

Małgorzata Pawłos^{1,*}, Agata Znamierowska-Piotrowska¹,
Julita Drobnik², Katarzyna Szajnar¹, Magdalena Kowalczyk¹

ZASTOSOWANIE ALTERNATYWNYCH ZWIĄZKÓW WAPNIA W MLECZARSTWIE

Streszczenie: Niedobory wapnia w diecie stanowią poważny problem zdrowotny, przyczyniają się bowiem do obniżenia gęstości mineralnej kości i ryzyka osteoporozy. Mleko i przetwory mleczne są głównym źródłem dobrze przyswajalnego wapnia, jednak współczesne trendy żywieniowe (ograniczanie spożycia nabiału, diety roślinne, nietolerancja laktozy) skutkują zmniejszeniem podaży wapnia z tradycyjnych produktów. W związku z tym przemysł mleczarski poszukuje alternatywnych związków wapnia do wzbogacania żywności, cechujących się wysoką biodostępnością i jednocześnie niewielkim wpływem na cechy sensoryczne oraz stabilność produktów. Organiczne formy wapnia, jak glukonian, mleczan czy L-treonian, wykazują wysoką przyswajalność i są dobrze tolerowane w produktach fermentowanych, podczas gdy nieorganiczne (jak chlorek, węglan) mogą ograniczać jakość sensoryczną lub biodostępność.

Wprowadzenie

Wapń jest jednym z kluczowych makroelementów niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania organizmu człowieka. Uczestniczy m.in. w przewodzeniu impulsów nerwowych, regulacji pracy serca, procesach krzepnięcia krwi oraz w mechanizmie skurczu mięśni szkieletowych [Bielaszka i in. 2012, Nieves i in. 2019]. Jego niedobory, szczególnie w okresie wzrostu, menopauzy i starzenia się organizmu, mogą prowadzić do obniżenia gęstości mineralnej kości, osteoporozy i zwiększonego ryzyka złamań [Koniecznyńska i in. 2007, Krzemiński i in. 2024]. Mleko i jego przetwory stanowią jedno z najważniejszych źródeł wapnia w diecie – charakteryzują się wysoką biodostępnością tego pierwiastka oraz korzystnym stosunkiem wapnia do fosforu (około 1,3:1), co ułatwia jego wchłanianie w jelitach [Kowalska i in. 2012, EFSA 2008].

Na biodostępność wapnia wpływa szereg czynników zarówno egzogennych (np. obecność aminokwasów, fosfopeptydów kazeinowych, fruktooligosacharydów, krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych), jak i endogennych – spośród których

¹ Zakład Technologii Mleczarstwa, Wydział Technologiczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Ćwiklińskiej 2D, 35-601 Rzeszów.

² SKN Technologów Żywności „Ferment”, Wydział Technologiczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Ćwiklińskiej 2D, 35-959 Rzeszów.

* mpawlos@ur.edu.pl

najważniejszą rolę odgrywa aktywna postać witaminy D [Pysz-Iwaszkiewicz i in. 2009]. Laktoza również korzystnie wpływa na przyswajanie wapnia w jelicie cienkim, o ile występuje jednocześnie z wapniem w tym samym odcinku przewodu pokarmowego [Ziemiański i in. 2001]. Współczesne obserwacje wskazują jednak, że w populacjach krajów rozwiniętych, w tym w Polsce, spożycie wapnia jest chronicznie niewystarczające. Średnie dobowe spożycie tego pierwiastka przez osoby dorosłe wynosi około 600–700 mg, a wśród młodzieży sięga 690 – 850 mg, co znacząco odbiega od rekomendowanych norm, od 700 do 1300 mg/dobę, w zależności od wieku [Szponar i in. 2008, Jarosz i in. 2020]. Do czynników obniżających podaż wapnia należą zmiany zwyczajów żywieniowych: ograniczanie spożycia mleka i jego przetworów, rosnąca popularność diet wegańskich, nietolerancja laktozy czy indywidualne preferencje konsumenckie [Nieves i in. 2019]. W kontekście tych wyzwań istotne staje się nie tylko rozważenie alternatywnych form wapnia pod kątem biodostępności, ale również z perspektywy technologicznej – z uwzględnieniem wpływu poszczególnych związków na właściwości fizykochemiczne, sensoryczne i stabilność produktów mleczarskich. Przemysł spożywczy podejmuje zatem działania mające na celu wzbogacanie różnych produktów w wapń, tak aby zwiększyć jego podaż w diecie.

Tradycyjnie do fortyfikacji produktów mlecznych stosuje się chlorek wapnia, co zwiększa zawartość wapnia zjonizowanego w mleku i poprawia tym samym proces koagulacji białek mleka. Jednak stosowanie chlorku wapnia (zwłaszcza w wyższych dawkach) może powodować pogorszenie cech sensorycznych produktów [Ong i in. 2013, Pawlos i in. 2023]. W ostatnich latach rośnie zainteresowanie alternatywnymi związkami wapnia, takimi jak mleczan, glukonian, cytrynian czy L-treonian wapnia [Krzemiński i in. 2024, EFSA 2008].

Formy wapnia i jego rola w produktach mlecznych

Wapń zawarty w mleku i jego przetworach występuje zarówno w formie zjonizowanej (Ca^{2+}), rozpuszczonej w wodnej fazie, jak i związanej z micelami kazeinowymi – głównie jako koloidalny fosforan wapnia [Kowalska i in. 2012, Deeth i Lewis 2015]. Obydwie frakcje pełnią istotne funkcje biologiczne i technologiczne: wapń jonowy uczestniczy w koagulacji białek, wpływa na równowagę elektrolitową i teksturę produktów, zaś frakcja koloidalna stabilizuje strukturę miceli kazeinowych [Biel i in. 2009, Acosta i in. 2020]. Zawartość wapnia w mleku krowim wynosi przeciętnie 120 mg/100 g, z czego około 60–65% związane jest z białkami, a reszta występuje w formie zjonizowanej lub związanej z cytrynianami i fosforanami [Kowalska i in. 2012, Krzemiński i in. 2024]. Proporcje między tymi formami zależą od pH, temperatury oraz obecności innych jonów – zakwaszenie matrycy zwiększa udział wapnia jonowego, co jest szczególnie istotne w produkcji serów i napojów fermentowanych [Acosta i in. 2020, Karlsson i in. 2019].

W procesie wzbogacania żywności wybór formy chemicznej wapnia jest kluczowy. Różne związki, takie jak chlorek, glukonian, mleczan, cytrynian czy L-treonian wapnia, różnią się rozpuszczalnością, stabilnością i interakcjami z komponentami matrycy mlecznej, co przekłada się zarówno na biodostępność, jak i właściwości technologiczne produktu końcowego [EFSA 2008; Lorieau i in. 2018]. Związki organiczne wykazują na ogół wyższą przyswajalność niż ich nieorganiczne odpowiedniki [Theobald 2005]. Niewłaściwie dobrany związek może jednak prowadzić do destabilizacji układu koloidalnego mleka, powstawania osadu, zmętnienia lub niekorzystnych zmian tekstury. Dlatego w nowoczesnych produktach mlecznych preferuje się związki wapnia o wysokiej biodostępności i neutralnym profilu sensorycznym, jak glukonian, mleczan czy L-treonian [Krzemiński i in. 2024].

Z perspektywy technologicznej wapń ma również znaczenie jako składnik funkcjonalny wpływający na przebieg i efektywność procesów technologicznych. W serowarstwie chlorek wapnia poprawia koagulację, zwłaszcza w mleku pasteryzowanym, ale jego nadmiar może prowadzić do twardej tekstury i defektów smakowych [Ong i in. 2013, Pawlos i in. 2023]. Badania wskazują, że glukonian zwiększa wydajność sera i poprawia jego strukturę, podczas gdy mleczan może obniżać wydajność, a węglan wpływać niekorzystnie na akceptowalność sensoryczną [Pawlos i in. 2023].

W mleku fermentowanym dodatek wapnia może wpływać na właściwości żelu, lepkość oraz synerezę. Cytrynian wapnia oprócz tego, że stanowi źródło wapnia, może pełnić rolę bufora stymulującego wzrost kultur starterowych [Krzemiński i in. 2024]. Glukonian i mleczan wapnia są z kolei dobrze tolerowane i stabilne w tych układach [Acosta i in. 2020]. Natomiast w produktach UHT i napojach wysokobiałkowych nadmiar wapnia zjonizowanego obniża pH i przyspiesza koagulację białek w trakcie obróbki termicznej, prowadząc do pogorszenia stabilności fizykochemicznej. W takich przypadkach niezbędne jest stosowanie dodatków kompleksujących wapń (np. cytrynianów) oraz optymalizacja jego stężenia [Karlsson i in. 2019, Wu i in. 2024].

Związki wapnia stosowane w mleczarstwie

Chlorek wapnia jest tradycyjnie wykorzystywanym związkiem wapnia w mleczarstwie, zwłaszcza w serowarstwie. Pełni funkcję dodatku wspomagającego koagulację mleka – poprzez zwiększenie stężenia wapnia jonowego przywraca równowagę wapniową w pasteryzowanym mleku serowarskim, ułatwiając tworzenie zwartego skrzepu. Dodatek chlorku poprawia wydajność otrzymywanego sera podpuszczkowego, wpływając korzystnie na efektywność wytrącania kazeiny. Jednak stosowanie chlorku wapnia może wiązać się z ryzykiem wystąpienia niepożądanych zmian smakowych (metaliczny posmak, cierpkość), szczególnie przy

wyższych stężeniach [Ong i in. 2013, Pawlos i in. 2023]. Z tego względu poszukuje się zamienników chlorku lub optymalizuje jego dawkę, aby zbalansować efekty technologiczne z akceptowalnością sensoryczną produktu.

Glukonian wapnia jest organicznym związkiem o łagodnym profilu sensorycznym i stosunkowo wysokiej biodostępności. Charakteryzuje się umiarkowaną rozpuszczalnością w wodzie – mniejszą niż chlorek, ale wystarczającą do wielu zastosowań. Jego ograniczona rozpuszczalność może stanowić wyzwanie przy wzbogacaniu płynnych produktów mlecznych, natomiast dobrze sprawdza się w produktach fermentowanych, takich jak jogurty czy kefiry. Badania nad wzbogacaniem mleka koziego wykazały, że dodatek glukonianu wapnia poprawia teksturę i strukturę skrzepu serowarskiego, nie obniżając jednocześnie akceptowalności sensorycznej produktu końcowego [Acosta i in. 2020, Krzemiński i in. 2024]. Warto podkreślić, że dzięki neutralnemu smakowi glukonian może być dodawany w relatywnie wysokich dawkach bez ryzyka wyczuwalnych wad smakowych.

Mleczan wapnia, podobnie jak glukonian, cechuje się wysoką przyswajalnością przez organizm oraz dobrą tolerancją w matrycy produktów fermentowanych. Jest dobrze rozpuszczalny w wodzie i ma łagodny smak, dzięki czemu jego dodatek nie wpływa znacząco na smak wzbogacanych produktów. Z tego względu mleczan wapnia może być z powodzeniem stosowany do fortyfikacji zarówno mleka pasteryzowanego, jak i fermentowanego. Wykazano, że wzbogacanie mleka fermentowanego tym związkiem pozwala zachować stabilność struktury żelu białkowego oraz utrzymać korzystny profil sensoryczny produktu końcowego [Kowalska i in. 2012]. Mleczan nie wpływa negatywnie na odczyn produktu ani na aktywność kultur bakterii fermentacji mlekowej, co czyni go cennym dodatkiem w produkcji żywności funkcjonalnej o podwyższonej zawartości wapnia.

Węglan wapnia jest jedną z najtańszych i najbogatszych w wapń form tego pierwiastka – zawiera około 40% wapnia elementarnego. Niestety, jego rozpuszczalność w środowisku obojętnym jest bardzo niska, przez co biodostępność wapnia z węglanu w przewodzie pokarmowym jest ograniczona. W kwaśnym pH żołądka częściowo się rozpuszcza, ale w jelicie może precypitować, zmniejszając efektywne wchłanianie. Dodatek węglanu wapnia do płynnych produktów mlecznych może powodować powstawanie osadów i zmętnienie, a także wywoływać nieprzyjemne wrażenie kredowości. Z tego względu zastosowanie węglanu wapnia w mleczarstwie jest ograniczone głównie do produktów o stałej konsystencji (np. proszki mleczne, suplementy diety) lub takich, gdzie jego obecność nie zaburza odczuć sensorycznych. Mimo wysokiej zawartości wapnia węglan nie jest preferowany do wzbogacania napojów mlecznych właśnie z powodu wspomnianych ograniczeń technologicznych [Kowalska i in. 2012].

Cytrynian wapnia wyróżnia się bardzo dobrą biodostępnością i wysoką tolerancją przez przewód pokarmowy – często jest stosowany jako suplement wapnia dla osób z wrażliwym układem trawiennym, gdyż rzadziej powoduje dolegliwości żołądkowe niż np. węglan. Cytrynian jest też lepiej rozpuszczalny od węglanu

w obojętnym pH jelita, a pod względem sensorycznym niemal niewyczuwalny. Mimo tych zalet cytrynian wapnia rzadko bywa używany na skalę przemysłową do fortyfikacji mleka czy napojów mlecznych. Wynika to z trudności z jego równomiernym rozmieszczaniem w fazie wodnej mleka (może wymagać intensywnego mieszania lub stosowania emulgatorów) oraz z wyższych kosztów tego surowca w porównaniu z innymi związkami [Kowalska i in. 2012, Krzemiński i in. 2024]. Cytrynian znalazł pewne zastosowanie w produktach dietetycznych i dla osób z zaburzeniami wchłaniania, ale w typowym mleczarstwie zastępowany jest częściej tańszymi alternatywami.

L-treonian wapnia to stosunkowo nowy i obiecujący związek, który jest przedmiotem licznych badań. Wykazuje bardzo wysoką biodostępność wapnia. W badaniach na modelach zwierzęcych i w ograniczonych badaniach klinicznych stwierdzono, że wapń z L-treonianu wchłania się efektywniej niż z tradycyjnych form, takich jak węglan czy octan. Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA) ocenił bezpieczeństwo L-treonianu wapnia jako źródła wapnia dodawanego do żywności i uznał go za bezpieczny przy dawkach dostarczających do 400 mg wapnia dziennie [EFSA 2008]. Oznacza to, że nawet znaczna suplementacja tą formą nie powinna powodować efektów ubocznych. Ponadto EFSA potwierdził, że L-treonian jest metabolitem naturalnie występującym w organizmie człowieka (produkt przemian kwasu askorbinowego), co dodatkowo przemawia za jego bezpieczeństwem. Choć L-treonian wapnia nie jest jeszcze powszechnie stosowany w produktach mlecznych, pojawiają się pierwsze doniesienia o możliwości wzbogacania nim np. fermentowanych napojów mlecznych lub suplementów dodawanych do mleka. Jego neutralny smak i dobra rozpuszczalność sprzyjają takim zastosowaniom. Można oczekiwać, że w przyszłości, wraz z potencjalnym obniżeniem kosztów produkcji, L-treonian może stać się wartościowym zamiennikiem dla tradycyjnych związków wapnia w produktach funkcjonalnych, szczególnie adresowanych do grup narażonych na niedobory wapnia. Aktualnie L-treonian pozostaje głównie w fazie badań i testów aplikacyjnych, niemniej wyniki wskazują na jego wyjątkowo wysoką biodostępność i korzystny profil bezpieczeństwa [EFSA 2008].

Wszystkie rozważane związki wapnia są uznane za bezpieczne do zastosowań w produkcji żywności. Kluczowe jest jednak zachowanie odpowiednich dawek – tak aby wzbogacenie produktu dostarczało znaczących ilości wapnia (np. 20–30% RWS w porcji) i jednocześnie nie przekraczało zalecanego górnego poziomu spożycia (2500 mg Ca/dzień dla osób dorosłych).

Czynniki warunkujące biodostępność wapnia

Przyswajalność wapnia z produktów mlecznych zależy zarówno od jego formy chemicznej, jak i od interakcji z innymi składnikami diety. Wapń ulega absorpcji głównie w jelicie cienkim, za pośrednictwem transportu aktywnego (zależnego

od kalcytriolu) oraz dyfuzji biernej. W warunkach niskiej podaży dominuje mechanizm aktywny, w którym udział biorą kanały wapniowe TRPV6 oraz kalbindyna, zaś przy wyższej podaży wzrasta znaczenie transportu paracelularnego [Shkempi i Huppertz 2022, Wang i in. 2013]. Do czynników zwiększających biodostępność wapnia należą: odpowiednia podaż witaminy D, obecność laktozy, niskie pH środowiska trawiennego, a także spożycie fermentowanych produktów mlecznych i prebiotyków (inulina, GOS). Te ostatnie zwiększają absorpcję tego pierwiastka poprzez obniżenie pH w jelicie grubym i poprawę rozpuszczalności jonów wapniowych [Rastall i in. 2005, Scholz-Ahrens i in. 2007]. Jednocześnie istnieje szereg czynników ograniczających wchłanianie wapnia. Są to m.in. szczawiany (obecne w szpinaku, szczawiu, rabarbarze) oraz kwas fitynowy (zboża, rośliny strączkowe), które tworzą nierozpuszczalne kompleksy wapniowe niewchłanianialne w przewodzie pokarmowym [Heaney i in. 1991, Weaver i in. 2016]. Także duże jednorazowe dawki wapnia (>500 mg) mogą prowadzić do obniżenia jego efektywnego wchłaniania z uwagi na wysycenie mechanizmów transportu [Kemi i in. 2010].

W kontekście suplementacji oraz wzbogacania żywności duże znaczenie ma wybór odpowiedniego związku wapnia. Węglan wapnia zawiera około 40% wapnia elementarnego, ale jego rozpuszczalność zależy od niskiego pH i może być ograniczona u osób starszych. Cytrynian wapnia jest bardziej biodostępny niezależnie od pH i lepiej tolerowany żołądkowo [Karp i in. 2007]. Mleczan i glukonian wapnia, pomimo niższej zawartości wapnia elementarnego (13% i 9%), cechują się dobrą rozpuszczalnością i są chętnie stosowane w produktach płynnych [Lorieau i in. 2018]. Z kolei L-treonian wapnia wykazuje bardzo wysoką biodostępność oraz dobrą tolerancję przewodu pokarmowego [EFSA 2008]. Badania wskazują, że może on zwiększać wchłanianie wapnia oraz wspomagać syntezę kolagenu, co czyni go interesującą formą wapnia w produktach funkcjonalnych przeznaczonych dla dzieci i osób starszych [Weaver i in. 2016].

Pod względem efektywności fizjologicznej wapń pochodzący z mleka i jego przetworów jest uznawany za tzw. złoty standard z biodostępnością na poziomie 30–35% [Shkempi i Huppertz 2022]. Badania izotopowe wykazały, że absorpcja wapnia z suplementów (np. cytrynianu, węglanu) może być zbliżona do tej z diety mlecznej pod warunkiem właściwego doboru formy i dawkowania [Weaver i in. 2016].

Podsumowanie

Fortyfikacja produktów mleczarskich w wapń jest skuteczną strategią walki z niedoborem tego pierwiastka. Warto szczególną uwagę zwrócić na formy zapewniające jego wysoką biodostępność przy zachowaniu dobrej jakości produktu. Glukonian, mleczan i L-treonian wapnia spełniają te kryteria, podczas gdy chlorek

i węglan wymagają ostrożnego stosowania lub są ograniczone do specyficznych zastosowań. Dalsze prace badawcze powinny skupiać się na optymalizacji połączeń różnych związków wapnia oraz na ocenie długoterminowego wpływu wzbogacania żywności w wapń na stan zdrowia konsumentów. Prawidłowo przeprowadzona fortyfikacja produktów mlecznych może przyczynić się do poprawy realizacji zaleceń żywieniowych dotyczących spożycia wapnia w całej populacji, nie zmieniając przy tym nawyków żywieniowych konsumentów.

Bibliografia

- Acosta Y.M., Gutierrez L., Ferrão L.L. (2020). Use of calcium salts for cheese yield and textural improvement in goat milk products. *Foods*, 9(3), 311.
- Biel W., Bobko K., Maciorowski R. (2009). Zawartość wapnia i fosforu w mleku surowym w zależności od sezonu i zawartości tłuszczu. *Bromatologia i Chemia Toksykologiczna*, 42(4), 1073–1078.
- Bielaszka A., Olszewska A., Kunachowicz H. (2012). Ocena spożycia produktów mlecznych jako źródła wapnia. *Żywnienie Człowieka i Metabolizm*, 39(1), 9–19.
- Deeth H.C., Lewis M.J. (2015). *High Temperature Processing of Milk and Milk Products*. Wiley-Blackwell.
- EFSA (2008). Scientific opinion on calcium L-threonate for use as a source of calcium in food supplements. *EFSA Journal*, 6(11), 866.
- Heaney R.P., Weaver C.M., Fitzsimmons M.L. (1991). Soybean phytate content: effect on calcium absorption. *American Journal of Clinical Nutrition*, 53(3), 745–747.
- Jarosz M., Rychlik E., Stoś K., Charzewska, J. (red.) (2020). *Normy żywienia dla populacji Polski*. Warszawa: NIZP-PZH.
- Karlsson M.A., Ipsen R., Ardö Y. (2019). Calcium and heat stability of UHT milk: effect of casein micelle destabilization during storage. *Dairy Science & Technology*, 99(2), 159–171.
- Karp H.J., Ketola M.E., Lamberg-Allardt C.J. (2007). Bioavailability of calcium from different calcium salts and Ca-fortified bread in young women: a randomized crossover trial. *European Journal of Nutrition*, 46(4), 204–210.
- Kemi V.E., Kärkkäinen M.U., Rita H.J., Laaksonen M.M., Outila T.A., Lamberg-Allardt C.J. (2010). Low calcium:phosphorus ratio in habitual diets affects serum parathyroid hormone concentration and calcium metabolism in healthy women with adequate calcium intake. *British Journal of Nutrition*, 103(4), 561–568.
- Koniecznyńska M., Wójcikowski K., Stępniewska A. (2007). Wapń – znaczenie biologiczne i rola w prewencji osteoporozy. *Przegląd Lekarski*, 64(2), 84–88.
- Kowalska M., Ambroziak A., Aljewicz M., Cichosz G. (2012). Wzbogacone w wapń i magnez produkty mleczarskie. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 93–98.
- Krzemiński M., Dmowski P., Lis A. (2024). Fortification of yoghurts with calcium salts and its impact on texture and acceptability. *Foods*, 13(8), 1969.
- Lorieau L., Le Roux L., Gaucheron F. (2018). Bioaccessibility of four calcium sources in different whey-based dairy matrices assessed by in vitro digestion. *Food Chemistry*, 245, 454–462.
- Nieves J.W., Barrett-Connor E., Siris E.S. (2019). Calcium nutrition and bone health in aging women: knowledge gaps and practical applications. *Nutrients*, 11(7), 1771.
- Ong L., Dagastine R.R., Kentish S.E., Gras S.L. (2013). The effect of calcium chloride addition on the microstructure and composition of Cheddar cheese. *International Dairy Journal*, 33(2), 135–141.

- Pawlos M., Znamiorska-Piotrowska A., Kowalczyk M., Zaguła G., Szajnar K. (2023). Possibility of using different calcium compounds for the manufacture of fresh acid rennet cheese from goat's milk. *Foods*, 12(19), 3703.
- Pysz-Iwaszkiewicz K., Baczewska B., Gruszka M. (2009). Rola witaminy D w regulacji gospodarki wapniowo-fosforanowej. *Medycyna Rodzinna*, 12(3), 14–21.
- Rastall R.A., Gibson G.R., Gill H.S., Guarner F., Klaenhammer T.R., Pot B., Reid G., Rowland I.R., Sanders M.E. (2005). Modulation of the microbial ecology of the human colon by probiotics, prebiotics and synbiotics to enhance human health: an overview of enabling science and potential applications. *FEMS Microbiology Ecology*, 52(2), 145–152.
- Scholz-Ahrens K.E., Ade P., Marten B., Weber P., Timm W., Açil Y., Glüer C.C., Schrezenmeir J. (2007). Prebiotics, probiotics, and synbiotics affect mineral absorption, bone mineral content, and bone structure. *Journal of Nutrition*, 137(3 Suppl 2), 838S–846S.
- Shkemi B., Huppertz T. (2022). Calcium absorption from food products: Food matrix effects. *Nutrients*, 14(1), 180.
- Szponar L., Wolnicka K., Rychlik E. (2008). Ocena spożycia wapnia w dietach osób w Polsce – wyniki badań ankietowych. *Żywność Człowieka i Metabolizm*, 35(4), 243–250.
- Theobald H.E. (2005). Dietary calcium and health. *Nutrition Bulletin*, 30, 237–277.
- Wang H., Tan X., Chang X., Tang X., Yin Y. (2013). Absorption of calcium from different calcium salts in rats and the expression of calcium transport proteins in intestinal segments. *Journal of Dairy Science*, 96(8), 4578–4585.
- Weaver C.M., Heaney R.P., Martin B.R., Fitzsimmons M.L. (2016). Human calcium absorption from milk and calcium supplements measured with ^{41}Ca tracer. *Osteoporosis International*, 27(2), 619–626.
- Wu C., Tian H., Gao H., Zhang Y., Ma J. (2024). Influence of calcium addition on heat stability of recombined milk during UHT processing. *International Dairy Journal*, 147, 105581.
- Ziemlański Ś., Bułhak-Jachymczyk B., Kunachowicz, H. (2001). Rola laktozy w przyswajaniu wapnia – aktualne poglądy. *Żywność Człowieka i Metabolizm*, 28(3), 283–294.

Application of alternative calcium compounds in the dairy industry

Abstract: Calcium deficiencies in the diet represent a significant public health concern, contributing to reduced bone mineral density and an increased risk of osteoporosis. Milk and dairy products are primary sources of highly bioavailable calcium; however, modern dietary trends (such as reduced dairy consumption, plant-based diets, and lactose intolerance) have led to decreased calcium intake from traditional sources. Consequently, the dairy industry is actively seeking alternative calcium compounds for food fortification that offer high bioavailability while minimizing adverse effects on sensory properties and product stability. Organic calcium compounds, such as gluconate, lactate, and L-threonate, demonstrate high absorption rates and are well tolerated in fermented dairy products, whereas inorganic forms (e.g., chloride, carbonate) may negatively impact sensory quality or bioavailability.