

MAGDALENA ŚWIĄTEK, WŁODZIMIERZ BEDNARSKI,
KAROLINA SZYMAŃSKA, MARIUSZ ŚLIWIŃSKI

ŻYWIENIOWE I TECHNOLOGICZNE ASPEKTY WYSTĘPOWANIA GALAKTOZY W MLEKU I PRODUKTACH MLECZNYCH

Streszczenie

Galaktoza spełnia istotne funkcje żywieniowe, gdyż stanowi źródło energii oraz składnik strukturotwórczy w organizmie. Wykazano również jej działanie przeciwbakteryjne, ograniczające inwazję niektórych patogenów. Jednakże u niektórych osób występuje zaburzenie metabolizmu galaktozy, nazywane galaktozemią. Jest ono spowodowane niedoborem enzymów przemiany galaktozy. W takim przypadku konieczne jest wyeliminowanie laktozy i galaktozy z diety. Bakterie fermentacji mlekowej wykazują różnice pod względem zdolności do metabolizowania galaktozy. Metabolizm laktozy/galaktozy może przebiegać szlakiem Leloir'a (*S. thermophilus*, *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *L. helveticus*) lub szlakiem metabolicznym tagatozo-6-P (*L. casei*, *L. rhamnosus*, *L. lactis* subsp. *cremoris*). Przemiany laktozy/galaktozy zachodzące szlakiem tagatozo-6-P skutkują akumulacją niewielkich ilości galaktozy w środowisku, natomiast metabolizm galaktozy szlakiem Leloir'a jest zazwyczaj związany z wydzielaniem zewnątrzkomórkowo znacznych ilości galaktozy. W związku z powyższym produkty mleczne charakteryzują się różną zawartością galaktozy, co wywołuje różne konsekwencje jakościowe. Obecność galaktozy w masie serowej (Cheddar, Mozzarella) może powodować wystąpienie niepożądanych szczelin i pęknięć, jak również niekorzystnych zmian barwy podczas przechowywania i w efekcie obróbki termicznej. Eliminacja galaktozy z tych produktów pozwoliłaby więc na poprawę ich jakości. Można ją uzyskać poprzez stosowanie do produkcji tych serów mikroorganizmów genetycznie zdolnych do intensywnego wykorzystania galaktozy, jak np. *L. casei*, *L. rhamnosus*, *L. helveticus*. Ponadto produkty mleczne niezawierające laktozy i galaktozy mogą znaleźć zastosowanie w diecie osób dotkniętych galaktozemią.

Słowa kluczowe: galaktoza, sacharydy, produkty bezgalaktozowe, galaktozemia

Wprowadzenie

Postęp wiedzy o właściwościach funkcjonalnych składników mleka dotyczy także sacharydów. Obecnie wiadomo, że w mleku występuje ok. 100 różnych form oligosa-

charydów. Poznano ich skład i biologiczne funkcje ważne w prozdrowotnym żywieniu. Sprzyja temu upowszechnienie specjalistycznych metod analitycznych, głównie chromatograficznych [19]. Obserwuje się także systematyczne pogłębianie wiedzy o metabolizmie sacharydów mleka oraz ich oddziaływaniu na zdrowie konsumentów [1, 10, 11, 15, 22].

Aktualnie ważna jest problematyka dotycząca skutków zdrowotnych szerokiego zakresu upowszechniania produktów mlecznych bezlaktozowych. Została ona przybliżona w cytowanym piśmiennictwie, m.in. we wcześniejszych opracowaniach własnych [3, 5, 23, 25].

W ocenie wartości żywieniowej sacharydów mleka warto zwrócić uwagę na galaktozę obecną w mleku w strukturach laktozy, jak również w oligosacharydach [11]. Współczesne opinie o wartości żywieniowej galaktozy nie są jednoznaczne. Przeważają informacje o jej korzystnym oddziaływaniu na zdrowie konsumentów [2, 6, 7]. Technologicznie ważne są wyniki badań informujące o niekorzystnym oddziaływaniu „wolnej”, niewykorzystanej przez drobnoustroje, galaktozy na jakość niektórych produktów mlecznych, np. niektórych serów i napojów fermentowanych [6, 12, 16, 27, 28].

Celem niniejszego opracowania było przybliżenie współczesnej wiedzy o właściwościach galaktozy oraz o skutkach żywieniowych i technologicznych obecności wolnej galaktozy w mleku i produktach mlecznych.

Charakterystyka galaktozy

Aspekty żywieniowe i zdrowotne

Galaktoza jest aldoheksozą. W naturze najczęściej występuje w D-konfiguracji. Jest obecna w bakteriach, roślinach oraz zwierzętach. Dostępna jest w postaci wolnej, jak i związanej w: oligosacharydach, polisacharydach, glikoproteinach i glikolipidach. Źródłem galaktozy są także niektóre owoce, np. figi [2].

Organizm ludzki może syntetyzować galaktozę endogennie „de novo”. Galaktoza z glukozą tworzą laktozę – cukier występujący wyłącznie w mleku, który jest pierwszym źródłem energii dla noworodków i niemowląt. Obecność laktozy w strukturach ok. stu oligosacharydów decyduje często o ich aktywności biologicznej. Specyficzne wiązania galaktozy w strukturach oligosacharydów powodują, że nie podlegają one hydrolizie w jelicie cienkim i przechodzą do dalszej części przewodu pokarmowego, w którym pełnią funkcje prebiotyczne [2].

W roztworze wodnym galaktoza występuje w dwóch formach strukturalnych: α - i β -piranozy, różniących się miejscem położenia grupy hydroksylowej przy węglu C-1. Galaktoza uwalniana enzymatycznie z laktozy występuje w β -konformacji, a na-

stępnie jest konwertowana enzymatycznie do α -anomeru i w tej postaci podlega dalszym bardzo szybkim przemianom do glukozy [2, 7].

Biologiczne znaczenie galaktozy nie ogranicza się wyłącznie do wartości żywieniowej. Z uwagi na specyficzną budowę, różniącą ją od glukozy tym, że grupa hydroksylowa jest związana z węglem C-4, galaktoza pełni w żywych organizmach wiele funkcji strukturotwórczych, których nie pełni glukoza. W porównaniu z glukozą i fruktozą galaktoza jest preferencyjnie włączana do glikogenu wątrobowego. Wątroba to najważniejszy organ biorący udział w rozmieszczeniu galaktozy, niemniej jednak enzymy zaangażowane w metabolizm galaktozy zidentyfikowano w kilku komórkach i tkankach, tj. w enterocytach, mózgu, gruczole mlecznym [2]. Właściwości związane z występowaniem dwóch form anomerycznych galaktozy decydują o jej znaczeniu biologicznym głównie dlatego, że wchodzi ona w skład glikanów w kompleksach biomolekularnych. Sekwencyjność i anomeryczność połączeń galaktozy w tworzonych kompleksach sprzyjają różnorodności oddziaływania na fizjologiczne i patologiczne zjawiska w organizmie. Galaktozemia, mukowiscydoza, zapalenie oskrzeli i reumatoidalne zapalenie stawów są specyficznym regulowane przez struktury oligosacharydowe zawierające galaktozę. Aktywność biologiczną wykazują także formy galaktozy uzyskane po jej acylacji, siarczanowaniu lub metylacji. Siarczanowana galaktoza jest składnikiem mucyn wydzielanych w drogach oddechowych, które wiążą bakterie wywołujące zapalenie płuc (*Mycoplasma pneumoniae*) i powstrzymują infekcję. Powstałe z udziałem galaktozy różne anomerycznie powiązane kompleksy wykazują aktywność łagodzącą skutki inwazji bakteryjnych w układzie immunologicznym gospodarza. Kompleksy sacharydów współtworzonych przez galaktozę są np. zdolne do ograniczania adhezji patogenów (np. *Streptococcus suis*, *Helicobacter pylori*, *Escherichia coli*) do komórek nabłonka [7].

Obecnie wiadomo, że galaktoza jest substratem do syntezy cerebrozydów, gangliozydów i mukoprotein w mózgu. Wykazuje ona także działanie terapeutyczne, np. w zapobieganiu chorobie Alzheimera. Dowiedziono, że doustne podawanie galaktozy jest obiecującą terapią w leczeniu opornego zespołu nerczycowego [8]. Eksperymentalnie wykazano, że galaktoza współtworzy markery do rozpoznawania niektórych nowotworów (np. żołądka), grup krwi i infekcji rotawirusowej [7].

Genetycznie uwarunkowana nietolerancja galaktozy nazywana galaktozemią występuje w populacji ludzkiej z częstotliwością $(1 : 30000) \div (1 : 100000)$ [9]. Jej przyczyną jest wrodzony niedobór jednego z trzech enzymów przemiany galaktozy (szlak metaboliczny Leloir): urydylotransferazy galaktozo-1-fosforanowej (GALT), galaktokinazy (GALK) lub UDP-galaktozo-4-epimerazy (GALE). Deficyt jednego z nich powoduje niepełne przemiany galaktozy, a gromadzące się we krwi i narządach docelowych (m.in. w wątrobie i mózgu) galaktoza i jej metabolity (galaktozo-1-fosforan, galaktitol) destrukcyjnie oddziałują na systemy: odpornościowy, hematologiczny, uro-

logiczno-nerkowy i nerwowy [7, 20, 24, 27, 28]. Galaktozemia jest chorobą genetyczną, dziedziczną autosomalnie recesywnie. Obraz kliniczny choroby jest różny i zależy od niedoboru poszczególnych enzymów. Najczęściej obserwowany jest deficyt urydylotransferazy galaktozo-1-fosforanowej, który powoduje wystąpienie „klasycznej galaktozemii” o ostrym przebiegu. W tej postaci choroby następuje gromadzenie się galaktozo-1-fosforanu, toksycznego dla wątroby, nerek i mózgu [24]. U noworodków z „klasyczną galaktozemią” obserwuje się m.in. wymioty, biegunkę, brak łaknienia, brak przyrostu masy ciała, powiększenie wątroby i śledziony, żółtaczkę, zaburzenia krzepnięcia krwi i hipoglikemię. Charakterystycznym objawem jest posocznica bakteryjna wywołana przez *E. coli*. Do późniejszych objawów można zaliczyć zaburzenia pracy nerek, objawy uszkodzenia ośrodkowego układu nerwowego, zaćmę. Ważnym objawem jest patologiczna żółtaczka, pojawiająca się wcześniej niż żółtaczka fizjologiczna [24]. Wskazane jest możliwie wczesne rozpoznanie galaktozemii. Dotyczy to głównie niemowląt. Przeciwdziałanie polega na wyeliminowaniu obecności galaktozy i laktozy z diety [7, 19].

Aspekty technologiczne

W przetwórstwie mleka dominują procesy fermentacyjne z udziałem dobranych kultur mikroorganizmów, głównie bakterii fermentacji mlekowej. Głównym substratem w ich rozwoju są sacharydy mleka: laktoza i monosacharydy powstające po jej enzymatycznej hydrolizie. Jednym z nich jest galaktoza [6].

Metabolizm laktozy/galaktozy w komórkach bakterii fermentacji mlekowej, jak i niektórych drożdży, przebiega najczęściej szlakiem Leloir (operon gal), m.in. *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Lactobacillus helveticus*, *Kluyveromyces lactis*. Drugim, alternatywnym szlakiem metabolicznym jest szlak tagatozo-6-P (operon lac). Jest on powszechny u bakterii: *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, *Enterococcus faecium*, *Enterococcus faecalis*, *Bifidobacterium longum*, *Leuconostoc lactis*, *Leuc. mesenteroides* subsp. *cremoris*, *Propionibacterium freudenreichii* subsp. *shermanii* i nielicznych szczepów *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* [27, 28, 29, 30]. Niektóre mikroorganizmy są zdolne do metabolizowania laktozy/galaktozy zarówno szlakiem Leloir, jak i szlakiem tagatozo-6-P (np. *Lactococcus lactis*) [4].

Metabolizm laktozy/galaktozy zachodzący szlakiem tagatozo-6-P skutkuje akumulacją niewielkich ilości galaktozy w podłożu, natomiast większość bakterii metabolizujących galaktozę szlakiem Leloir wydziela zewnątrzkomórkowo znaczne ilości galaktozy. Jednym z wyjątków jest *L. helveticus* efektywnie fermentujący galaktozę szlakiem Leloir. Warto dodać, że w szlaku tagatozo-6-P nie jest uwalniana galaktoza, ale metabolizowany jest galaktozo-6-fosforan powstały po fosforylacji laktozy podczas transportu do wnętrza komórki. Jednakże część galaktozo-6-fosforanu jest defosfory-

lowana i wydzielana do środowiska, podczas gdy reszta glukozy jest łatwo wykorzystywana. Geny odpowiedzialne za metabolizm galaktozy szlakiem tagatozo-6-P są kodowane na chromosomach u gatunków *L. casei*, *L. rhamnosus* i *L. paracasei*, podczas gdy obecność tych genów kodowanych na plazmidach stwierdzono u niektórych szczepów gatunku *L. lactis*. Metabolizm galaktozy szlakiem tagatozo-6-P zależy nie tylko od gatunku, ale również od szczepu w obrębie danego gatunku [4, 16, 28, 29].

Spośród innych mikroorganizmów stosowanych w przetwórstwie mleka, podczas produkcji niektórych rodzajów serów (głównie typu szwajcarskiego) stosuje się bakterie propionowe. Wszystkie bakterie z rodzaju *Propionibacterium*, z wyjątkiem *P. freudenreichii* subsp. *freudenreichii*, wykazują zdolność do hydrolizy laktozy, dzięki obecności enzymu β -D-galaktozydazy. Bakterie *P. freudenreichii* w obecności sacharydów i mleczanów w pożywce preferencyjnie metabolizują kwas mlekowy jako substrat fermentacji propionowej [13].

Genetycznie uwarunkowane predyspozycje bakterii do fermentacji laktozy/galaktozy są przyczyną różnej intensywności przemian galaktozy i jej pozostałości w produktach po fermentacji. Obecność galaktozy w produktach mlecznych wywołuje określone konsekwencje jakościowe, głównie w takich serach jak Cheddar i Mozzarella. Z dostępnej literatury wiadomo, że w dojrzałych serach Cheddar (po 6 miesiącach dojrzewania) nie występuje już laktoza, a zawartość galaktozy wynosi średnio 30 mg/100 g, niekiedy nawet 100 mg/100 g [27]. Występowanie galaktozy w masie serowej może powodować określone wady serów, jak np. niespójna konsystencja czy brązowienie podczas obróbki termicznej masy serowej [18].

Tradycyjnie sery Cheddar produkuje się z zastosowaniem mezofilnych kultur *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* i *L. lactis* subsp. *lactis*. W ciągu ostatnich dziesięcioleci wraz z postępem mechanizacji i wzrostem wydajności w zakładach produkcja tego sera bardzo się zmieniła. Na rynku dostępne są różne warianty sera Cheddar, które różnią się przede wszystkim czasem dojrzewania, co przekłada się na stopień ostrości ich smaku. Łagodny Cheddar jest już gotowy po upływie 1 - 2 miesięcy, natomiast dojrzały jest jednak dopiero po roku. Inną modyfikacją procesu produkcji omawianego rodzaju sera jest stosowanie zmian składu kultury starterowej, w tym np. wprowadzenie *Streptococcus thermophilus*. Ten gatunek bakterii wykazuje większą tolerancję na podwyższoną temperaturę i większą oporność na infekcje fagowe w porównaniu z *L. lactis*, jednak jego stosowanie również wpływa na smak sera. *Streptococcus thermophilus* pozwala na szybsze wytwarzanie kwasu mlekowego podczas produkcji sera Cheddar, co w konsekwencji sprzyja przyspieszeniu procesu fermentacji i skróceniu czasu dojrzewania serów i niestety pozostawieniu w nich galaktozy. Jest ona substratem do kontynuacji procesu fermentacji w czasie dojrzewania serów, a wydzielany w tych warunkach CO₂ może sprzyjać powstawaniu wad serów, jak pojawienie się niepożądanych szczelin i pęknięć [12, 27, 28].

Większość szczepów *S. thermophilus* stosowanych w przemyśle mleczarskim nie jest w stanie metabolizować galaktozy. Jedną z możliwości technologicznych wyeliminowania tych wad serów jest dobór bakterii z uwzględnieniem wiedzy o genetycznie zaprogramowanym szlaku metabolicznym sprzyjającym intensywnej fermentacji galaktozy. Predysponowane do tego celu są bakterie fermentacji mlekowej z zaprogramowanym szlakiem metabolicznym tagatozo-6-P, charakteryzujące się wysoką aktywnością wykorzystania galaktozy. Do nich zalicza się: *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus paracasei* i *Lactobacillus rhamnosus*. Na przykład zastosowanie *L. rhamnosus* w produkcji sera Cheddar pozwoliło na całkowite wykorzystanie galaktozy w etapie technologicznym poprzedzającym 3-miesięczne dojrzewanie serów [28].

Problem z pełnym wykorzystaniem galaktozy w procesie technologicznym dotyczy także sera Mozzarella. Do jego produkcji powszechnie stosowane są szczepy bakterii *S. thermophilus* oraz *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, które w większości nie są wyposażone w geny kodujące enzymy szlaku tagatozo-6-P i metabolizując galaktozę szlakiem Leloir'a nie wykorzystują jej całkowicie, co prowadzi do powstawania wad sera, jak np. żółta barwa [15]. Należy podkreślić, że Mozzarella jest typem sera półmiękkiego, który standardowo powinien być biały. W interpretacji przyczyn niekorzystnej barwy sera zwraca się uwagę na to, że stosowane w jego produkcji szczepy starterowe wykazują zewnątrzkomórkową aktywność proteolityczną. Już na etapie fermentacji w masie serowej stwierdza się znaczną zawartość wolnych aminokwasów i niskocząsteczkowych peptydów, które mogą reagować z niewykorzystanymi sacharydami, w tym z galaktozą i tworzyć związki barwne. Proces ten jest nasilony podczas wypieku pizzy. W tych warunkach zachodzą wówczas reakcje nieenzymatycznego brunatnienia, a nawet karmelizacji, co prowadzi do niekorzystnego wyglądu pizzy. W celu spełnienia norm jakościowych dotyczących pizzy, do jej produkcji preferowane jest stosowanie bezgalaktozowego sera Mozzarella. Wymaga to doskonalenia technologii jego wytwarzania. Jeden z wariantów udoskonalonej technologii produkcji bezgalaktozowego sera Mozzarella obejmuje trzy ważne etapy:

- zastosowanie kultur starterowych predysponowanych do intensywnej fermentacji galaktozy podczas etapu ukwaszania mleka z jednoczesną minimalizacją procesów proteolizy,
- kontynuację fermentacji mlekowej w serwatce wydzielonej z gęstwy serowej i skuteczne jej 3 - 4-godzinne osuszenie, tj. wydzielanie serwatki w celu minimalizacji zawartości laktozy i galaktozy,
- dojrzewanie sera w warunkach sprzyjających procesom proteolizy i zwiększaniu zawartości aminokwasów i peptydów.

Zastosowana procedura ogranicza metabolizm galaktozy w masie serowej (przez pozostałe w niej żywe bakterie) na etapie dojrzewania (28 dni/4 °C) oraz w czasie przechowywania sera [28].

W produkcji bezgalaktozowego sera Mozzarella wskazane jest stosowanie kultur *L. casei*, *L. helveticus* i *L. rhamnosus*, zdolnych do efektywnej fermentacji galaktozy. Uzasadnione jest dalsze poszukiwanie szczepów bakterii przeznaczonych do intensywnej, pełnej fermentacji galaktozy. Potwierdzono te zdolności w przypadku *Enterococcus faecium* i *Enterococcus faecalis*, jednak nie są one uznane za GRAS, mimo że ich patogenność nie została potwierdzona [14, 28]. Perspektywicznie pozytywne są przykłady doskonalenia szczepów bakterii metodami inżynierii genetycznej [21, 28].

Eliminacja galaktozy z produktów mlecznych (niezawierających laktozy) umożliwia ich zastosowanie w diecie osób dotkniętych galaktozemią [19]. Otwarte pozostaje pytanie, czy obecnie bezgalaktozowe produkty mleczne są dostępne na rynku.

We wstępnych badaniach własnych, prowadzonych w Instytucie Innowacji Przemysłu Mleczarskiego w Mrągowie, wykazano nieobecność galaktozy w analizowanych próbkach produktów dostępnych w handlu, takich jak: kefir, twarogi i sery dojrzewające typu holenderskiego. Sery dojrzewające typu holenderskiego nie zawierały również laktozy i glukozy, można je więc zaliczyć do produktów mlecznych bezcukrowych. Wykazano również, że głównym czynnikiem decydującym o eliminacji cukrów, w tym galaktozy, jest dobór mikroflory stosowanej do ich produkcji. Wskazane jest np. stosowanie szczepów z gatunku *Lactococcus lactis*, *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus helveticus*, *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *cremoris* [30].

W prowadzonych badaniach wykazano również, że największe ilości wolnej galaktozy występują w produktach bezlaktozowych (1,8 ÷ 3,0 %), co jest oczywiście związane z procesem technologicznym ich otrzymywania (hydroliza enzymatyczna laktozy). Produkty te są przeznaczone szczególnie dla osób z medycznie potwierdzoną nietolerancją laktozy. Jednakże muszą rezygnować z ich spożycia osoby obciążone galaktozemią. Obecność wolnej galaktozy odnotowano także w mlecznych produktach fermentowanych, jak śmietana (0,31 ÷ 0,62 %), jogurt naturalny (0,58 ÷ 1,03 %) i jogurt owocowy (0,27 ÷ 0,52 %). Jogurt otrzymywany jest z mleka przy udziale kultur *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* oraz *Streptococcus thermophilus*, które wykorzystują galaktozę wolniej niż glukozę. Tradycyjna śmietana jest uzyskiwana w wyniku ukwaszenia śmietanki przez mezofilne bakterie fermentacji mlekowej (*Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *L. lactis* subsp. *cremoris*, *L. lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis*, *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *cremoris*). Do jej produkcji można także zastosować kultury termofilne (*Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* i *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*) łącznie lub osobno z kulturami mezofilnymi. Zastosowanie kultur termofilnych pozwala na skrócenie czasu biologicznego dojrzewania śmietany, lecz z uwagi na ich metabolizm w produkcie pozostaje pewna ilość wolnej galaktozy [31].

Problematyka prowadzonych badań własnych jest dopełnieniem treści opracowania Ohlssona i wsp. [17], którzy przeprowadzili doświadczenia mające na celu określe-

nie zawartości laktozy, glukozy i galaktozy w mleku i fermentowanych produktach mlecznych oraz ich alternatywach bez laktozy, dostępnych na szwedzkim rynku. Do oznaczenia cukrów autorzy wykorzystali technikę wysokosprawnej chromatografii anionowymiennej z detekcją elektrochemiczną (HPAEC-ECD). Cytowani Autorzy podzielili produkty fermentowane na trzy grupy, tj. jogurt, filmjölkk i kefir. Filmjölkk, znany również jako fil, jest to tradycyjny fermentowany produkt mleczny, popularny w Szwecji i w innych krajach skandynawskich. Wytwarza się go podczas fermentacji mleka krowiego z udziałem bakterii gatunków *Lactococcus lactis* i *Leuconostoc mesenteroides*. Filmjölkk konsystencją przypomina maślankę lub kefir i ma łagodny, lekko kwaśny smak.

Podczas przechowywania badanych produktów w ciągu 8 dni (mleko UHT) lub 64 dni (produkty fermentowane) Ohlsson i wsp. [17] zaobserwowali jedynie niewielkie zmiany zawartości węglowodanów. Zawartość laktozy w badanych próbkach mleka odnotowana przez autorów wyniosła $4,5 \div 4,8$ %, a glukozy i galaktozy – ok. 0,01 %. Jogurt charakteryzował się mniejszą zawartością laktozy i większą – wolnej galaktozy (odpowiednio: 2,91 i 0,76 %) w porównaniu z produktem filmjölkk (odpowiednio: 3,51 i 0,04 %) i kefirem (odpowiednio 3,38 % i 0,04 %), co wynika z technologii produkcji i mikroflory stosowanej do fermentacji mleka. We wszystkich fermentowanych produktach mlecznych zawartość glukozy była bliska lub poniżej granicy wykrywalności (0,01 %). Gatunek *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, stosowany do produkcji filmjölkk i kefiru, wykorzystuje szlak tagatozo-6-P do metabolizowania galaktozy. W związku z tym produkty te praktycznie nie zawierały wolnej galaktozy. Natomiast gatunki *Streptococcus thermophilus* i *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* stosowane w produkcji jogurtu zwykle nie są zdolne do wykorzystywania tego szlaku, w konsekwencji w produkcie pozostaje wolna galaktoza [17]. Jednakże zidentyfikowano szczepy *S. thermophilus* zdolne do metabolizmu galaktozy (*S. thermophilus* Gal+). Zastosowanie szczepu *S. thermophilus* Gal+ w połączeniu z *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* jako kultury starterowej do produkcji jogurtu pozwoliło na zmniejszenie ilości resztkowej galaktozy do 0,37 %, w porównaniu z jogurtem referencyjnym otrzymanym z wykorzystaniem szczepu *S. thermophilus* Gal- zawierającym 0,98 % galaktozy. Katabolizm galaktozy przez bakterie fermentacji mlekowej bazuje głównie na genach zlokalizowanych w chromosomach kodujących szlaki tagatozo-6-P i/lub Leloir, ale genetyczne podstawy zależności tej cechy od szczepu są nadal niejasne [26].

Zawartość laktozy w produktach bezlaktozowych charakteryzowanych przez badaczy szwedzkich oscylowała blisko granicy wykrywalności (0,01 %) we wszystkich produktach. Mleko bezlaktozowe zawierało $1,3 \div 1,5$ % wolnej galaktozy [17].

Podsumowanie

Galaktoza pełni ważną funkcję w odżywianiu ludzkiego organizmu, szczególnie we wczesnej fazie jego rozwoju. Stanowi źródło energii i jest ważnym elementem strukturotwórczym w organizmie. Metabolizm galaktozy jest znaczący nie tylko dla rozwoju płodowego i noworodkowego, ale także dla osób w wieku dojrzałym, o czym świadczą genetyczne zaburzenia jej metabolizmu, m.in. galaktozemia, prowadzące do wielu zaburzeń i dysfunkcji. Omówione w niniejszej pracy biologiczne funkcje galaktozy wskazują także na korzyści prozdrowotne, w tym profilaktyczne, wynikające z jej spożywania.

Ważnym aspektem technologicznym przedstawionej problematyki jest wskazanie, że obecność wolnej galaktozy w niektórych produktach mlecznych może wywierać niekorzystny wpływ na ich jakość. Dotyczy to np. serów Cheddar i Mozzarella. Galaktoza obecna w masie serowej może skutkować wystąpieniem niepożądanych szczelin i pęknięć oraz zmiany barwy. Przedstawione w opracowaniu informacje wskazują, że można te wady wyeliminować po zastosowaniu określonych szczepów bakterii zdolnych do wydajnej fermentacji galaktozy. Ich predyspozycje w tym kierunku są uwarunkowane genetycznie. W produkcji mlecznych wyrobów bezgalaktozowych wskazane jest stosowanie bakterii efektywnie fermentujących galaktozę, jak np. *L. lactis* subsp. *cremoris*, *L. acidophilus*, *L. helveticus*, *L. casei*, *L. rhamnosus*. Stosowanie tych mikroorganizmów pozwala na zmniejszenie zawartości nie tylko laktozy, ale również wolnej galaktozy.

Przedstawiona problematyka oraz wyniki badań cytowanych autorów uzasadniają potrzebę prowadzenia dalszych badań zmierzających do doskonalenia technologii i rozszerzenia asortymentu produktów mlecznych bezgalaktozowych, a nawet bezcukrowych.

Praca została sfinansowana przez Instytut Innowacji Przemysłu Mleczarskiego Sp. z o.o.

Literatura

- [1] Chen X.Y., Gänzle M.G.: Lactose and lactose-derived oligosaccharides: More than prebiotics? *Int. Dairy J.*, 2017, 67, 61-72.
- [2] Coelho A.I., Berry G.T., Rubio-Gozalbo M.E.: Galactose metabolism and health. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care*, 2015, 18 (4), 422-427.
- [3] Cukrowska B., Socha J.: Hipolaktazja i nietolerancja laktozy – fakty i mity. *Standardy Medyczne/Pediatrics*, 2015, 12, 112-116.
- [4] Grossiord B., Vaughan E.E., Luesink E., de Vos W.M.: Genetics of galactose utilisation via the Leloir pathway in lactic acid bacteria. *Le Lait*, 1998, 78 (1), 77-84.
- [5] Heyman M.B.: Lactose intolerance in infants, children and adolescents. *Pediatrics*, 2006, 118 (3), 1279-1286.

- [6] Hou J., Hannon J.A., McSweeney P.L.H., Beresford T.P., Guinee T.P.: Effect of galactose metabolising and non-metabolising strains of *Streptococcus thermophilus* as a starter culture adjunct on the properties of Cheddar cheese made with low or high pH at whey drainage. *Int. Dairy J.*, 2017, 65, 44-56.
- [7] Hussain M.R.M., Hassan M., Shaik N.A., Iqbal Z.: The role of galactose in human health and disease. *Cent. Eur. J. Med.*, 2012, 7 (4), 409-419.
- [8] International Dairy Federation: Reasons why galactose is good for you. [on line]. IDF. Dostęp w Internecie [6.08.2019]: https://www.fil-idf.org/wp-content/uploads/2017/05/Factsheet-002_2017-Reasons-why-galactose-is-good-for-you.pdf
- [9] Kotb M.A., Mansour L., Shamma R.A.: Screening for galactosemia: Is there a place for it? *Int. J. Gen. Med.*, 2019, 12, 193-205.
- [10] Kunz C., Rudloff S.: Health promoting aspects of milk oligosaccharides. *Int. Dairy J.*, 2006, 16, 1341-1346.
- [11] Mehra R., Kelly P.: Milk oligosaccharides: Structural and technological aspects. *Int. Dairy J.*, 2006, 16, 1334-1340.
- [12] Michel V., Martley F.G.: *Streptococcus thermophilus* in Cheddar cheese – production and fate of galactose. *J. Dairy Res.*, 2001, 68 (2), 317-325.
- [13] Mikš-Krajnik M.: Rola paciorkowców mlekowych i pałeczek propionowych w procesie dojrzewania sera typu szwajcarsko-holenderskiego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2012, 1 (80), 45-59.
- [14] Moynihan A.C., Govindasamy-Lucey S., Molitor M., Jaeggi J.J., Johnson M.E., McSweeney P.L.H., Lucey J.A.: Effect of standardizing the lactose content of cheesemilk on the properties of low-moisture, part-skim Mozzarella cheese. *J. Dairy Sci.*, 2016, 99, 7791-7802.
- [15] Mukherjee K.K., Hutkins R.W.: Isolation of galactose-fermenting thermophilic cultures and their use in the manufacture of low browning Mozzarella cheese. *J. Dairy Sci.*, 1994, 77, 2839-2849.
- [16] Neves A.R., Pool W.A., Solopova A., Kok J., Santos H., Kuipers O.P.: Towards enhanced galactose utilization by *Lactococcus lactis*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2010, 76 (21), 7048-7060.
- [17] Ohlsson J.A., Johansson M., Hansson H., Abrahamson A., Byberg L., Smedman A., Lindmark-Mansson H., Lundh A.: Lactose, glucose and galactose content in milk, fermented milk and lactose-free milk products. *Int. Dairy J.*, 2017, 73, 151-154.
- [18] Ortakci F., Broadbent J.R., Oberg C.J., McMahon D.J.: Growth and gas production of a novel obligatory heterofermentative Cheddar cheese nonstarter *lactobacilli* species on ribose and galactose. *J. Dairy Sci.*, 2013, 96, 3645-3654.
- [19] Portnoi P.A., MacDonald A.: Determination of the lactose and galactose content of cheese for use in the galactosaemia diet. *J. Hum. Nutr. Diet.*, 2009, 22 (5), 400-408.
- [20] Reichardt J.K., Woo S.L.: Molecular basis of galactosemia: Mutations and polymorphisms in the gene encoding human galactose-1-phosphate uridylyltransferase. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1991, 88 (7), 2633-2637.
- [21] Robitaille G., Moineau S., St-Gelais D., Vadeboncoeur C., Britten M.: Galactose metabolism and capsule formation in a recombinant strain of *Streptococcus thermophilus* with a galactose-fermenting phenotype. *J. Dairy Sci.*, 2007, 90, 4051-4057.
- [22] Ryan J.T., Slattery H., Hickey R.M., Marotta M.: Bovine milk oligosaccharides as anti-adhesives against the respiratory tract pathogen *Streptococcus pneumoniae*. *Int. Dairy J.*, 2018, 81, 87-94.
- [23] Rychlik U., Marszałek A.: Nietolerancja laktozy – współczesny stan wiedzy. *Diagnostyka Laboratoryjna*, 2013, 49 (1), 71-73.
- [24] Szablewski L., Skopińska A.: Zaburzenia metabolizmu węglowodanów powodowane mutacjami i rola diety jako terapii. I. Galaktozemia. *Medycyna Rodzinna*, 2004, 4, 106-112.
- [25] Świątek M., Bednarski W., Śliwiński M.: Żywnościowe i technologiczne uwarunkowania zmniejszenia zawartości laktozy w mleku i produktach mlecznych. *Przem. Spoż.*, 2018, 72 (10), 26-29.
- [26] Thierry A., Valence F., Deutsch S.M., Even S., Falentin H., Le Loir Y., Jan G., Gagnaire V.: Strain-to-strain differences within lactic and propionic acid bacteria species strongly impact the properties of cheese – A review. *Dairy Sci. Technol.*, 2015, 95, 895-918.

- [27] Van Calcar S.C., Bernstein L.E., Rohr F.J., Yannicelli S., Berry G.T., Scaman C.H.: Galactose content of legumes, caseinates, and some hard cheeses: Implications for diet treatment of classic galactosemia. *J. Agric. Food Chem.*, 2014, 62 (6), 1397-1402.
- [28] Wu Q., Cheung C.K.W., Shah N.P.: Towards galactose accumulation in dairy foods fermented by conventional starter cultures: Challenges and strategies. *Trends Food Sci. Technol.*, 2015, 41 (1), 24-36.
- [29] Wu Q., Shah N.P.: The potential of species-specific tagatose-6-phosphate (T6P) pathway in *Lactobacillus casei* group for galactose reduction in fermented dairy foods. *Food Microbiol.*, 2017, 62, 178-187.
- [30] Ziarno M.: Nietolerancja laktozy i galaktozy. *Przem. Spoż.*, 2006, 60 (3), 38-40.
- [31] Ziarno M., Makowska M.: Przeżywalność mikroflory technicznej w śmietanie jogurtowej przechowywanej w warunkach chłodniczych. *Med. Weter.*, 2008, 64 (4A), 461-464.

NUTRITIONAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF OCCURRENCE OF GALACTOSE IN MILK AND MILK PRODUCTS

S u m m a r y

Galactose plays an important nutritional role as a source of energy and a structural component in the body. It has also been shown to have antibacterial activity limiting the invasion of some pathogens. However some people have galactose metabolism disorders called galactosemia. It is caused by a deficiency of galactose metabolism enzymes. In this case, it is necessary to eliminate lactose and galactose from the diet. Lactic acid bacteria differ in their ability to metabolize galactose. The metabolism of lactose/galactose may follow the Leloir pathway (*S. thermophilus*, *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *L. helveticus*) or the tagatose-6-P metabolic pathway (*L. casei*, *L. rhamnosus*, *L. lactis* ssp. *cremoris*). The metabolism of lactose/galactose, which follows the tagatose-6-P pathway, results in the accumulation of small amounts of galactose in the medium, while galactose metabolism via the Leloir pathway is usually associated with the extracellular secretion of significant amounts of galactose. Therefore, dairy products are characterized by different galactose content and this triggers different quality consequences. The presence of galactose in cheese (Cheddar, Mozzarella) can cause undesirable splits and cracks to occur and also adverse changes in colour during storage and as a result of heat treatment. Consequently, the elimination of galactose from those products would improve their quality. The elimination can take place when in the cheese production microorganisms are applied that are genetically predisposed to the intensive use of galactose, such as *L. casei*, *L. rhamnosus*, *L. helveticus*. In addition milk products that do not contain lactose and galactose can be used in the diet of people affected by galactosemia.

Key words: galactose, saccharides, lactose-free products, galactosemia ☒