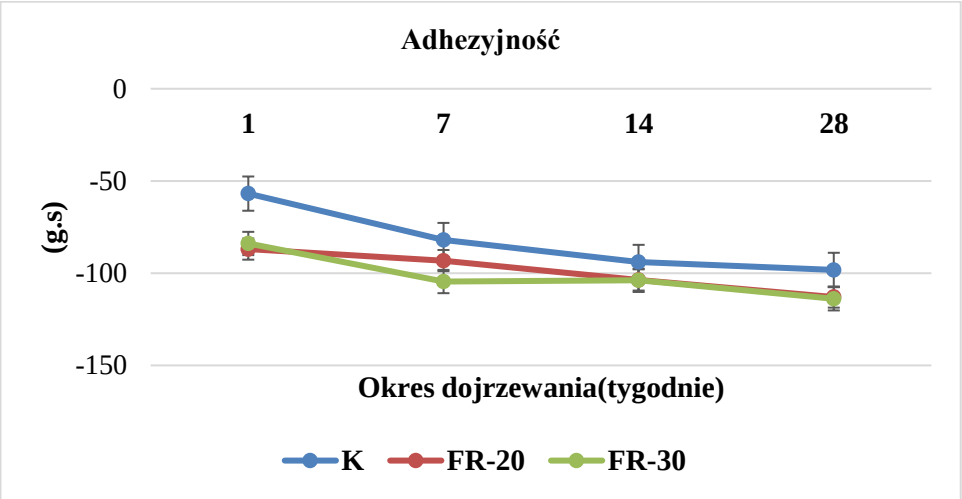
Dodatek frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C lub 30°C miał wpływ na konsystencję oraz parametry tekstury serów o obniżonej zawartości tłuszczu. Stwierdzono różnice ($P \leq 0,05$) w parametrach tekstury badanych serów. Najwyższą twardość 23087,85 g oznaczono dla sera FR30-28 z frakcją (30°C) po 28 dniach dojrzewania, a najniższą twardość 10172,24 g miał ser FR30-1 ser z frakcją płynną w temp. 30°C, w 1 dniu dojrzewania (Rys. 37, Tab. 31). Generalnie, wraz z upływem czasu dojrzewania twardość badanych serów zwiększała się.

W badaniach Małkowskiej i in. (2021) frakcja płynna tłuszczu mlekowego otrzymana w temperaturze 20°C charakteryzowała się najniższą twardością i najmniejszą zawartością nasyconych kwasów tłuszczowych, spośród analizowanych frakcji pozyskiwanych w temp. 30°C, 25°C i 20°C.



Rysunek 37. Zmiany parametru twardości w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

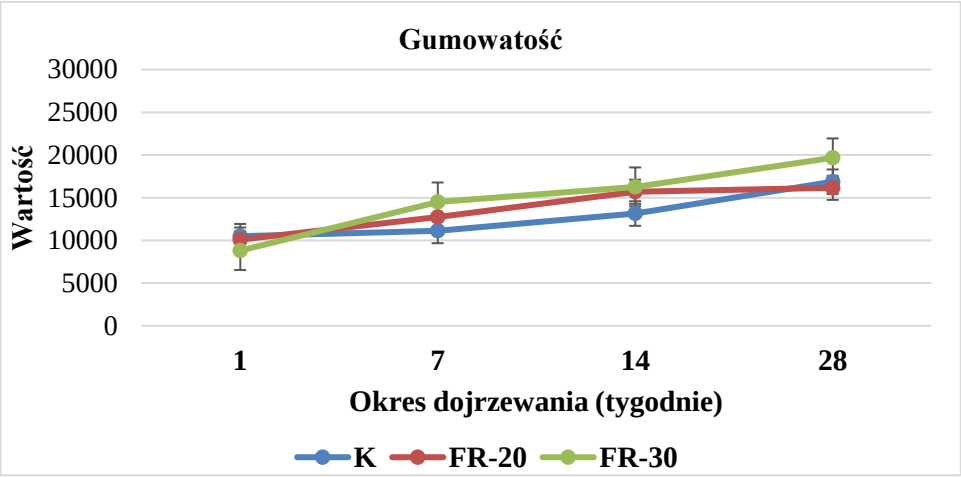
Najwyższą wartość adhezyjności (-56,86 g.s) stwierdzono w serze kontrolnym w 1 dniu dojrzewania, a najniższą (-113,88 g.s) uzyskano dla sera z frakcją płynna w temp. 30°, w 28 dniu dojrzewania (FR30-28) (Rys. 38, Tab. 31). Ser kontrolny charakteryzował się nieznacznie wyższymi wartościami adhezyjności.



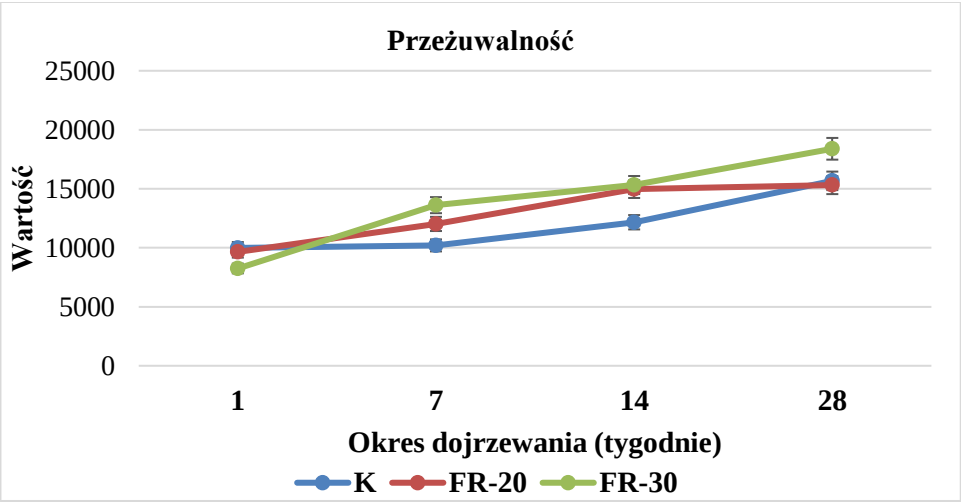
Rysunek 38. Zmiany parametru adhezyjności w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Nie stwierdzono różnic ($P \leq 005$) w sprężystości serów, która mieściła się w przedziale od 0,92 do 0,96 (Tab. 33). Niewielkie ale istotne różnice ($P \leq 0,05$) stwierdzono w odniesieniu do spoistości analizowanych serów (Tab. 33).

Najwyższą wartością gumowatości (19666,66) oraz przeżuwalności (18389,69), charakteryzował się ser z frakcją tłuszczu płynną w temp. 30°C w 28 dniu dojrzewania. Najniższą wartość gumowatości (10090,06) oraz przeżuwalności (9651,02) oznaczono w serze FR20-1 (Rys. 39, Rys. 40, Tab. 31). Generalnie, wraz z postępem czasu dojrzewania następował wzrost gumowatości i przeżuwalności serów (Rys. 39 i 40).

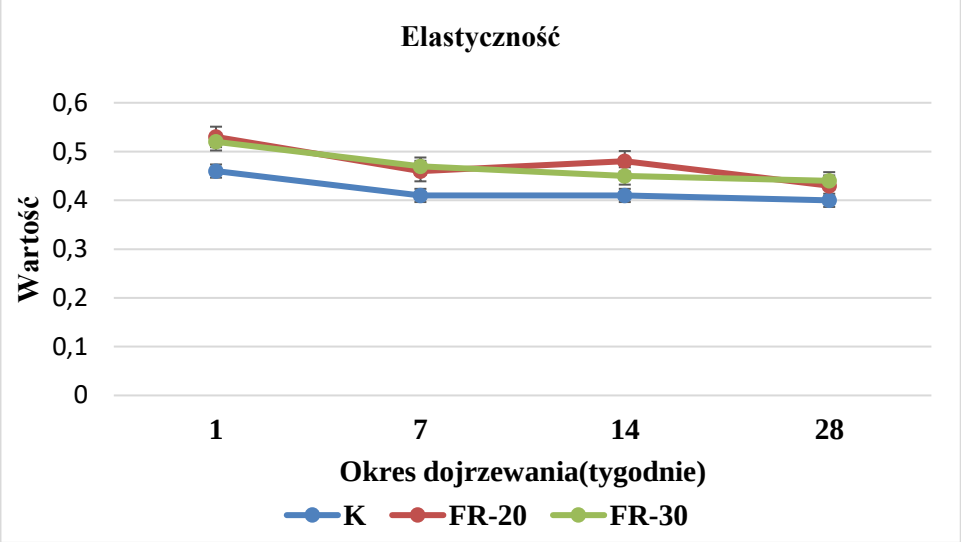


Rysunek 39. Zmiany parametru gumowatości w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne



Rysunek 40. Zmiany parametru przeżuwalności w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Sery z dodatkiem frakcji tłuszczu były bardziej elastyczne niż ser kontrolny (Rys. 41, Tab. 31). Małkowska i in. (2021) ujawnia wyraźne korelacje pomiędzy składem kwasów tłuszczowych (stosunek nasyconych i nienasyconych kwasów tłuszczowych) a jędrnością/twardością i strukturą mikroskopową sieci krystalicznych frakcji mleka. Według badań tych autorów dodatek płynnych frakcji tłuszczu mlekowego może znacząco wpłynąć na zmniejszenie twardości produktów mleczarskich.



Rysunek 41. Zmiany parametru elastyczności w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania
Źródło: badania własne

Ahmad i in. (2015) badając sery Cheddar z dodatkiem frakcji tłuszczu mlekowego stwierdzili, że dodatek odpowiednich frakcji tłuszczu mlekowego powoduje upodobnienie składu chemicznego oraz parametrów tekstury tych serów do serów pełnotłustych i może być stosowane w produkcji sera Cheddar na większą skalę.

Frétin i in. (2019) prowadzili badania sera Cantal i stwierdzili, że skład tłuszczu mlekowego jest ściśle związany z dietą krów i ma bezpośredni wpływ na teksturę produkowanego sera. Stężenia kwasu C18:0 i nienasyconych kwasów tłuszczowych, takich jak C18:1cis-9, C18:1trans-11, C18:3 n-3, sprzężonych kwasów linolowych oraz jedno- i wielonienasyconych kwasów tłuszczowych było wyższe w mleku i serach pochodzących z pastwisk.

Tabela 31. Średnie (n=3) wartości parametrów tekstury TPA w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania

Symbol sera	Okres dojrzewania (dni)	Parametr tekstury						
		Twardość	Adhezyjność	Sprężystość	Spoistość	Gumowatość	Przeżuwalność	Elastyczność
		g	g.s					
SK-1	1	12873,34^{c}±398,34	-56,86^{a}±4,59	0,95^{a}±0,01	0,81^{a}±0,04	10489,29^{c}±708,74	9988,49^{c}±650,60	0,46^{b}±0,03
SK-7	7	14207,21^{c}±176,10	-82,03^{b}±3,32	0,92^{a}±0,01	0,78^{b}±0,03	11112,85^{c}±424,98	10202,97^{c}±483,49	0,41^{b}±0,03
SK-14	14	15662,72^{c}±252,16	-93,91^{b}±3,35	0,92^{a}±0,01	0,84^{a}±0,04	13145,17^{b}±701,45	12164,36^{b}±670,90	0,41^{b}±0,04
SK-28	28	21607,04^{b}±356,21	-98,23^{b}±6,21	0,93^{a}±0,01	0,78^{b}±0,02	16868,20^{b}±576,11	15672,25^{b}±521,58	0,40^{b}±0,02
FR20-1	1	11290,96^{c}±191,17	-86,93^{b}±2,20	0,95^{a}±0,01	0,89^{a}±0,01	10090,06^{c}±210,20	9651,02^{c}±179,98	0,53^{a}±0,02
FR20-7	7	10172,242^{c}±92,76	-83,90^{b}±6,03	0,93^{a}±0,05	0,86^{b}±0,02	8803,03^{b}±185,10	8246,75^{c}±595,94	0,52^{a}±0,02
FR20-14	14	19402,12^{c}±375,97	-103,67^{b}±2,73	0,95^{a}±0,03	0,81^{a}±0,03	1591,87^{c}±426,17	1496,58^{c}±388,17	0,48^{a}±0,01
FR20-28	28	22195,06^{b}±132,90	-112,94^{c}±0,96	0,95^{a}±0,01	0,72^{b}±0,04	16154,02^{b}±868,43	15313,94^{b}±750,00	0,43^{b}±0,02
FR30-1	1	10172,242^{c}±92,76	-83,90^{b}±6,03	0,93^{a}±0,05	0,86^{b}±0,02	8803,03^{b}±185,10	8246,75^{c}±595,94	0,52^{a}±0,02
FR30-7	7	17781,80^{b}±169,08	-104,52^{c}±3,32	0,93^{a}±0,01	0,81^{b}±0,03	14509,55^{b}±567,12	13613,24^{b}±595,16	0,47^{b}±0,05
FR30-14	14	20513,34^{c}±93,31	-103,87^{c}±2,56	0,94^{a}±0,01	0,79^{a}±0,02	16270,65^{b}±337,17	15318,43^{b}±275,86	0,45^{b}±0,01
FR30-28	28	23087,85^{a}±131,73	113,88^{c}±11,40	0,93^{a}±0,01	0,85^{a}±0,02	19666,66^{a}±579,56	18389,69^{a}±523,04	0,44^{b}±0,03

$^{a-c}$ Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)

Źródło: badania własne

Czas i dodatek frakcji tłuszczu stanowiły istotny czynnik wpływający na parametry tekstury serów (Tab. 32).

Stwierdzono bardzo silną ($P \leq 0,01$) ujemną korelację między zawartością soli i zawartością soli w fazie wodnej sera a twardością, adhezyjnością, gumowatością i przeżuwalnością (Rys. 42, Rys. 43, Tab. 32). Zawartość tłuszczu i tłuszczu w suchej masie wpływała silnie na adhezyjność ($P \leq 0,01$), gumowatość ($P \leq 0,05$) i przeżuwalność ($P \leq 0,05$) (Rys. 44, Rys. 45, Tab. 32). Sprężystość była negatywnie skorelowana z zawartością wody (Rys. 46) a pozytywnie z zawartością suchej masy (Rys. 61). Natomiast, zawartość białka była silnie ($P \leq 0,01$) skorelowana ze sprężystością (Rys. 47 Tab. 32). Istniała średnia ($P \leq 0,05$) zależność między zawartością białka i białka w suchej masie (Rys. 48, Rys. 49, Tab. 33).

Zawartość związków rozkładu białek WSN-TN była pozytywnie skorelowana ze sprężystością (Rys. 62) a z kolei zawartość TCA-TN była pozytywnie skorelowana z gumowatością (Rys. 63).

Myhan i in. (2020) badali właściwości reologiczne sera typu edamskiego z dodatkiem oleju palmowego. Nie stwierdzono istotnych różnic we właściwościach reologicznych obu produktów w trakcie dojrzewania sera.

Ullah i in. (2017) prowadzili badania sera Cheddar, w którym tłuszcz mlekowy o zawartości 3,5% tłuszczu, został częściowo zastąpiony olejem z nasion chia w ilości 2,5%, 5%, 7,5% i 10%. Sery były produkowane następująco: 97,5% tłuszczu mlekowego i 2,5% oleju z nasion chia; 95% tłuszczu mlekowego i 5% oleju z nasion chia; 92,5% tłuszczu mlekowego i 7,5% oleju z nasion chia; 90% tłuszczu mlekowego i 10% oleju chia. Wyniki badań serów po 45 i 90 dniach dojrzewania nie wykazały różnic w teksturze serów i sugerują, że korzyści zdrowotne związane ze spożywaniem nienasyconych kwasów tłuszczowych zawartych w olejach oraz naturalnych przeciwutleniaczy są potwierdzone naukowo.

Rozwój tekstury w serze powiązany jest z hydrolizą α_{s1}-kazeiny podczas dojrzewania [Lawrence i in. 1987]. W serze pełnotłustym tłuszcz mlekowy jest równomiernie rozprowadzony w matrycy kazeinowej oraz nadaje gładkość struktury. Przy usunięciu tłuszczu to kazeina odgrywa główną rolę w kreowaniu tekstury sera.

Tabela 32. Dwu-czynnikowa analiza wariancji dla parametrów jakościowych serów produkowanych z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC i 30ºC

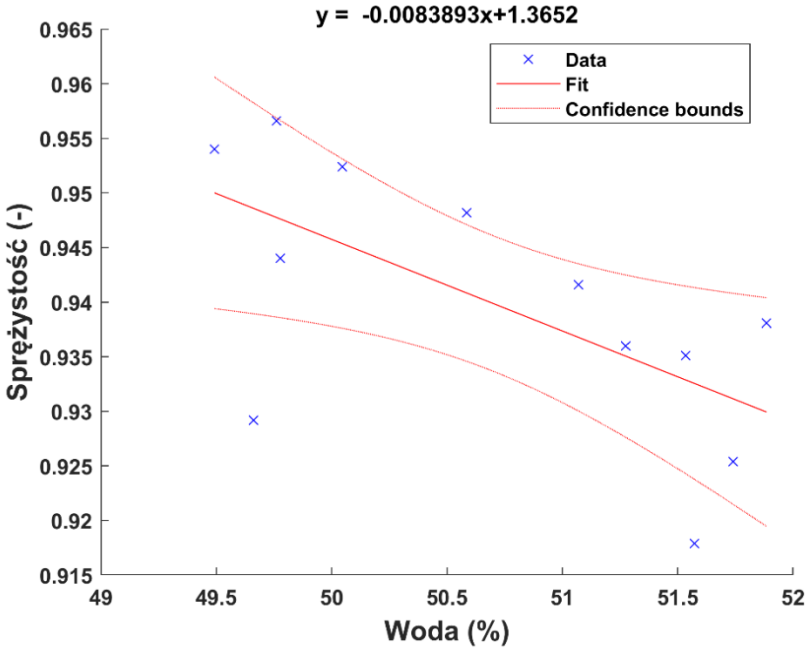
	Czas		**Frakcja**		**Czas: Frakcja**	
df / Parametr	3		2		6	
	SS	P	SS	P	SS	P
Twardość	**1128,0762****	3,88E-89	**49822426,32****	1,05E-41	**104874788,1****	4,88E-50
Adhezyjność	**10028,2496****	4,66E-27	**6061,56****	1,21E-21	**1093,9690****	3,73E-05
Sprężystość	**0,0021***	0,04188	**0,0047****	0,0002	0,0026	0,1144
Spoistość	**0,0541****	2,48E-09	**0,0144****	0,0009	**0,0654****	3,84E-09
Gumowatość	**602537687,6****	7,03E-52	**53145183,08****	1,97E-19	**71731980,77****	2,99E-20
Przeżuwalność	**519085110,3****	2,89E-50	**51918036,16****	1,20E-19	**70032459,46***	1,79E-20
Elastyczność	**0,0551****	6,96E-09	**0,0472****	1,54E-08	0,0061	0,4319

df – stopnie swobody
SS – suma kwadratów
**P* ≤ 0,05
***P* ≤ 0,01
Źródło: badania własne

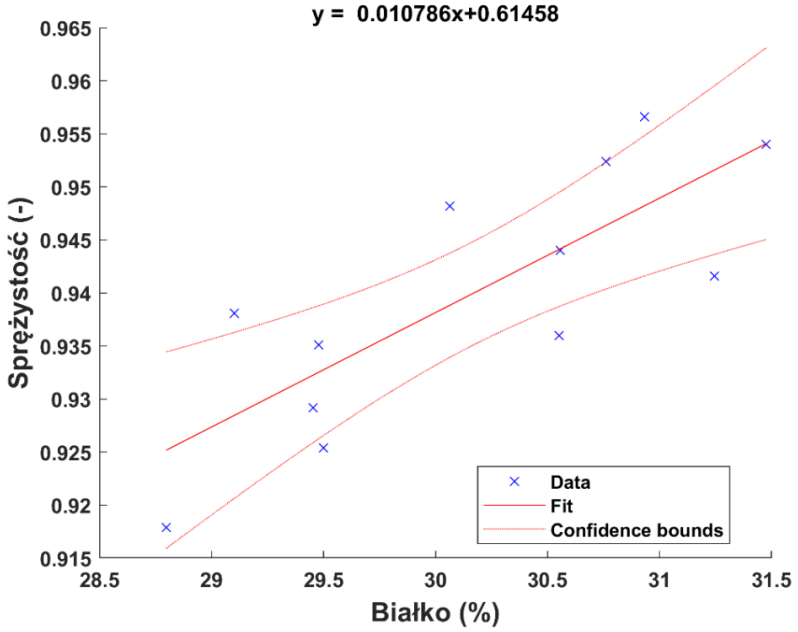
Tabela 33. Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami, parametrami fizykochemicznymi i wskaźnikami proteolizy a parametrami tekstury w serach z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20) i 30°C (FR30)

Parametr	Twardość	Adhezyjność	Sprężystość	Spoistość	Gumowatość	Przeżuwalność	Elastyczność
Woda	-0,0028	-0,1885	**-0,6389***	0,1435	0,0501	0,0209	-0,2356
Tłuszcz	-0,5544	**0,8417****	-0,0386	0,1085	**-0,5795***	**-0,5861***	-0,0182
Tłuszcz w s.m.	-0,6107*	**0,8630****	-0,2380	0,1603	**-0,6230***	**-0,6391***	-0,0920
Białko	-0,1617	0,1416	**0,7961****	0,1547	-0,1608	-0,1212	**0,6170***
Białko w s.m.	-0,2211	0,0512	0,4844	0,3095	-0,1789	-0,1528	**0,5838***
NaCl	**-0,9454****	**0,8778****	-0,0963	0,4458	**-0,9337****	**-0,9430****	0,3126
S/M	**-0,8977****	**0,8969****	0,1077	0,3803	**-0,9025****	**-0,9023****	0,3680
pH	0,3531	-0,4212	-0,0102	-0,3913	0,3011	0,3011	-0,1460
Aktywność wody	0,3248	-0,4882	0,2244	0,2179	0,3753	0,3867	0,2732
WSN-TN	0,1952	-0,7068	1,0000	-0,6034	-0,3917	-0,3104	0,5050
TCA-TN	0,7797	-0,3009	-0,4678	0,9860	0,9970	0,9865	0,5322
PTA-TN	-0,3152	-0,2647	0,8725	-0,9187	-0,7953	-0,7397	0,0123

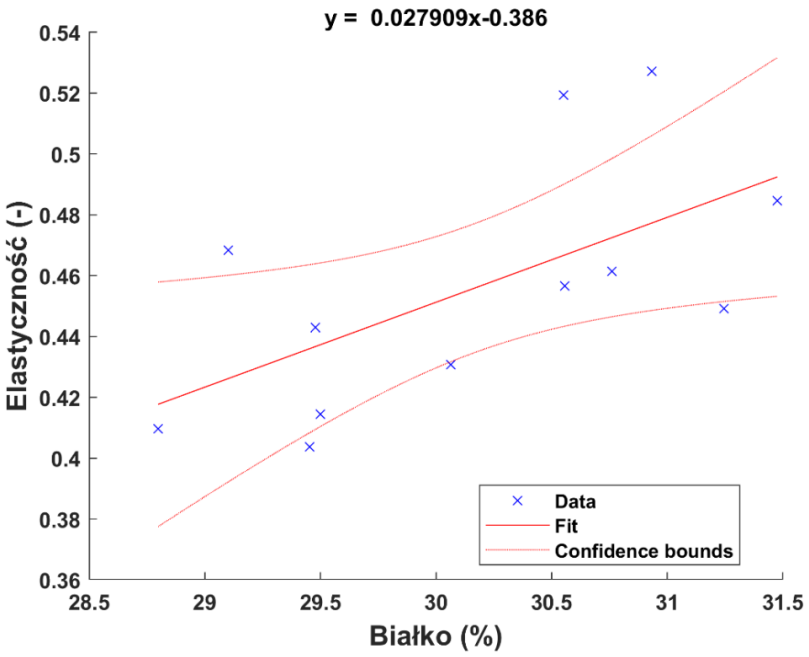
*P≤0,05
**P≤0,01
s.m. - sucha masa.
S/M - zawartość soli w fazie wodnej sera
WSN-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
TCA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
PTA-TN – zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN)
Źródło: badania własne



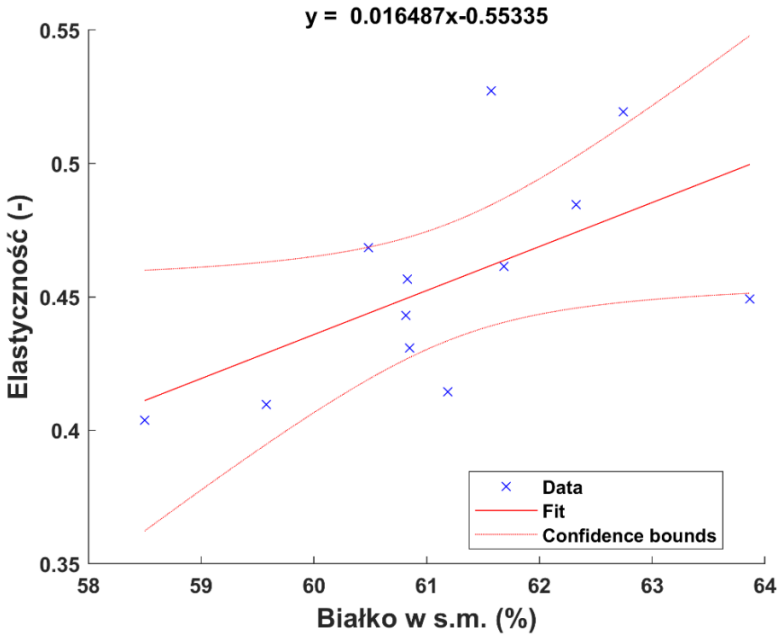
Rysunek 42. Model zależności liniowej między zawartością wody (%) a sprężystością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



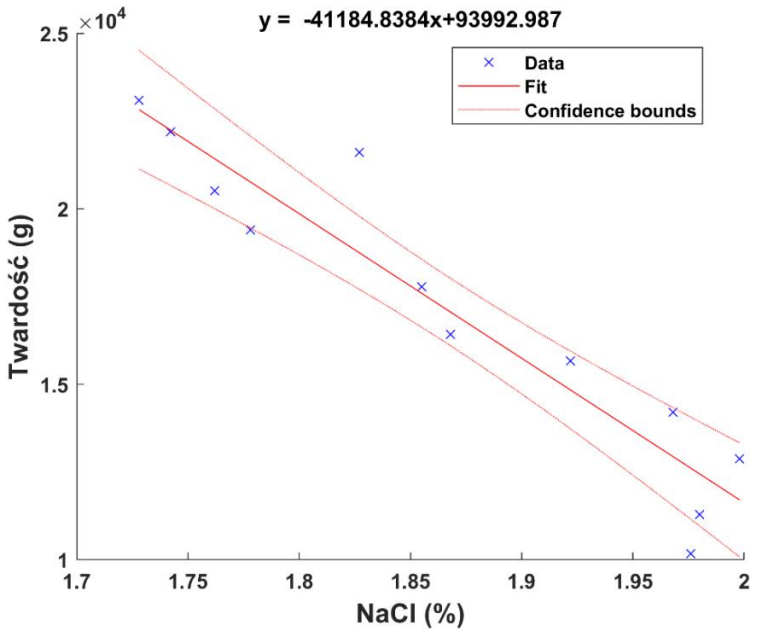
Rysunek 43. Model zależności liniowej między zawartością białka (%) a sprężystością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



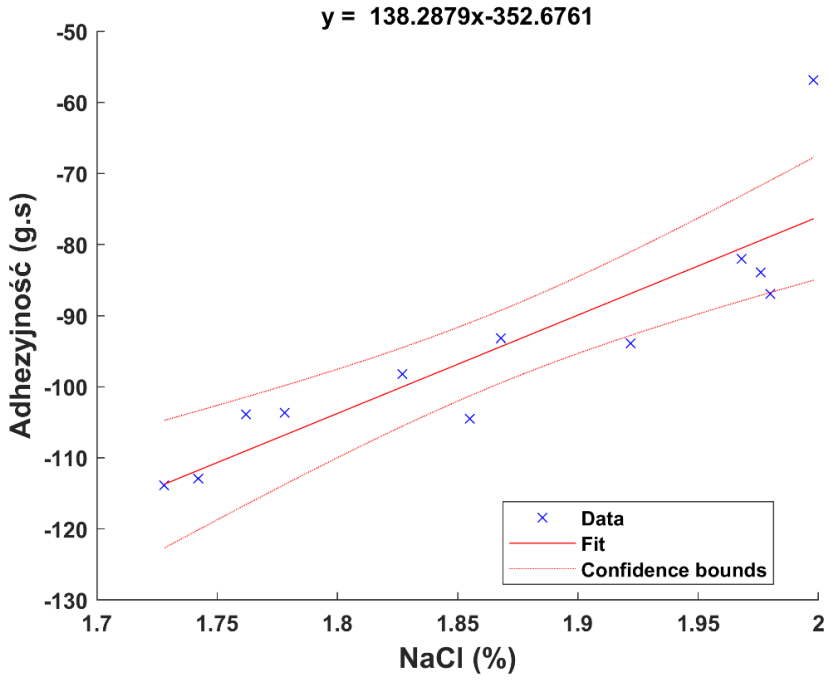
Rysunek 44. Model zależności liniowej między zawartością białka (%) a elastycznością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



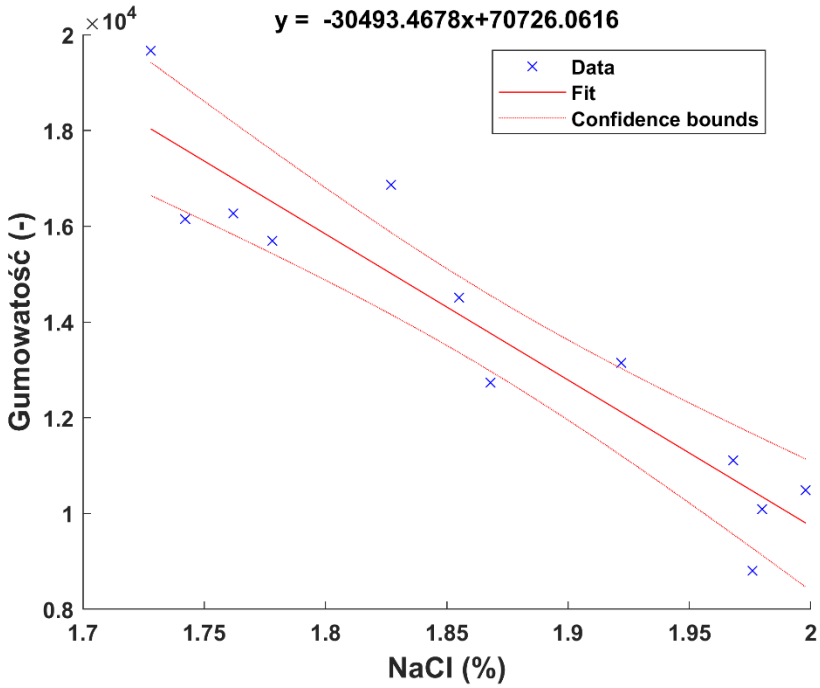
Rysunek 45. Model zależności liniowej między zawartością białka w suchej masie (%) a elastycznością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



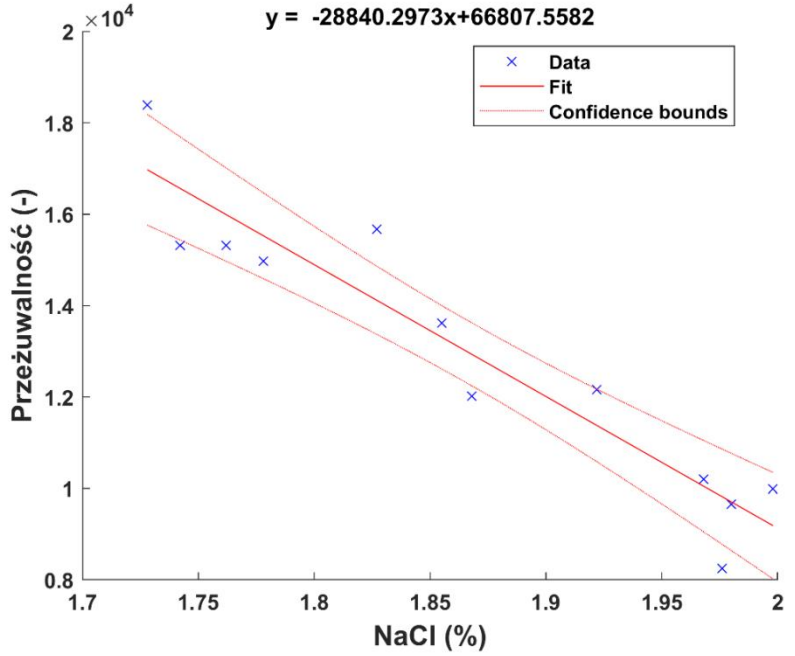
Rysunek 46. Model zależności liniowej między zawartością NaCl (%) a twardością (g) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



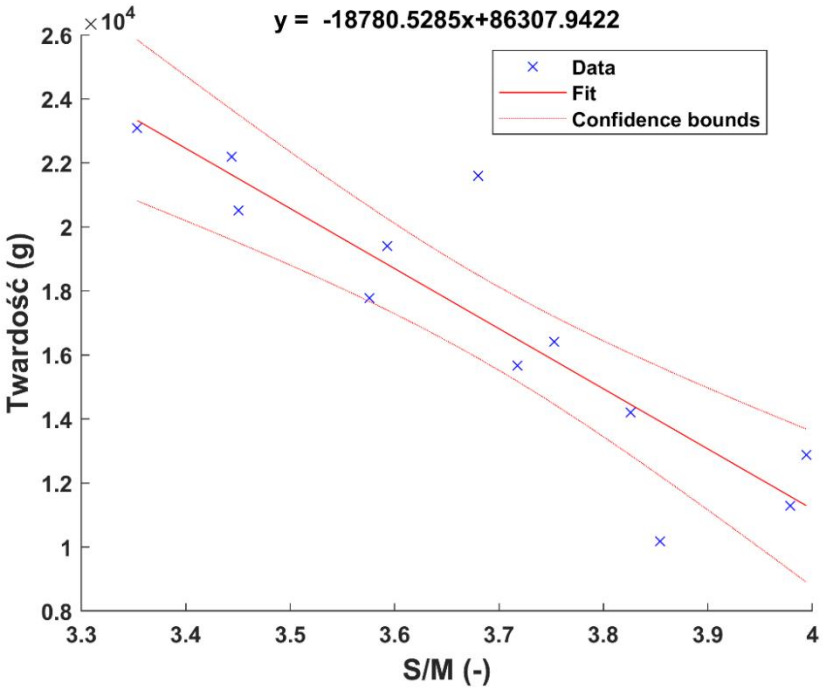
Rysunek 47. Model zależności liniowej między zawartością NaCl (%) a adhezyjnością (g.s) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



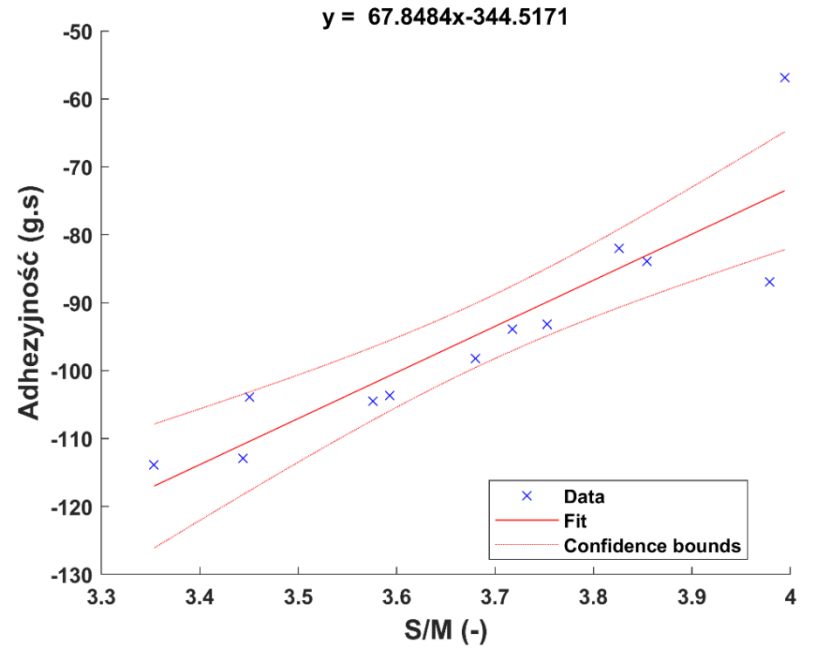
Rysunek 48. Model zależności liniowej między zawartością NaCl (%) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



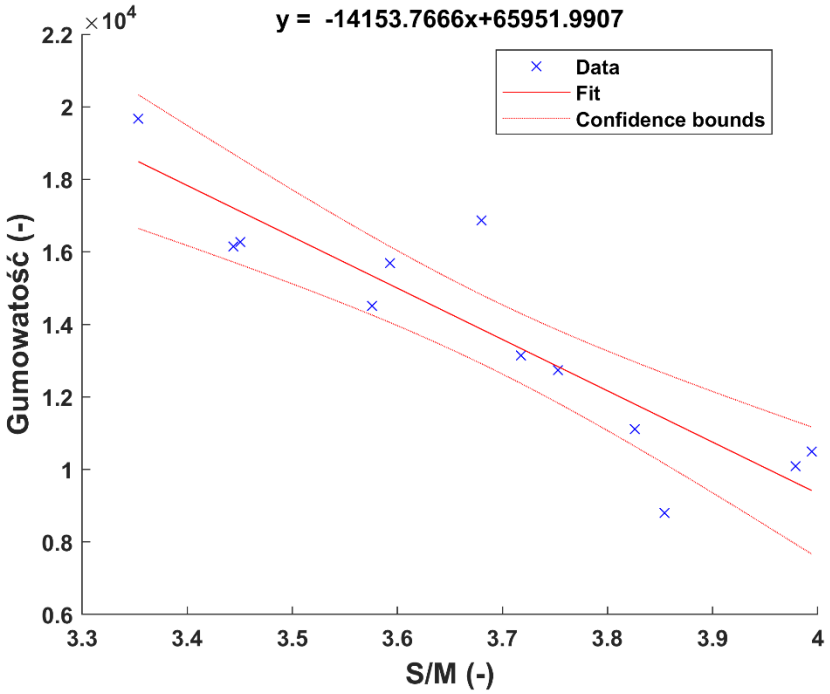
Rysunek 49. Model zależności liniowej między zawartością NaCl (%) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



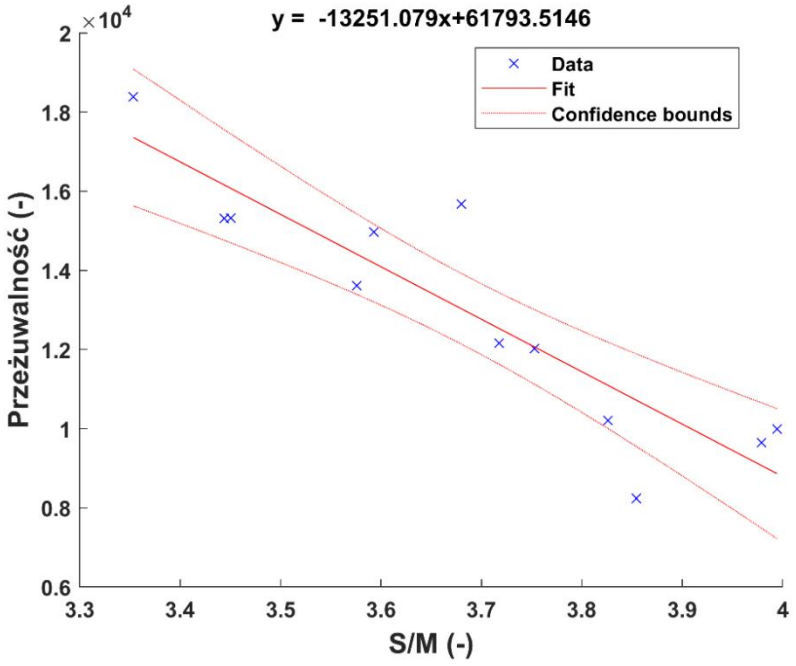
Rysunek 50. Model zależności liniowej między zawartością S/M (-) a twardością (g) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



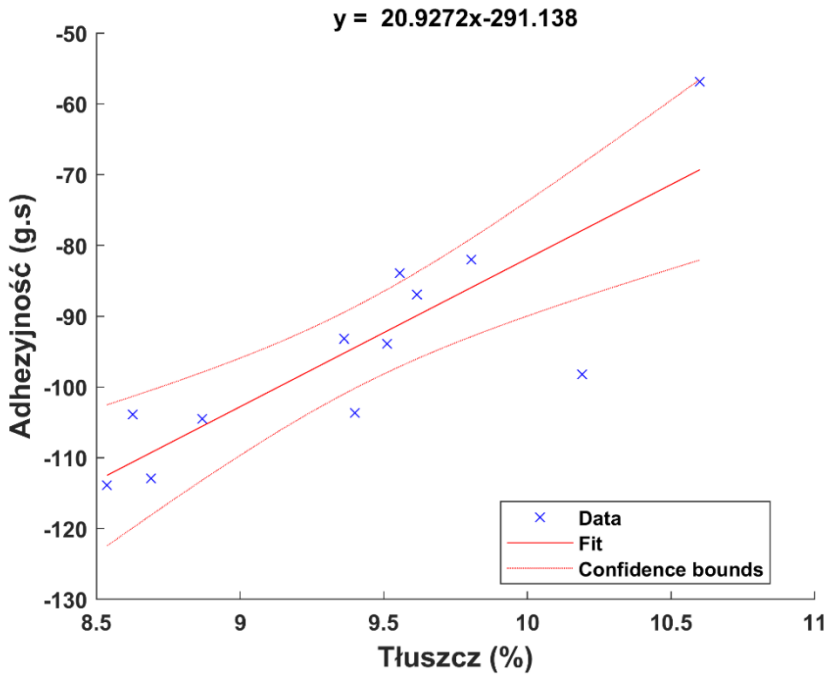
Rysunek 51. Model zależności liniowej między zawartością S/M (-) adhezyjnością (g.s) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



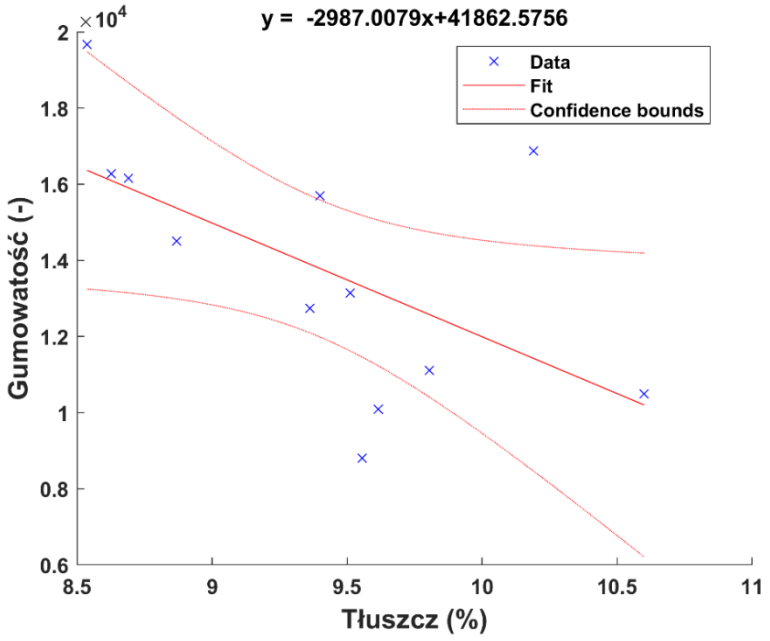
Rysunek 52. Model zależności liniowej między zawartością S/M (-) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



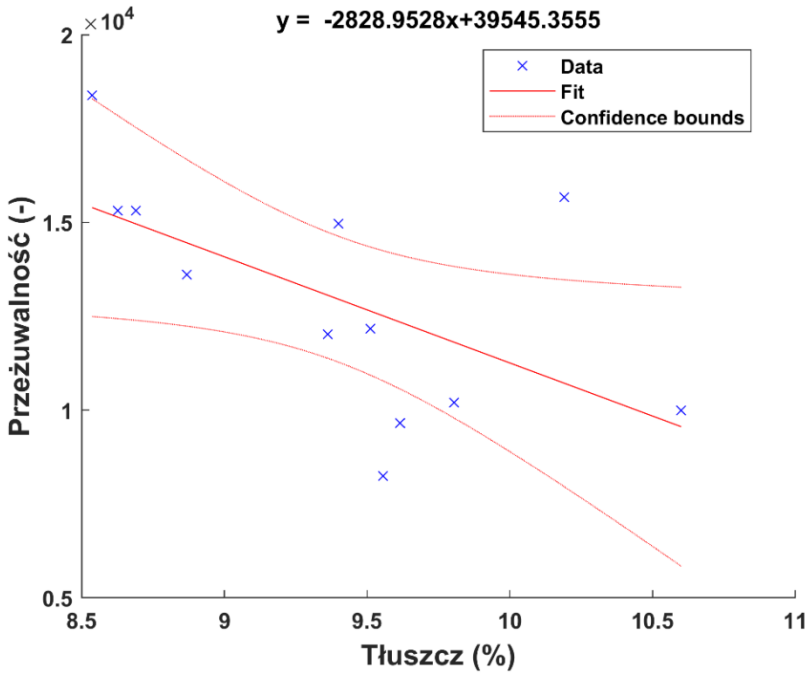
Rysunek 53. Model zależności liniowej między zawartością S/M (-) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



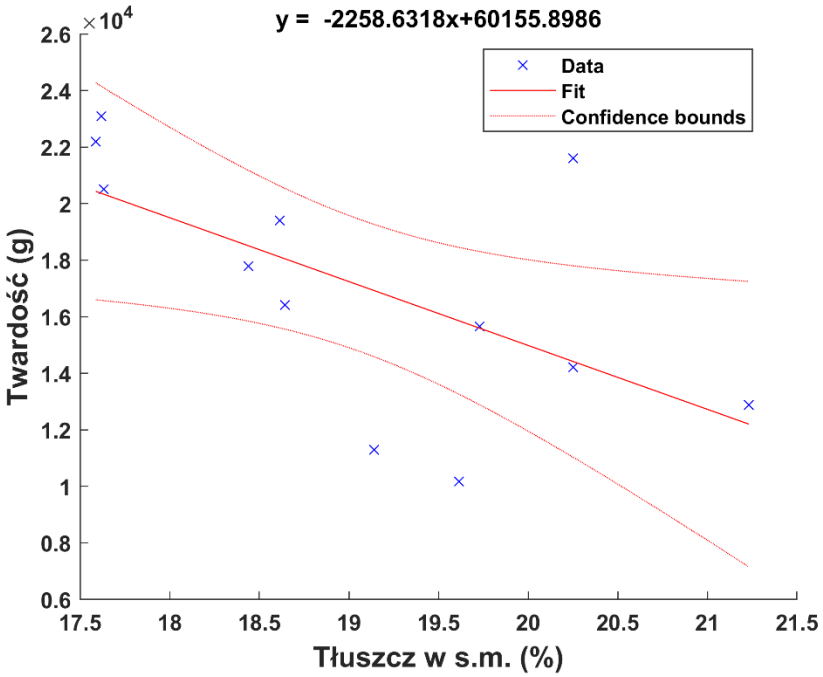
Rysunek 54. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu (%) a adhezyjnością (g.s) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



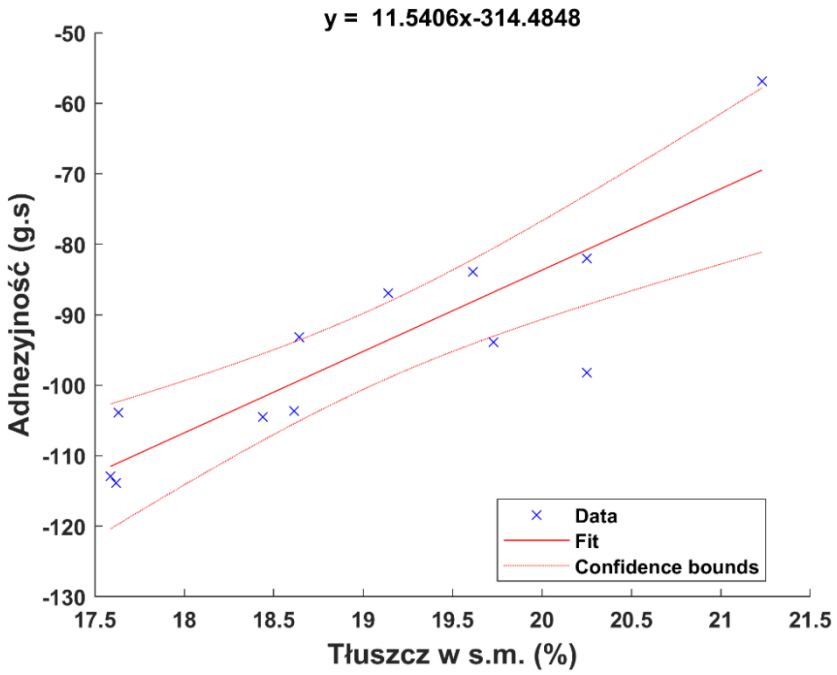
Rysunek 55. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu (%) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



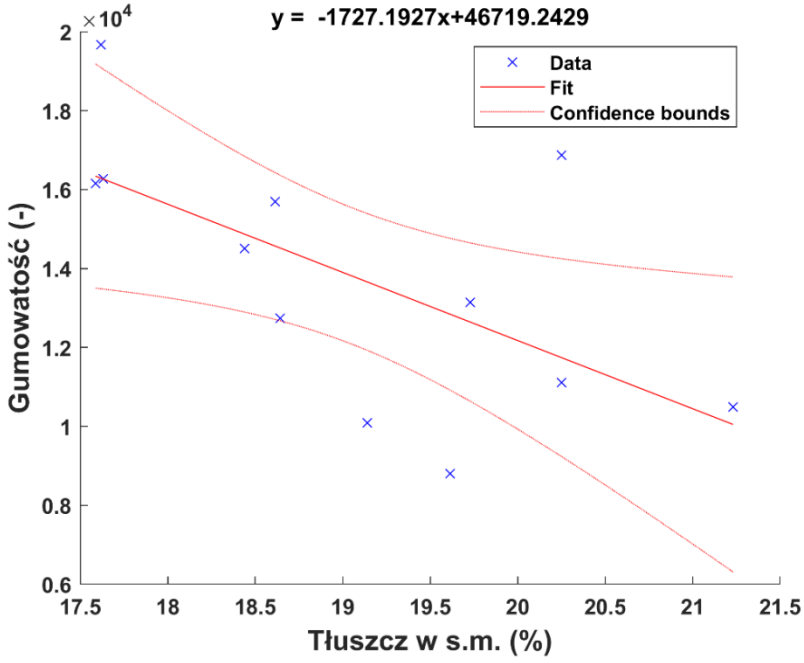
Rysunek 56. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu (%) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



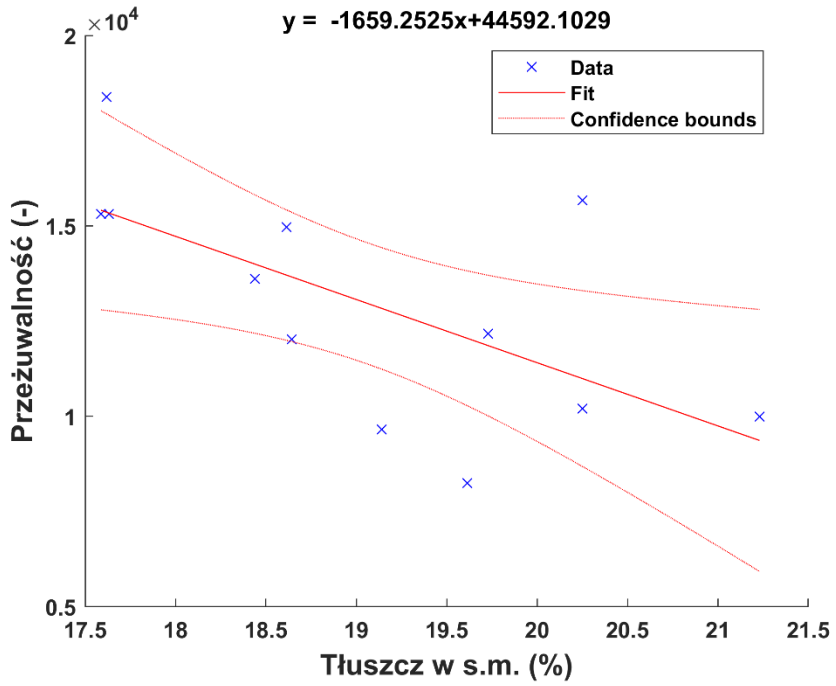
Rysunek 57. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a twardością (g) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



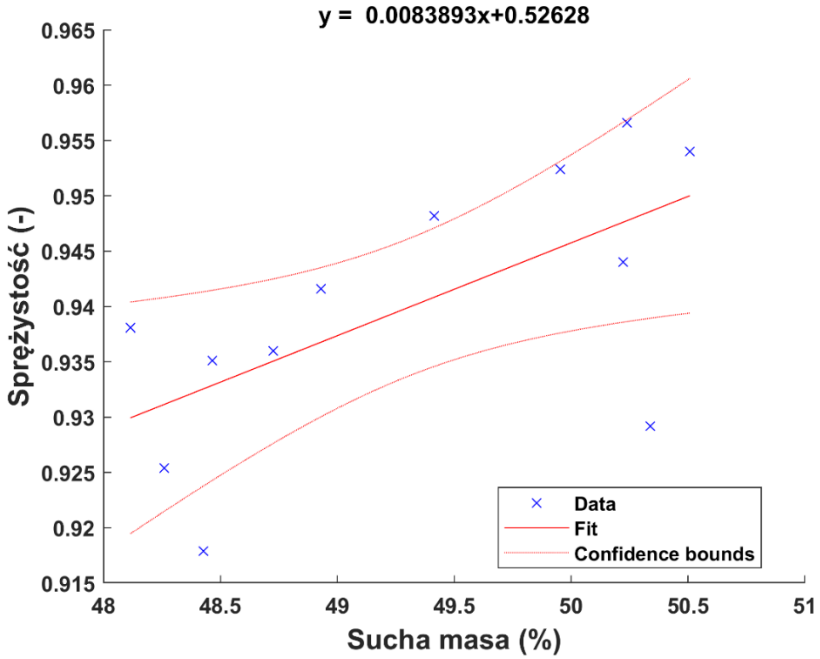
Rysunek 58. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a adhezyjnością (g.s) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



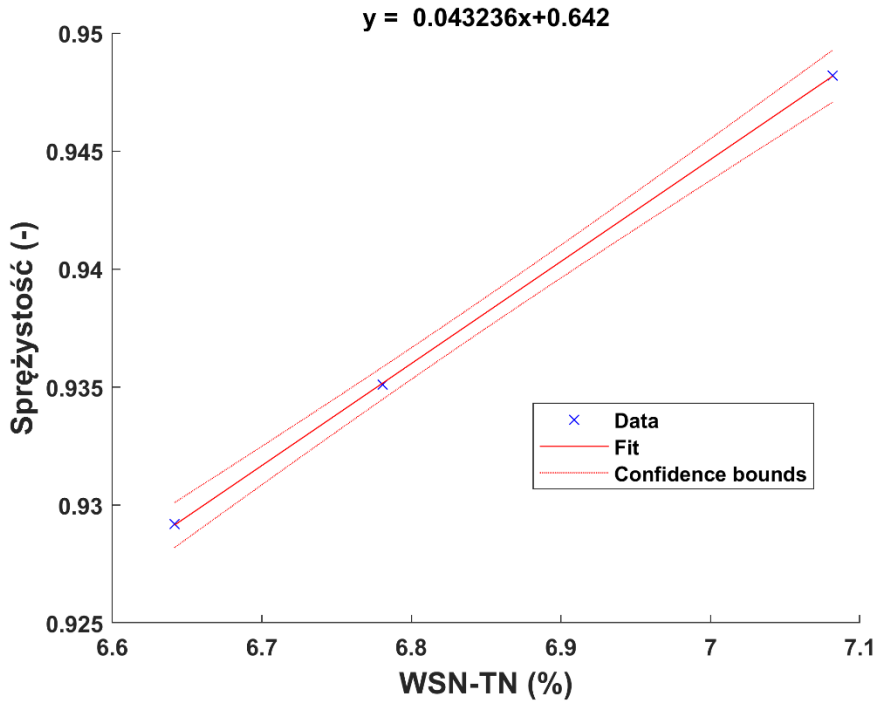
Rysunek 59. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



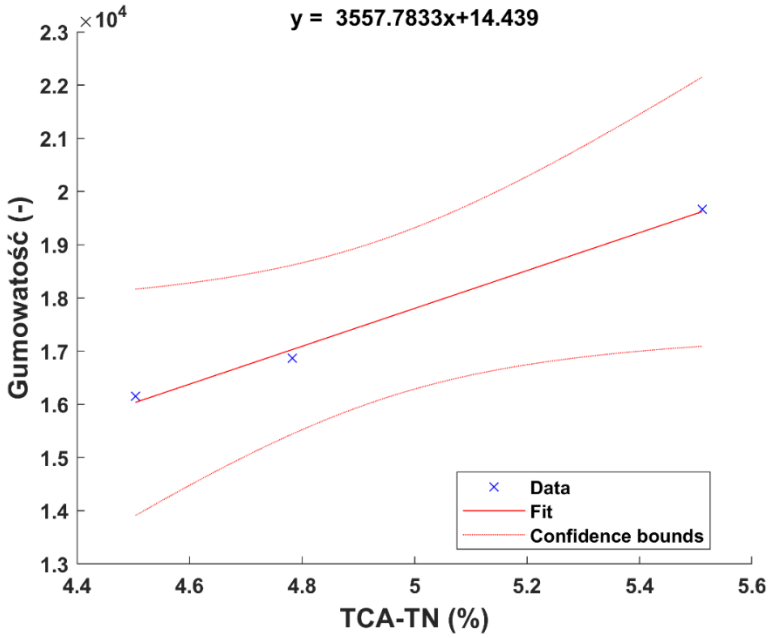
Rysunek 60. Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



Rysunek 61. Model zależności liniowej między zawartością suchej masy (%) a sprężystością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20ºC (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30ºC (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



Rysunek 62. Model zależności liniowej między zawartością WSN-TN (%) a sprężystością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne



Rysunek 63. Model zależności liniowej między zawartością TCA-TN (%) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK)
Źródło: badania własne

5.3.6. Analiza sensoryczna tekstury

Analiza sensoryczna wykazała różnice ($P \leq 0,05$) w ocenie serów z dodatkiem stosowanych frakcji tłuszczu. Stwierdzono wyższe wartości ($P \leq 0,05$) twardości, sprężystości i tempa odkształcenia serów z dodatkiem frakcji tłuszczu (FR20 i FR30) w porównaniu do sera kontrolnego (Tab. 34). Nie stwierdzono różnic w przeżuwalności, spoistości, gładkości serów po żuciu i pozostałości po żuciu między badanymi próbkami serów (Tab. 34).

W przypadku twardości wyznaczonej podczas pierwszego kęsa, najwyższą wartość stwierdzono w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temp. 20^{o}C (6,0 pkt).

Badania serów Cheddar prowadzonych przez Ahmad i in. (2015) wykazały, że cechy sensoryczne serów z dodatkiem frakcji tłuszczu po 60 dniach dojrzewania charakteryzowały się lepszymi cechami sensorycznymi niż ser kontrolny. Wraz z postępem okresu przechowywania poprawiała się ocena smaku, co można powiązać postępująca lipolizą i proteolizą sera Cheddar w okresie dojrzewania trwającym 60 dni. Ocena smaku była silnie skorelowana ze stężeniem krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych powstałych w okresie dojrzewania. Analiza sensoryczna wykazała, że ser otrzymany z udziałem niskotopliwych frakcji tłuszczu mlekowego, dojrzewający w krótszym czasie był bardziej akceptowalny w porównaniu z serem kontrolnym (Ahmad i in. 2015).

Dalsze badania powinny skupiać się na określeniu wielkości dodatku frakcji w celu uzyskania określonej zawartości tłuszczu, stopnia redukcji zawartości tłuszczu, w celu uzyskania efektu korzystnego z punktu widzenia znaczącej poprawy cech jakościowych produktu.

Tabela 34. Średnie (n=10) wartości oceny sensorycznej w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniach dojrzewania

Rodzaj sera	Twardość (dotyk ręką)	Sprężystość (dotyk ręką)	Tempo odkształcania (dotyk ręką)	Twardość (pierwszy kęs)	Przeżuwalność (pierwszy kęs)	Spoistość (pierwszy kęs)	Adhezyjność (pierwszy kęs)	Gładkość próby po żuciu	Pozostałość po żuciu
SK-28	4,3[b]	4,0[b]	4,3[b]	5,8[a]	4,2[a]	3,4[a]	2,0[a]	4,1[a]	4,7[a]
FR20-28	5,8[a]	5,7[a]	5,3[a]	6,0[a]	4,2[a]	3,3[a]	1,7[b]	4,4[a]	4,8[a]
FR30-28	5,1[a]	5,8[a]	5,9[a]	5,2[b]	4,3[a]	3,7[a]	2,1[a]	4,2[a]	4,8[a]

[a-b] Wartości średnie w tej samej kolumnie o różnym indeksie różnią się istotnie ($P \leq 0,05$)
Źródło: badania własne

6. PODSUMOWANIE

Zmiany trendów konsumenckich na rynku artykułów spożywczych obserwowane w ciągu ostatnich lat inicjują zmiany asortymentu oferowanych przez przemysł produktów. Dążenie do bycia fit, zrzucenie zbędnych kilogramów czy zachowanie szczupłej sylwetki ma z pewnością wpływ na wzrost zainteresowania konsumentów produktami o obniżonej zawartości tłuszczu. Z drugiej strony, niezrównoważona dieta, siedzący tryb życia czy mała aktywność fizyczna, a także spożywanie większej ilości kalorii niż zapotrzebowanie energetyczne mogą przyczyniać się do wzrostu zachorowalności na choroby cywilizacyjne (np. choroby układu krążenia, cukrzyca, zespół metaboliczny, otyłość, choroby tarczycy).

Proces technologiczny serów o obniżonej zawartości tłuszczu stanowi ogromne wyzwanie dla zakładów mleczarskich. Wynika to z faktu, że obniżenie zawartości tłuszczu generuje niejednokrotnie zmianę cech sensorycznych, w szczególności tekstury takich serów.

Zastosowanie różnych zabiegów technologicznych, zmiana parametrów procesu czy zastosowanie dodatków w produkcji serów o obniżonej zawartości tłuszczu może przyczynić się do znaczącej poprawy cech jakościowych takich serów. Niemniej, warunkiem koniecznym wprowadzenia zmian w procesie technologicznym jest określenie ekonomicznej opłacalności produkcji, na podstawie czego można stwierdzić, że wzrost wydatku lub istotna poprawa cech jakościowych, przyczyniająca się do wzrostu wolumenu sprzedaży, uzasadniają poniesione nakłady finansowe.

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników można stwierdzić, że spośród analizowanych wariantów najlepsze cechy jakościowe uzyskano dla serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z i bez inuliny, w szczególności w odniesieniu do tekstury produktu. Zastosowanie wybranych frakcji tłuszczu mlekowego może stanowić narzędzie do modyfikacji profilu kwasów tłuszczowych produktów mleczarskich.

7. WNIOSKI

1. Tekstura serów o obniżonej zawartości tłuszczu jest silnie skorelowana z zawartością tłuszczu. Redukcja tłuszczu w serze wpływała na zwiększenie zawartości białka powodując zmiany w matrycy białkowej, a w konsekwencji bardziej zwartą i twardą teksturą sera. Ważnymi czynnikami determinującymi teksturę tego rodzaju sera była aktywność wody i zawartości soli. Częściowe zastąpienie tłuszczu wodą wpływa na zmniejszenie twardości i adhezyjności serów o obniżonej zawartości tłuszczu i upodabnia ich cechy jakościowe do serów pełnotłustych.

   Pozytywnie zweryfikowano hipotezę H1 i H2.
2. Produkcja sera o niskiej zawartości tłuszczu o akceptowalnej teksturze i konsystencji, wymaga uwzględnienia strukturalnej roli tłuszczu mlekowego a ocena mikrostruktury wspomagana analizą fraktalną może być dobrym narzędziem do wykazywania różnic w mikrostrukturze sera będących następstwem zawartości tłuszczu, a w konsekwencji stanowić pomoc w ustalaniu receptury i szczegółów technologicznych produkcji sera obniżonej zawartości tłuszczu.
3. Zastosowanie mimetyków tłuszczu takich jak mikropartykułowane białka serwatkowe oraz inulina podczas produkcji serów o obniżonej zawartości tłuszczu umożliwiło nadanie tym serom cech fizykochemicznych produktów pełnotłustych. Ich cechy sensoryczne również były oceniane podobnie jak w przypadku serów pełnotłustych, szczególnie w obecności inuliny. Sery produkowane z dodatkiem inuliny były mniej twarde i najbardziej przypominały sery pełnotłuste, a zastosowanie mikropartykułowanych białek serwatkowy miało znaczenie drugorzędne. Dodatek mikropartykułowanych białek serwatkowych w połączeniu z inuliną pozytywnie wpływa na teksturę serów o obniżonej zawartości tłuszczu.

   Pozytywnie zweryfikowano hipotezę H3 i H4.
4. Zastosowanie frakcji tłuszczu mlekowego płynnych w temperaturze 20ºC oraz w temperaturze 30ºC miało porównywany wpływ na cechy jakościowe serów o obniżonej zawartości tłuszcz, w tym profil tekstury. Zastosowanie wybranych frakcji tłuszczu mlekowego przyczynia się do modyfikacji składu tłuszczu, przyspiesza lipolizę podczas dojrzewania serów a w konsekwencji ma korzystny

wpływ na profil kwasów tłuszczowych i zwiększony udział kwasów nienasyconych.

Pozytywnie zweryfikowano hipotezę H5.

8. SPIS LITERATURY

1. Ahmad S., Nadeem M., Ayaz M., Jaspal M. (2015). Effect of low-melting fractions of milk fat on lipolysis of Cheddar cheese. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39, 2516-2522.
2. Aljewicz M., Cichosz G., Kowalska M. (2011). Produkty seropodobne, analogi serów topionych i dojrzewających. *ŻYWNOŚĆ: Nauka. Technologia. Jakość*, 5(78), 16-25.
3. Altun S. K., Aydemir M. E. (2021). Determination of some minerals and heavy metal levels in Urfa cheese and cow's milk. *Food and Health*, *7*(3), 185-193.
4. Amelia I., Drake M., A., Nelson B., Barbano D. M. (2013). A new method for the production of low-fat Cheddar cheese. *Journal of Dairy Science*, 96(8), 4870-84.
5. Anderson D., Mistry V., Brandsma R., Baldwin K. (1993). Reduced fat Cheddar cheese from condensed milk. 1. Manufacture, composition, and ripening. *Journal of Dairy Science*, 76, 2832-2844.
6. Anderson J. (1999). Impact of nondigestible carbohydrates on serum lipoproteins and risk for cardiovascular disease. *Social Nutrient*, 129, 14575–14665.
7. AOAC International. Official Methods of Analysis, 18th ed.; AOAC International: Gaithersburg, MD, USA, 2007.
8. Ayyash M., Sherkat M., Shah N., P. (2012). The effect of NaCl substitution with KCl on Akawi cheese: Chemical composition, proteolysis, angiotensin-converting enzyme-inhibitory activity, probiotic survival, texture profile and sensory properties. *Journal of Dairy Science*, 95, 4747-4759.
9. Bae I., Park J., H., Choi H., Y., Jung H. K. (2017). Emerging Innovations to Reduce the Salt Content in Cheese; Effects of Salt on Flavor, Texture, and Shelf Life of Cheese; and Current Salt Usage: A Review. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 37(6), 793-798.
10. Baghdadi F., Aminifar M., Farhoodi M., Shojaee Ali Abadi S. (2018). Study of macromolecular interactions in low-fat brined cheese modified with Zedu gum. *International Journal of Dairy Technology*, 71, 382-394.
11. Balejko J., A., Balejko E. (2011). Porównanie wyników instrumentalnej i sensorycznej analizy tekstury wybranych gatunków serów. *Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis, Agricultura, Alimentaria, Piscaria et Zootechnica*, 290(20), 5-16.

12. Banks J. M, Hunter E. A., Muir D. D. (1993). Sensory properties of low-fat Cheddar cheese: effect of salt content and adjunct culture. *International Journal of Dairy Technology,* 46(4), 119-123.
13. Banks J. M. (2004). The technology of low-fat cheese manufacture. *International Journal of Dairy Technology,* 57(4), 199-207.
14. Banks J. M. (2007). What general factors affect the texture of hard and semi-hard cheeses? *Boca Raton,* 200–201.
15. Baranowska W. (2020). Spożywcze Technologie. Jak powstają sery? Poznajmy technologię produkcji sera podpuszczkowego. https://www.spozywczetechnologie.pl/mleko/produkcja/413/jak-powstaja-sery-poznajmy-technologie-produkcji-sera-podpuszczkowego (5.12.2023).
16. Bayarri S., Carbonell I., Costell E. (2012). Viscoelasticity and texture of spreadable cheeses with different fat contents at refrigeration and room temperatures. *Journal of Dairy Science,* 95(12), 6926-6936.
17. Bonczar G., Wszołek M., Walczycka M., Żebrowska A., Maciejowski K. (2011). Wpływ wybranych czynników na aktywność wody i jakość mikrobiologiczną miękkich serów z mleka owczego. *ŻYWNOŚĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 3 (76), 98-108.
18. Borges J. V., de Souza J. A., Fagnani R. (2019). Reduced fat Frescal sheep milk cheese with inulin: a first report about technological aspects and sensory evaluation. *Journal of Dairy Research,* 86, 368-373.
19. Bortkun O. (2002). Sacharydy i substancje słodzące w produkcji żywności. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny*, Cz. 1: 41; Cz. 2: 4, 17; Cz. 3: 5, 16.
20. Bot, A., Erle, U., Vreeker, R., Agterof, W., G., M. (2004). Influence of crystallisation conditions on the large deformation rheology of inulin gels. *Food Hydrocolloids,* 18, 547–556
21. Bourne, M. C. (1978). Texture profile analysis. *Food Technology*, 32, 62- 66, 72.
22. Brennan C. S., Tudorica C. M. (2008). Carbohydrate-based fat replacers in the modification of the rheological, textural and sensory quality of yoghurt: comparative study of the utilisation of barley beta-glucan, guar gum and inulin. *International Journal of Food Science and Technology,* 43, 824–833.

23. Broadbent J. R., McMahon D., J, Oberg C., J., Welker D., L. (2001). Use of exopolysaccharide-producing cultures to improve the functionality of low fat cheese. *International Dairy Journal*, 11, 433–439.
24. Brown. J., A, Foegeding E., A., Daubert C., R., Drake M., A., Gumpertz M. (2003). Relationships Among Rheological and Sensoria Properties of Young cheeses. *Journal of Dairy Science*, 86, 3054-3067.
25. Bryant A., Ustunol Z., Steffe J. (1995). Texture of Cheddar Cheese as Influenced by Fat Reduction. *Journal of Food Science*, 60, 1216-1219.
26. Bullens Ch., Krawczyk G., Geithman L. (1994). Reduced-fat cheese products using carrageenan and microcrystalline cellulose. *Food Technology*, 1, 79-80.
27. Cardarelli H. R, Buriti F. C. A, Castro I. A., Saad S. M. I. (2008). Inulin and oligofructose improve sensory quality and increase the probiotic viable count in potentially synbiotic petit-suisse cheese. *LWT – Food Science and Technology*, 41, 1037–1046.
28. Childs, J. L., Drake, M. (2009). Consumer perception of fat reduction in cheese. *Journal of Sensory Studies*, *24*(6), 902-921.
29. Cichosz G., Konopka A., Zalecka A. (2005). Dojrzewanie sera Gouda-monitoring z zastosowaniem metody odwoławczej i metod alternatywnych. *ŻYWNOŚĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 4(45), 52 – 61.
30. Cieślik E., Gębusia A. (2011). Żywność funkcjonalna z dodatkiem fruktanów. *ŻYWNOŚĆ. Nauka. Technologia, Jakość,* 2, 27–37.
31. Ciółkowska A., Gustaw W. (2012). Przemiany proteolityczne podczas dojrzewania serów. *Przegląd Mleczarski*, 7, 5-7.
32. Codex Alimentarius. Milk and Milk Products (2011): *Codex General Standard for Cheese,* FAO/WHO, (z późniejszymi zmianami).
33. Coudray C., Bellanger J., Castiglia-Delavaud C., Rémésy C., Vermorel M., Rayssignuier Y. (1997). Effect of soluble or partly soluble dietary fibre supplementation on absorption and balance of calcium, magnesium, iron and zinc in healthy young men. *European Journal of Clinical Nutrition*, 51, 375–380.
34. Creamer L., Olson N. (1982). Rheological Evaluation of Maturing Cheddar Cheese. *Journal of Food Science*, 47, 632-636.
35. Crupi R., Lo Turco V., Gugliandolo E., Nava V., Potorti A. G, Cuzzocrea S., Di Bella G., Licata P. (2022). Mineral composition in delactosed dairy products: quality and safety status. *Foods*, 11, 139.

36. Czuba A i Starkowski M. T. (2020), Fakt. Polska jest w tym potęgą! https://www.fakt.pl/pieniadze/za-miastem/jak-produkowane-sa-polskie-sery-jestesmy-w-tym-potega/k6c5n39 (5.12.2023).
37. Deetae P., Bonnarme P., Spinnler H., Helinck S. (2007). Production of volatile aroma compounds by bacterial strains isolated from different surface-ripened French cheeses. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 76, 1161-1171.
38. Desmond E. (2006). Reducing salt: A challenge for the meat industry. *Meat Science*, 74, 188-196.
39. Di Cagno R., De Pasquale I., De Angelis M., Buchin S., Rizzello C.G, Gobbetti M. (2014). Use of microparticulated whey protein concentrate, exopolysaccharide-producing Streptococcus thermophilus, and adjunct cultures for making low-fat Italian Caciotta-type cheese. *Journal of Dairy Science*, 97(1), 72-84.
40. Diamantino V. R., Beraldo F. A., Sunakozawa T. N., Penna A. L. B. (2014). Effect of octenyl succinylated waxy starch as a fat mimetic on texture, microstructure and physicochemical properties of Minas fresh cheese. *LWT-Food Science and Technology*, 56, 356-362.
41. Dolik K., Kubiak M. S., Seńcio M. (2010). Analizator do pomiaru tekstury TMS-Pro – zasada działania i zastosowanie w badaniach produktów spożywczych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 56(6), 636-639.
42. Domingos L. D., Lima de Souza H. A., Barros Mariutti L. R., de Toledo Benassi M., Bragagnolo N., Hanada Viotto W. (2019). Fat reduction and whey protein concentrate addition alter the concentration of volatile compounds during Prato cheese ripening. *Food Research International*, 119, 793-804.
43. Drake M., Chen X., Gerard P., Gurkin S. (1998). Composition and quality attributes of reduced-fat cheese as affected by lecithin type. *Journal of Food Science*, 63(6), 1018-1023.
44. Drake M., Swanson B. (1995). Reduced- and low-fat cheese technology: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 6, 366–369.
45. Drewnowski A. (1998). Energy density, palatability, and satiety: Implications for weight control. *Nutrition Reviews*, 56, 12, 347–353.
46. Eck A., Gillis J. (2000). Cheesemaking. From science to quality assurance. *Lavoisier Publishing Paris*.
47. El Soda M. (1993). The role of lactic acid bacteria in accelerated cheese ripening. *FEMS Microbiology Reviews*, 12 (1-3), 239-252.

48. Emmons D., Kalab M., Larmond E., Lowrie R. (1980). Milk gel structure. X. Texture and microstructure in Cheddar cheese made from whole milk and from homogenized low-fat milk. *Journal of Texture Studies,* 11, 15-34.
49. Fadaei V., Poursharif K., Daneshi M., Honarvar M. (2012). Chemical characteristics of low-fat wheyless cream cheese containing inulin as fat replacer. *European Journal of Experimental Biology,* 2, 690–694.
50. Fenelon M., Guinee T. P. (1997). The compositional, textural andmaturation characteristics of reduced-fat Cheddar made from milk containing added Dairy-Lo TM. *Milchwissenschaft,* 52, 385–389.
51. Fenelon M., Guinee T., Reville W. (1999). Characteristics of reduced–fat Cheddar prepared from the blending of full – and skim cheese curds at whey drainage. *Milchwissenschaft,* 54(9), 506-510.
52. Fenelon M., O'Connor P., Guinee. T.P. (2000). The Effect of Fat Content on the Microbiology and Proteolysis in Cheddar Cheese During Ripening, *Journal of Dairy Science,* 83(10), 2173-83.
53. Fenelon M., A., Giunee T., P. (2000). Primary proteolysis and textural changes during ripening in Cheddar cheeses manufactured to different fat contents. *International Dairy Journal,* 10, 151-158.
54. Foegeding E. A., Brown J., Drake M. A., Daubert C. R. (2003). Sensory and mechanical aspects of cheese texture. *International Dairy Journal*, 13(8), 585 - 591.
55. Fox P. F., Guinee T. P. (2013). Cheese Science and Technology, *Milk and Dairy Products in Human Nutrition: Production, Composition and Health.* Red. Park Y.W. Haenlein G.F.W., Wiley-Blackwell Publishers, Oxford, UK, 357-386.
56. Fox P., F. Guinee T., P, Cogan T., M. McSweeney P., L., H. (2000). *Fundamentals of Cheese Sciences*. Gaithershurg, Maryland: Aspen Publication.
57. Fox P., F., McSweeney P., L., H., Cogan T., M., Guinee T., P. (2004). Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology, 1, 1-617.
58. Frétin M., Martin B., Buchin S., Desserre B., Lavigne R., Tixier E, Cirié C., Bord C., Montel M. C., Delbès C., Ferlay A. (2019). Milk fat composition modifies the texture and appearance of Cantal-type cheeses but not their flavor. *Journal of Dairy Science,* 102(2), 1131-1143.
59. Giese J. (1996). Fats, oils and fat replacers. *Food Technology,* 4, 78-83.

60. Glibowski P., Bukowska A. (2011). The effect of ph, temperature and heating time on inulin chemical stability. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 10/2, 189-196.
61. Grabarczyk D. 2024. Rynek Mleka, 01/24. https://pfhb.pl/fileadmin/aktualnosci/2024/2/Raport_styczen_2024.pdf (12.02.2024).
62. Grabarczyk D.2024. Rynek Mleka, 02/24. https://pfhb.pl/fileadmin/aktualnosci/2024/3/Raport_luty_2024.pdf /(11.03.2024).
63. Guinee T. P., Auty M. A. E., Fenelon M. A. (2000). The effect of fat content on the rheology, microstructure and heat-induced functional characteristics of Cheddar cheese. *International Dairy Journal*, 10, 277-288.
64. Gulla S., Waghray K. (2011). Effect of storage on physico-chemical characteristics and fatty acid composition of selected oil blends. *Journal Life Science*, 3(1): 35-46.
65. Hauque Z., Kucukoner E., Aryana K. (1997). Aging-induced changes in populations of Lactococci, Lactobacilli, and aerobic microorganisms in low-fat and full-fat Cheddar cheese. *Journal of Food Protection*, 60(9), 1095-1098.
66. Heldrich K. 1990. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists. Association of Official Analytical Chemists, Inc., Arlington.
67. Hicket D. K., Guinee T. P., Hou J., Wilkinson M. G. (2013). Effect of variation in cheese composition and maturation on water activity in Cheddar cheese during ripening. *International Dairy Journal*, 30, 53-58.
68. Hicks C. L., O'Leary J., Holbrook J. (1985). Effect of lecithin on cheese yield. *Journal of Dairy Science*, 68, 1603-1607.
69. Holland B., Welch A. A., Unwin I. D., Buss D. H., Paul, A. A., Southgate D. A. T. (1995). The Composition of Foods, 5th Edition. London: Royal Society of Chemistry and Ministry of Agriculture, Fisheries and Food.
70. Ibáñez R. A., Govindasamy-Lucey S., Jaeggi J. J., Johnson M. E., McSweeney P. L. H., Lucey J. A. (2020). Low- and reduced-fat milled curd, direct-salted Gouda cheese: Comparison of lactose standardization of cheese milk and whey dilution techniques. *Journal of Dairy Science*, 103,1175–1192.
71. Ibrahim, G. A., Mehanna, N. S., Gad El-Rab, D. (2004). Preparation and properties of set fermented milk containing inulin and different probiotics. In 9th Egyptian Conference for Dairy Science & Technology ,117–132.
72. IDF Standard 182:1999

73. Illingworth D., Patil G. R., Tamime A. Y. (2009). Anhydrous Milk Fat Manufacture and Fractionation. *Dairy Fats and Related Products.* Red. Tamime A.Y., Willey-Blackwel, USA, 115-116.
74. ISO 8070: 2007, IDF 119: 2007, Milk and milk products -Determination of calcium, sodium, potassium and magnesium contents-Atomic absorption spectrometric method.
75. Jones A., Zhang S., Akoh C. C., Martini S. (2023). Effect of anhydrous milk fat fraction addition to butter on water loss reduction. *International Dairy Journal*, 141, 105618.
76. Juan B., Zamora A., Quintana F., Buenaventura G., Trujillo A. J. (2013). Effect of inulin addition on the sensorial properties of reduced-fat fresh cheese. *International Journal of Dairy Technology*, 66(4), 478-483.
77. Karaca, O. B., Güven, M., Yasar, K., Kaya, S., & Kahyaoglu, T. (2009). The functional, rheological and sensory characteristics of ice creams with various fat replacers. *International Journal of Dairy Technology*, 62, 93–99.
78. Kalyani, N., K., Kharb, S., Thompkinson, D., K. (2010). Inulin dietary fiber with functional and health attributes. A review. *Food Reviews International*, 26, 189–203.
79. Karimi R., Azizi M., H., Ghasemlou M., Vaziri M. (2014). Application of inulin in cheese as prebiotic, fat replacer and texturizer: A review. *Elsevier, Carbohydrate Polymers*, 119, 85-100.
80. Katsiari M., C. Voutsinas L., P. (1994). Manufacture of lowfat Kefalograviera cheese. *International Dairy Journal*,*4*, 533-553.
81. Kahyaoglu T., Kaya S., Kaya A. (2005). Effect of fat reduction and curd dipping temperature on viscoelasticity, texture and appearance of Gaziantep cheese. *Food Science and Technology International*, 11, 191–198.
82. Koca N, Metin M. (2004). Textural, melting and sensory properties of low-fat fresh Kashar cheese produced by using fat replacers. *International Dairy Journal,* 14, 365-373.
83. Kocer D., Hicsasmaz Z., Bayindirli A., Katnas S. (2007). Bubble and pore formation of the high-ratio cake formulation with polydextrose as a sugar- and fat-replacer. *Journal of Food Engineering,* 78, 953–964.

84. Kondyli E., Massouras T., Katsiari M. C., Voutsinas L. P. (2003). Free fatty acids and volatile compounds in low-fat Kefalograviera-type cheese made with commercial adjunct cultures. *International Dairy Journal*, 13(1), 47-54.
85. Krejpcio Z., Wójciak R., Staniek H., Wiśniewska J., 2009, Wpływ suplementacji diety fruktanami typu inuliny i chromem (III) na wskaźniki gospodarki magnezem u szczura. *ŻYWNOŚĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 4, (175–182).
86. Krishna K. N., i Ghosh B. C. (2019). Development of reduced fat cream cheese by using inulin and WPC as a fat replacer. *Indian Journal of Dairy Science*, 72(6), 590-598.
87. Kuchroo C. N, Fox P. F. (1982). Fractionation of the water-soluble nitrogen from Cheddar cheese: chemical methods. *Milchwissenschaft*, 37, 561.
88. Kusiuk A., Trembecka M., Szefer P. (2009). Wzajemne relacje stężeń Ca i P w serach źródłem prawidłowo zbilansowanej diety. *Bromatologia i Chemia Toksykologiczna*, XLII, 3, 798-802.
89. Kwak H. S., Jung C. S., Shim S. Y. and Ahn J. (2002). Removal of cholesterol from cheddar cheese by β-cyclodextrin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 7293–7298.
90. Kycia K. (2008). Czynniki kształtujące teksturę serów topionych, *ŻYWNOŚĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 3(58), 5-17.
91. Lawrence R., Creamer M., Gilles J. (1987). Texture development during cheese ripening. *Journal of Dairy Science*, 70, 1748–1760.
92. Legg A. K., Carr A. J., Bennett R. J., Johnston K. A. (2017). General Aspects of Cheese Technology, *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology*. red. McSweeney P.L.H., Fox P.F., Cotter P.D., Everett D.W., Academic Press, 643-675.
93. Li H., Yu H., Liu Y., Wang Y., Li H., Yu J. (2019). The use of inulin, maltitol and lecithin as fat replacers and plasticizers in a model reduced-fat mozzarella cheese-like product. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(12), 5586-5593.
94. Liu H., Xu X., Guo S. (2008). Comparison of full-fat and low-fat cheese analogues with or without pectin gel through microstructure, texture, rheology, thermal and sensory analysis. *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 1581-1592.
95. Lucey J. A., Johnson M. E., Horne D. S. (2003). Invited Review: Perspectives on the Basis of the Rheology and Texture Properties of Cheese. *Journal of Dairy Science*, 86, 2725–2743.

96. Ma L., Drake M., Barbosa - Canovas G., Swanson B. (1997). Rheology of full-fat and low-fat Cheddar cheese as related to type of fat mimetics. *Journal of Food Science*, 62(4), 748-751.
97. Mackey K. L., Desai N. (1995). Rheology of reduced-fat cheese containing a fat substitute. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 367, 21-6.
98. Małkowska M., Staniewski B., Ziajka J. (2021). Analyses of milk fat crystallization and milk fat fractions. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 325-336.
99. Małkowska-Kowalczyk M., Tarapata J., Żulewska J. (2023). Innowacyjne technologie w serowarstwie, *Przegląd Mleczarski*, 9, 34-41.
100. Mariańczuk Z., Michalak S., Kowczyk-Sadowy M. (2020). Badanie tekstury wybranych serów podpuszczkowych (w:) Wybrane zagadnienia z zakresu przemysłu spożywczego oraz zarządzania i inżynierii produkcji. Tom I. Środowisko – Roślina – Zwierzę – Produkt. Red. Babicz M. i Kropiwiec - Domańska K. WUP, Lublin, 48-59.
101. McCarthy C. M., Wilkinson M. G., Kelly P. M., Guinee T. P. (2015). Effect of salt and fat reduction on the composition, lactose metabolism, water activity and microbiology of Cheddar cheese. *Dairy Science Technology*, 95,587-611.
102. McSweeney P. (1997). The flavour of milk and dairy products: Cheese: Taste. *International Journal of Dairy Technology*, 50, 123-128.
103. McSweeney P. (2004). Biochemistry of cheese ripening. *International Journal of Dairy Technology*, 57(2-3), 127-144.
104. McSweeney P., Sousa M. J. (2000). Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening: A review. *Lait*, 80, 293–324.
105. Metzger L. E., Barbano D. M., Kindstedt P. S., Guo M. R. (2001). Effect of Milk Preacidification on Low Fat Mozzarella Cheese: II. Chemical and Functional Properties During Storage. *Journal of Dairy Science*, 84(6), 1348-1356.
106. Metzger L., Mistry V. (1994). A new approach using homogenization of cream in the manufacture of reduced-fat Cheddar cheese. 1. Manufacture, composition, and yield. *Journal of Dairy Science*, 77(12), 3506-3515.
107. Meyer, D., Bayarri, S., Tárrega, A., Costell, E. (2011). Inulin as texture modifier in dairy products. *Food Hydrocolloids*, 25, 1881–1890
108. Mistry V. V. (2001). Low fat cheese technology. *International Dairy Journal*, 11, 413-422.

109. Mistry V. V. Maubois. J. L. (2017). Application of Membrane Separation Technology to Cheese Production. *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology*, red. McSweeney P.L.H., Fox P.F., Cotter P.D., Everett D.W. Academic Press, 677-697.
110. Mistry V. V., Kasperson K. M. (1998). Influence of Salt on the Quality of Reduced Fat Cheddar Cheese. *Journal of Dairy Science*. 81(5), 1214-1221.
111. Mistry V. V. Metzger L. E, Maubois J. L. (1996). Use of Ultrafiltered Sweet Buttermilk in the Manufacture of Reduced Fat Cheddar Cheese. *Journal of Dairy Science*, 79(7), 1137-1145.
112. Mistry V.V, Anderson D. L. (1993). Composition and microstructure of commercial full-fat and low-fat cheeses. *Food Structure, 12*(2), 13.
113. Modzelewska-Kapituła M., Kłębukowska L. (2009). Investigation of the potential for using inulin HPX as a fat replacer in yoghurt production. *International Journal of Dairy Technology*, 62, 209–214.
114. Moghiseh N., Arianfar A., Salehi E. A., Rafe A. (2021). Effect of inulin/kefiran mixture on the rheological and structural properties of mozzarella cheese. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 1079-1086.
115. Myhan R., Jeliński T, Białobrzewski I, Sadowska J, Jachimczyk E. (2020). The effect of milk fat substitution on the rheological properties of Edam-type cheese. *European Food Research and Technology*, 246, 1438-2377.
116. Nadeem M., Situ C., Abdullah M. (2015). Effect of olein fractions of milk fat on oxidative stability of ice cream. *International Journal of Food Properties*, 18, 73-745.
117. Nauth K., Ruffie D. (1995). Microbiology and Biochemistry of Reduced-Fat Cheese. In: Chemistry of Structure-Function Relationships in Cheese, Plenum Press, New York, 345-358.
118. Nelson K., Barbano D. M. (2005). Yield and Aging of Cheddar Cheeses Manufactured from Milks with Different Milk Serum Protein Contents. *Journal of Dairy Science*, 88, 4183–4194.
119. Nair K. K, Kharb S., Thompkinson D. K. (2010). Inulin Dietary Fiber with Functional and Health Attributes-A Review. *Food Reviews International*, 26(2), 189–203.

120. Ningtyas D., W., Bhandari B., Bansal N., Prakash S. (2017). A tribological analysis of cream cheeses manufactured with different fat content. *International Dairy Journal,* 73, 155-165.
121. Nishinari K. Kohyama K., Kumagai H., Funami T., Bourne M. C. (2013). Parameters of Texture Profile Analysis. *Food Science and Technology Research,* 19(3), 519-521.
122. Pagliarini E., Beatrice N. (1994). Sensory and rheological properties of low-fat filled „pasta filata" cheese. *Journal of Dairy Research*, 61, 299-304.
123. Paseephol T., Small D.,M., Sherkat F. (2008). Rheology and texture of set yogurt as affected by inulin addition. *Journal of Texture Studies,* 39, 617–634.
124. Paximada P., Howarth M., Dubey B. N. (2021). Double emulsions fortified with plant and milk proteins as fat replacers in cheese. *Journal of Food Engineering*, 288, 110229.
125. Pluta A. (2008). Badania nad otrzymywaniem serów typu holenderskiego o zmniejszonej zawartości tłuszczu. Rozprawa habilitacyjna. *Wydawnictwo SGGW,* Warszawa.
126. Pluta A. (2009). Sery podpuszczkowe o zmniejszonej zawartości tłuszczu. *Przemysł Spożywczy*, 10(63), 14 -20.
127. PN- ISO 11036:1999. Analiza sensoryczna. Metodologia. Profilowanie tekstury.
128. PN-ISO 22935-3. 2013. Mleko i przetwory mleczne. Analiza sensoryczna.
129. Praska Giełda Spożywcza, Rynek serów w Polsce z mocna pozycją. https://www.praskagieldaspozywcza.pl/rynek-serow-w-polsce-z-mocna-pozycja/, (12.02.2024).
130. Raport ING. Sytuacja rynkowa na świecie. https://www.ing.pl/spolki/raporty-agro/2024-02-mleko/ (12.02.2024).
131. Rodriguez J. (1998). Recent advances in the development of low-fat cheeses. *Trends in Food Science and Technology*, 9: 249- 254.
132. Rodríguez-García J., Salvador A., Hernando I. (2014). Replacing fat and sugar with inulin in cakes: bubble size distribution, physical and sensory properties. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 964–974.
133. Rogers N. R., Drake M. A., Daubert C. R., McMahon D. J., Bletsch T. K., Foegeding E.A. (2009). The effect of aging on low-fat, reduced-fat, and full-fat Cheddar cheese texture. *Journal of Dairy Science*, 92, 4756-4772.

134. Romeih E., A, Michaelidou A., Biliaderis C., G., Zerfiridis G., K. (2002). Low-fat white-brined cheese made from bovine milk and two commercial fat mimetics: chemical, physical and sensory attributes. *International Dairy Journal*, 12, 525-540.
135. Rozporządzenie (WE) nr 1924/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 grudnia 2006 r.
136. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego Nr 1924/2006 z 20 grudnia 2006.
137. Rudan M. A., Barbano D. M., Yun J. J, Kindstedt P. S. (1999). Effect of fat reduction on chemical composition, proteolysis, functionality and yield of Mozzarella cheese. *Journal of Dairy Science*, 82(4), 661-72.
138. Rutkowska E., Tambor K., Rutkowska J., Stołyhwo A. (2015). Charakterystyka prozdrowotnych kwasów tłuszczowych tłuszczu mlecznego. *Problemy Higieny i Epidemiologii*, 96(2), 377-386.
139. Sahan N., Yasar K., Hayaloglu A. A., Karaca O.B., Kaya A. (2008). Influence of fat replacers on chemical composition, proteolysis, texture profiles, meltability and sensory properties of low-fat Kashar cheese. *Journal of Dairy Research*, 75(1), 1-7.
140. Sharafi S., Nateghi L., Orang Eyvazzade O., Ebrahimi M. T. A. (2020). The physicochemical, texture hardness and sensorial properties of ultrafiltrated low-fat cheese containinggalactomannan and novagel gum. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 19(1), 83-100.
141. Sheibani A., Ayyash M. M., Shah N. P. (2015). The effects of salt reduction on characteristics of hard type cheese made using high proteolytic starter culture. *International Food Research Journal*, 22(6), 2452-2459.
142. Schenkel P., Samudrala R., Hinrichs J. (2011). Fat-reduced semi-hardcheese enriched with a microparticulated whey protein concentrate:impact on cheese-making properties and rheological characteristics. *Milchwissenschaft*, 66. 43–47
143. Schenkel P., Samudrala R., Hinrichs J. (2013). The effect of adding whey protein particles as inert filler on thermophysical properties of fat-reduced semihard cheese type Gouda. *International Journal of Dairy Technology*, 66(2), 220-230.
144. Sleator R. D., Hill C. (2007). Probiotics as therapeutics for the developing world, *Journal of Infection in Developing Countries*, 1, 7-12.
145. Smoczyński M. (2014). Hipotezy tworzenia i funkcje składników kuleczek. *Medycyna Weterynaryjna*, 70(4), 214-218.

146. Smoczyński M. (2020). Fractal analysis of the microstructure of milk powders produced at various temperatures. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 2303–2309.
147. Soltani M., Saremnezhad S, Faraji A. R., Hayaloglu A. A. (2022). Perspectives and recent innovations on white cheese produced by conventional methods or ultrafiltration technique, *International Dairy Journal,* 125, 105232.
148. Staniewski B. (2001). Metody modyfikacji składu i właściwości tłuszczu mlekowego. Część I. Metody biologiczne i chemiczne. *Ogólnopolski Informator Mleczarski*, 3, 2-8.
149. Stankey J. A., Lu Y., Abdelmoneim A., Govindasamy-Lucey S., Jaeggi J. J., Mikkelsen B., Pedersen K. T., Andersen C. B. (2017). Low-fat Cheddar cheese made using microparticulated whey proteins: Effect on yield and cheese quality. *International Journal of Dairy Technology,* 70, 481-491.
150. Statistica (version 13.1, 1984-2016, StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA).
151. Stępniak L. (1998). Tłuszcz mleczny modyfikowany. *Przemysł Spożywczy,* 11, 1-2.
152. Surówka K. (2002). Tekstura żywności i metody jej badania. *Przemysł Spożywczy*, 10, 12-17.
153. Szosland-Fołtyn A. (2008). Lody synbiotyczne - zastosowanie probiotyków i prebiotyków. *Przegląd Piekarski i Cukierniczy*, 2, (96-97)
154. Tavaria F., Dahl S., Carballo F., Malcata F. (2002). Amino acid catabolism and generation of volatiles by lactic acid bacteria. *Journal of Dairy Science*, 85, 2462–2470.
155. TetraPak (2013). Dairy Technology and Technology. TetraPak Sp. z o.o., Warsaw.
156. Tomaszewska-Gras J., Cais-Sokolińska D., Bierzuńska P., Kaczyński Ł. K., Walkowiak K., Baranowska H. M. (2019). Behaviour of water in different types of goats' cheese. *International Dairy Journal*, 95, 18-24.
157. Tungland B., C., Meyer D. (2002). Nondigestible oligo- and polysaccharides(dietary fiber): their physiology and role in human health and food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* 1, 90–109.
158. Tunick M. L., Malin E. L., Smith P. W., Shieh J. J., Mackey K. L., Holsinger V. H. (1993). Proteolysis and rheology of low fat and full fat Mozzarella cheeses prepared from homogenized milk. *Journal of Dairy Science*, 76, 3621-3628.

159. Twój Portal Rolniczy, https://www.gospodarz.pl/aktualnosci/przetworstwo-spozywcze/produkcja-serow-podpuszczkowych-dojrzewajacych-w-polsce-2.html (12.07.2022).
160. Ullah R., Nadeem M., Imran M., Khan J., T., Shahbaz M., Mahmud A., Tayyab M. (2017). Omega fatty acids, phenolic compounds, and lipolysis of Cheddar cheese supplemented with chia (*Salvia hispanica L.)* oil. *Journal of Food Processing and Preservatio,* 42 (3).
161. Urgu M., Türk A., Ünlütürk S., Kaymak-Ertekin F., Koca N. (2019) Milk Fat Substitution by Microparticulated Protein in Reduced-fat Cheese Emulsion: The Effects on Stability, Microstructure, Rheological and Sensory Properties. *Food Science of Animal Resources,* 39(1), 23-34.
162. Van Vliet T., van Aken G., Harmen H J., de Jongh H., Hamer R. J. (2009). Colloidal aspects of texture perceptions. *Advances in Colloid and Interface Science,*150, 27-40.
163. Verdi R. J., Barbano D. M., Dellavalle M. E., Senyk G. F. (1987). Variability in true protein, casein, nonprotein nitrogen, and proteolysis in high and low somatic cell milks. *Journal of Dairy Science*, 70, 230-242.
164. Verhagen H., Vos E., Francl S., Heinonen M., van Loveren H. (2010). Status of nutrition and health claims in Europe. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 150(1), 27-40.
165. Volikakis P., Biliaderis C. G., Vamvakas C., Zerfiridis G. K. (2004). Effects of a commercial oat-β-glucan concentrate on the chemical, physico-chemical and sensory attributes of a low-fat white-brined cheese product. *Food Research International,* 37, 1, 83-94.
166. Wierzbicka A., Biller E., Plewicki T. (2003). Wybrane aspekty inżynierii żywności w tworzeniu produktów spożywczych. *Wydawnictwo SGGW,* Warszawa.
167. Ziarno M., Zaręba D. (2013). Dodatki funkcjonalne do serów kwasowych i podpuszczkowych. Forum Mleczarskie Biznes, 16 https://www.forummleczarskie.pl/raporty/481,dodatki-funkcjonalne-do-serow?strona=2 (10.01.2024).
168. Ziarno M., Zaręba D. (2017). Nowe wyzwania w produkcji serów podpuszczkowych. Forum Mleczarskie Biznes 1 (27) https://www.forummleczarskie.pl/raporty/763,produkcja-serow-podpuszczkowych (9.01.2024).

169. https://www.alpma.co.uk/process-technology/creamoprot.html / (12.08.2023).
170. https://www.sciencedirect.com/topics/food-science/fat-replacers/, (12.11.2023).

9. SPIS TABEL, RYSUNKÓW I FOTOGRAFII

Numer	Tytuł	Strona
TABELE		
Tabela 1.	Produkcja mleka oraz produkcja serów ogółem w Polsce i wybranych krajach Unii Europejskiej (styczeń - grudzień 2023).	8
Tabela 2.	Wpływ redukcji zawartości tłuszczu na cechy jakościowe serów.	23
Tabela 3.	Definicja sensoryczna i instrumentalna parametrów tekstury (Bourne, 1978).	31
Tabela 4.	Skład chemiczny serów deklarowany przez producentów na jednostkowych opakowaniach produktów (wartości odżywcze podane są w przeliczeniu na 100 g produktu).	35
Tabela 5.	Definicje wyróżników tekstury oraz techniki oceny sensorycznej badanych serów.	40
Tabela 6.	Wyniki oceny sensorycznej serów referencyjnych: Parmigiano Reggiano (PR), Mozzarella (M), Grand Gouda (GG), Cheddar (C).	41
Tabela 7.	Skład fizykochemiczny (n= 3) i właściwości fizykochemiczne serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG).	44
Tabela 8.	Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG).	45
Tabela 9.	Średnia (n=3) zawartość składników mineralnych w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG).	50
Tabela 10.	Średnia (n=3) zawartość związków azotowych: WSN-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), TCA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), PTA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen,, TN) w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG).	56
Tabela 11.	Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami, parametrami fizykochemicznymi a wskaźnikami proteolizy w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu i serze kontrolnym.	57
Tabela 12.	Profil kwasów tłuszczowych w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG).	60
Tabela 13.	Wyniki analizy fraktalnej serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG).	64

Tabela 14.	Średnie (n=3) wartości parametrów tekstury TPA w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG).	68
Tabela 15.	Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami, parametrami fizykochemicznymi i wskaźnikami proteolizy a parametrami tekstury w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu i w serze kontrolnym.	69
Tabela 16.	Średnie wartości (n=10) oceny sensorycznej w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG).	72
Tabela 17.	Skład fizykochemiczny (n=3) serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) i bez dodatku (MP) oraz w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	78
Tabela 18.	Średnia (n=3) zawartość składników mineralnych w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	83
Tabela 19.	Średnia (n=3) zawartość związków azotowych: WSN-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), TCA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), PTA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolfromowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	89
Tabela 20.	Profil kwasów tłuszczowych serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) po 8 tygodniach dojrzewania.	90
Tabela 21.	Wyniki analizy fraktalnej serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz sera kontrolnego (SK) po 8 tygodniach dojrzewania.	93
Tabela 22.	Średnie (n=3) wartości parametrów tekstury TPA w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	98
Tabela 23.	Dwu-czynnikowa analiza wariancji dla parametrów jakościowych serów produkowanych z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z lub bez inuliny poddanych dojrzewaniu przez okres 8 tygodni.	99
Tabela 24.	Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami, parametrami fizykochemicznymi, wskaźnikami proteolizy a parametrami tekstury serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK).	103

Tabela 25.	Średnie (n=10) wartości oceny sensorycznej serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz sera kontrolnego (SK) po 8 tygodniach dojrzewania.	108
Tabela 26.	Skład fizykochemiczny (n=3) serów z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serów z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	110
Tabela 27.	Średnia (n=3) zawartość składników mineralnych w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniach dojrzewania.	115
Tabela 28.	Średnia (n=3) zawartość związków azotowych: zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (WSN-TN), zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12%TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (TCA-TN), zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA(kwas fosforowoplfromowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (PTA-TN) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniach dojrzewania.	117
Tabela 29.	Profil kwasów tłuszczowych w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniach dojrzewania.	120
Tabela 30.	Wyniki analizy fraktalnej w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniu dojrzewania.	122
Tabela 31.	Średnie (n=3) wartości parametrów tekstury TPA w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	127
Tabela 32.	Dwu-czynnikowa analiza wariancji dla parametrów jakościowych serów produkowanych z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w 20^{o}C i 30^{o}C.	129
Tabela 33.	Współczynnik korelacji pomiędzy składnikami, parametrami fizykochemicznymi i wskaźnikami proteolizy a parametami tekstury w serach z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20) i 30^{o}C (FR30).	129
Tabela 34.	Średnie (n=10) wartości oceny sensorycznej w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) po 28 dniach dojrzewania.	142

RYSUNKI		
Rysunek 1.	Struktura produkcji poszczególnych kategorii serów w Polsce w 2023 roku.	9
Rysunek 2.	Plan badań pracy.	33
Rysunek 3.	Skład chemiczny (woda, tłuszcz, białko) serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG).	42
Rysunek 4.	Właściwości fizykochemiczne serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (GG).	47
Rysunek 5.	Zawartość składników mineralnych w serach o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG).	49
Rysunek 6.	Zawartość związków azotowych: WSN-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie (ang. Water Soluble Nitrogen) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), TCA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN), PTA-TN - zawartość związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolframowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen,, TN) w serach komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i serze kontrolnym (GG).	53
Rysunek 7.	Zmiany zawartości wody w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	75
Rysunek 8.	Zmiany zawartości tłuszczu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	75
Rysunek 9.	Zmiany zawartości białka w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	76
Rysunek 10.	Zmiany zawartości soli w fazie wodnej sera (S/M) w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	77
Rysunek 11.	Zmiany aktywności wody sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	77
Rysunek 12.	Zmiany wartości pH sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz sera z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	79
Rysunek 13.	Zmiany zawartości wapnia w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	81

Rysunek 14.	Zmiany zawartości magnezu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	82
Rysunek 15.	Zmiany zawartości sodu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	82
Rysunek 16.	Zmiany zawartości potasu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	84
Rysunek 17.	Zmiany zawartości fosforu w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	84
Rysunek 18.	Zmiany zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w wodzie jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (WSN-TN) w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	86
Rysunek 19.	Zmiany zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w 12% TCA (kwas trichlorooctowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (TCA-TN) w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	86
Rysunek 20.	Zmiany zawartości związków azotowych rozpuszczalnych w 5% PTA (kwas fosforowolfromowy) jako procent azotu ogółem (ang. Total Nitrogen, TN) (PTA-TN) w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	87
Rysunek 21.	Zmiany twardości w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	93
Rysunek 22.	Zmiany adhezyjności w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	95
Rysunek 23.	Zmiany gumowatości w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	96
Rysunek 24.	Zmiany przeżuwalności w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	97

Rysunek 25.	Zmiany elastyczności w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serze z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych i inuliny (MPI) w czasie dojrzewania.	97
Rysunek 26.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu (%) a elastycznością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI).	101
Rysunek 27.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a elastycznością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI).	102
Rysunek 28.	Model zależności liniowej między zawartością pH (-) a twardością (g) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI).	104
Rysunek 29.	Model zależności liniowej między zawartością pH (-) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI).	104
Rysunek 30.	Model zależności liniowej między zawartością pH (-) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych (MP) oraz w serach z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych wraz z inuliną (MPI).	104
Rysunek 31.	Zmiany zawartości wody w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	109
Rysunek 32.	Zmiany zawartości tłuszczu w suchej masie w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	111
Rysunek 33.	Zmiany zawartości białka w suchej masie w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z	112

	dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	
Rysunek 34.	Zmiany zawartości soli w fazie wodnej sera (S/M) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	112
Rysunek 35.	Zmiany aktywności wody w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	113
Rysunek 36.	Zmiany wartości pH w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	113
Rysunek 37.	Zmiany parametru twardości w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	123
Rysunek 38.	Zmiany parametru adhezyjności w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	124
Rysunek 39.	Zmiany parametru gumowatości w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	124
Rysunek 40.	Zmiany parametru przeżuwalności w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	125
Rysunek 41.	Zmiany parametru elastyczności w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK) w czasie dojrzewania.	125
Rysunek 42.	Model zależności liniowej między zawartością wody (%) a sprężystością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	131
Rysunek 43.	Model zależności liniowej między zawartością białka (%) a sprężystością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	131
Rysunek 44.	Model zależności liniowej między zawartością białka (%) a elastycznością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział	132

	ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	
Rysunek 45.	Model zależności liniowej między zawartością białka w suchej masie (%) a elastycznością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	132
Rysunek 46.	Model zależności liniowej między zawartością NaCl (%) a twardością (g) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	133
Rysunek 47.	Model zależności liniowej między zawartością NaCl (%) a adhezyjnością (g.s) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	133
Rysunek 48.	Model zależności liniowej między zawartością NaCl (%) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	134
Rysunek 49.	Model zależności liniowej między zawartością NaCl (%) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	134
Rysunek 50.	Model zależności liniowej między zawartością S/M (-) a twardością (g) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	135
Rysunek 51.	Model zależności liniowej między zawartością S/M (-) adhezyjnością (g.s) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu	135

	płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	
Rysunek 52.	Model zależności liniowej między zawartością S/M (-) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	136
Rysunek 53.	Model zależności liniowej między zawartością S/M (-) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	136
Rysunek 54.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu (%) a adhezyjnościąą (g.s) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	137
Rysunek 55.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu (%) a gumowatościa (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	137
Rysunek 56.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu (%) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	138
Rysunek 57.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a twardością (g) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30°C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	138
Rysunek 58.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a adhezyjnością (g.s) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20°C (FR20), serze z	139

	dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	
Rysunek 59.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	139
Rysunek 60.	Model zależności liniowej między zawartością tłuszczu w suchej masie (%) a przeżuwalnością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	140
Rysunek 61.	Model zależności liniowej między zawartością suchej masy (%) a sprężystością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	140
Rysunek 62.	Model zależności liniowej między zawartością WSN-TN (%) a sprężystością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	141
Rysunek 63.	Model zależności liniowej między zawartością TCA-TN (%) a gumowatością (-) wraz z 95% przedziałem ufności (data= dane, fit = dopasowanie, confidence bounds = przedział ufności) w serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), serze z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i w serze kontrolnym (SK).	141
FOTOGRAFIE		
Fotografia 1-7.	Mikrofotografie serów komercyjnych o obniżonej zawartości tłuszczu (sery A-F) i sera kontrolnego (ser GG) (powiększenie 800x, napięcie 20.00 kV).	63
Fotografia 8-10.	Mikrofotografie serów z dodatkiem mikropartykułowanych białek serwatkowych z (MPI) i bez dodatku (MP) inuliny oraz w serze kontrolnym (SK) (powiększenie 800x, napięcie 20.00 kV).	92
Fotografia 11-13.	Mikrofotografie sera z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 20^{o}C (FR20), sera z dodatkiem frakcji tłuszczu płynnej w temperaturze 30^{o}C (FR30) i sera kontrolnego (SK) po 28 dniach dojrzewania powiększenie 800x, napięcie 20.00 kV.	121