

Magdalena Kowalczyk^{1*}, Agata Znamiorska-Piotrowska¹,
Małgorzata Pawlos¹, Katarzyna Szajnar¹, Julita Drobnia²

SUBSTANCJE BIOAKTYWNE MLEKA

Streszczenie: Mleko jest źródłem licznych substancji bioaktywnych o udokumentowanym wpływie fizjologicznym. Do najważniejszych należą peptydy, oligosacharydy, długłańcuchowe kwasy tłuszczowe, immunoglobuliny, laktoferyna, czynniki wzrostu i hormony. Wykazują one działanie przeciwzapalne, antyoksydacyjne, immunomodulujące, przeciwdrobnoustrojowe oraz wspierają rozwój układów pokarmowego, nerwowego i odpornościowego. Część z nich reguluje metabolizm lipidów, wpływa na biodostępność składników mineralnych oraz chroni przed stresem oksydacyjnym i infekcjami. Obecność tych składników może nadawać mleku cechy żywności o potencjale funkcjonalnym wspierającej utrzymanie równowagi fizjologicznej organizmu i mogącej odgrywać ważną rolę w profilaktyce niektórych chorób cywilizacyjnych, takich jak otyłość, insulinooporność czy zaburzenia mikrobioty jelitowej. Aktywność biologiczna tych związków zależy od wielu czynników, w tym składu mleka, sposobu jego przetworzenia i indywidualnych cech fizjologicznych organizmu konsumenta.

Wprowadzenie

Mleko to produkt o wysokiej wartości biologicznej, który oprócz składników odżywczych, takich jak białko, tłuszcz, laktoza, witaminy i składniki mineralne, zawiera również substancje wykazujące aktywność biologiczną. Związki bioaktywne, choć nie są niezbędne do podstawowego funkcjonowania organizmu, mogą wpływać na metabolizm, regulację procesów fizjologicznych oraz profilaktykę chorób [Guaadaoui i in. 2014]. Wykazują one m.in. działanie immunomodulujące, przeciwutleniające, przeciwdrobnoustrojowe i przeciwzapalne, a ich udział w diecie może wspierać rozwój oraz równowagę mikrobioty jelitowej.

Do najważniejszych bioaktywnych składników mleka zaliczane są peptydy pochodzące z hydrolizy białek, laktoferyna, oligosacharydy, immunoglobuliny, hormony, czynniki wzrostu oraz frakcje lipidowe, w tym długłańcuchowe kwasy tłuszczowe i sprzężony kwas linolowy (CLA). Skład mleka zależy od wielu czynników, takich jak gatunek zwierzęcia, jego stan fizjologiczny, sposób żywienia oraz uwarunkowania genetyczne, co przekłada się na różnice w zawartości i aktywności biologicznej poszczególnych komponentów (tabela 1).

¹ Zakład Technologii Mleczarstwa, Wydział Technologiczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Ćwiklińskiej 2D, 35-959 Rzeszów.

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

* mkowalczyk@ur.edu.pl

Tabela 1. Skład chemiczny mleka kobiecego, krowiego, koziego i owczego

Rodzaj mleka	Białko (%)	Tłuszcz (%)	Laktoza (%)	Sucha masa (%)
Kobiece	1,0	3,8	7,0	12,2
Krowie	3,4	3,7	4,8	12,7
Kozie	2,9	4,5	4,1	12,3
Owcze	6,2	7,4	4,8	19,3

Źródło: Fox 2003, Jandal 1996

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2023 r. krajowa produkcja mleka wynosiła 15 miliardów litrów, co plasuje Polskę na trzecim miejscu w Unii Europejskiej, po Niemczech i Francji [GUS 2024]. Rozwój sektora mleczarskiego oraz wzrastające zainteresowanie konsumentów żywnością funkcjonalną, w tym mlekiem pozyskiwanym od gatunków innych niż bydło, takich jak kozy i owce, wskazują na konieczność szczegółowej analizy składu bioaktywnego różnych rodzajów mleka.

Białka i bioaktywne peptydy

Białka mleka oprócz pełnienia funkcji odżywczej stanowią źródło bioaktywnych peptydów o działaniu immunomodulującym, przeciwdrobnoustrojowym, antyoksydacyjnym i neuroaktywnym. Ich zawartość w mleku wynosi 32–36 g/l i obejmuje głównie kazeiny (ok. 80%) oraz białka serwatkowe (ok. 20%) [Fox i McSweeney 2015].

Kazeina to fosfoproteina charakterystyczna dla mleka dominująca w mleku większości ssaków, choć w mleku ludzkim jej udział to jedynie 20–30%, co sprzyja lepszej strawności i biodostępności składników odżywczych [Fox i McSweeney 2015]. Zawartość aminokwasów egzogennych w kazeinie wynosi 45,8 g/100 g białka, przy czym szczególnie obfituje ona w leucynę, lizynę, walinę i prolinę, natomiast cysteina i cystyna występują w niższych stężeniach [Cichosz i Czeczot 2013]. Kazeina jest obecna w postaci α s1-, α s2-, β - oraz κ -kazeiny, które pełnią kluczową rolę w metabolizmie wapnia i fosforu, wspierając mineralizację kości, wchłanianie cynku i miedzi, a także stymulują wzrost i rozwój *Bifidobacterium*. W mleku ludzkim dominuje β -kazeina (ok. 85%), podczas gdy α s1-kazeina występuje w śladowych ilościach, co wiąże się z niższym ryzykiem alergii i lepszą przyswajalnością. Dla porównania zawartość α s1-kazeiny w mleku krowim wynosi 12–15 g/l, w owczym 15,4–22,1 g/l, a w kozim 0–13 g/l [Danków i Pikul 2011, Giambra i in. 2013]. Peptydy powstające w wyniku hydrolizy kazeiny wykazują właściwości antyoksydacyjne, neutralizują wolne rodniki oraz hamują peroksydację lipidów [Heck i in. 2009, Hayes i in. 2007].

Białka serwatkowe obejmują: β -laktoglobulinę, α -laktoalbuminę, laktoferynę, immunoglobuliny, albuminę surowicy, czynniki wzrostu. Dominującą frakcją stanowią β -laktoglobulina obecna w mleku krowim (3,2–3,3 g/l), owczym (6,5–8,5 g/l) i kozim (1,5–5,0 g/l), natomiast nieobecna w mleku ludzkim [Lönnerdal 2013]. Wykazuje ona właściwości antyoksydacyjne, przeciwnowotworowe oraz uczestniczy w transporcie witaminy A i kwasów tłuszczowych. Z kolei α -laktoalbumina, występująca w mleku ludzkim w stężeniu 2,5–3,5 g/l, odgrywa rolę immunostymulującą, wiąże jony cynku, magnezu i manganu oraz współuczestniczy w syntezie laktozy [Zimecki i Artym 2005]. Dzięki wysokiej zawartości tryptofanu wpływa na syntezę serotoniny i chroni błonę śluzową żołądka.

Laktoferyna posiada właściwości przeciwdrobnoustrojowe i immunomodulujące, zwiększając biodostępność żelaza, cynku i manganu [Ghosh i in. 2022]. W mleku ludzkim laktoferyna występuje w ilości ok. 1 g/l, podczas gdy w mleku krowim 50–300 mg/l [Kuczyńska i in. 2013]. Dzięki wysokiemu powinowactwu do żelaza wykazuje silne działanie bakteriostatyczne. Oba białka, wraz z immunoglobulinami (IgA, IgG, IgM), tworzą synergiczny układ ochronny.

W mleku obecne są także białka otoczki kuleczek tłuszczowych, takie jak mucyna-1 oraz dehydrogenaza/oksydaza ksantynowa, pełniące funkcje ochronne i metaboliczne, mimo że stanowią mniej niż 4% całkowitej frakcji białkowej [Mather 2000]. W wyniku enzymatycznej proteolizy zarówno w przewodzie pokarmowym, jak i podczas fermentacji dochodzi do uwalniania bioaktywnych peptydów mlecznych, np.: β -kazokininy, β -kazomorfiny, laktoferycyny B, kazeocydyny i innych. Wykazują one działanie przeciwzapalne, immunomodulujące, przeciwdrobnoustrojowe oraz przeciwnadciśnieniowe [Korhonen i Pihlanto 2006]. Niektóre z nich, jak β -kazomorfina, oddziałują na receptory opioidowe, regulując nastrój, stres, ból i funkcje układu nerwowego. W badaniach laboratoryjnych i przedklinicznych dowiedziono, że niektóre peptydy bioaktywne mogą działać cytotoksycznie wobec komórek nowotworowych, takich jak komórki czerniaka, białaczki oraz raka piersi [Bahar i in. 2023, Zare-Zardini i in. 2024]. Laktoferycyna wykazuje silne działanie przeciwdrobnoustrojowe (szczególnie wobec *Escherichia coli* i *Staphylococcus aureus*), a także wspiera rozwój *Bifidobacterium* [Tomita i in. 2002]. Podobne właściwości posiadają kazecydyna i isracydyna (o aktywności przeciwwirusowej i przeciwgrzybiczej). Glikomakropeptyd i kazeinomakropeptyd ograniczają rozwój patogenów, takich jak *Streptococcus* i *Escherichia coli* [Korhonen i Pihlanto 2006].

Wśród białek mleka istotną grupę stanowią enzymy o właściwościach bioaktywnych, takie jak laktoperoksydaza i lizozym, szczególnie aktywny w mleku ludzkim. Wykazują one działanie przeciwdrobnoustrojowe wspomagane przez oksydazę ksantynową, która wytwarza nadtlenek wodoru niezbędny do aktywacji enzymów obronnych [Korhonen i Pihlanto 2006]. Plazmina będąca głównym enzymem proteolitycznym mleka rozkłada β -kazeinę, prowadząc do powstawania peptydów o właściwościach antyoksydacyjnych i immunomodulujących [Fox i McSweeney 2015].

Lipidowe frakcje mleka

Głównym składnikiem frakcji lipidowej mleka są triacyloglicerole stanowiące około 97–98% całkowitej zawartości lipidów, a pozostałe frakcje obejmują fosfolipidy (0,5–1,0%), cholesterol (0,25–0,4%), wolne kwasy tłuszczowe (0,1–0,3%) [Jensen 2002]. W zależności od gatunku zwierzęcia zawartość tłuszczu ogółem i proporcje poszczególnych składników mleka mogą się znacząco różnić, co przekłada się na jego wartość biologiczną i biodostępność.

Zawartość tłuszczu całkowitego w mleku krowim wynosi średnio 3,5–4,0%, w kozim 4,0–4,5%, w ludzkim 3,5–4,5%, natomiast mleko owcze zawiera najwięcej tłuszczu – od 6,5 do 8,0% [Park i Haenlein 2006]. Mleko owcze poza wyższą zawartością tłuszczu ogółem charakteryzuje się także większą koncentracją fosfolipidów i cholesterolu. Mleko ludzkie natomiast zawiera proporcjonalnie więcej długołańcuchowych wielonienasyconych kwasów tłuszczowych, co stanowi jego istotny atut w kontekście potrzeb żywieniowych niemowląt i rozwoju układu nerwowego [Innis 2007]. Skład kwasów tłuszczowych w mleku wykazuje wyraźne różnice międzygatunkowe. Mleko krowie i kozie charakteryzuje się przewagą nasyconych kwasów tłuszczowych, takich jak palmitynowy, mirystynowy i stearynowy, które stanowią łącznie około 65–70% całkowitej zawartości lipidów [Haug i in. 2007]. W mleku owczym udział nasyconych kwasów tłuszczowych jest niższy, mieści się w zakresie 20–45%, natomiast zawartość kwasu oleinowego (C18:1) wynosi około 15,5%. Dla porównania w mleku krowim stężenie tego kwasu sięga 20,4%. Mleko ludzkie natomiast wyróżnia się niższą zawartością nasyconych kwasów tłuszczowych (ok. 45%) oraz wyraźnie większym udziałem kwasów jedno- i wielonienasyconych. Do szczególnie istotnych związków obecnych w mleku kobiecym należą długołańcuchowe wielonienasycone kwasy tłuszczowe z rodziny omega-3 i omega-6. Średnia zawartość DHA (kwasu dokozaheksaenowego) wynosi 0,2–0,5% całkowitych kwasów tłuszczowych, natomiast kwas arachidonowy stanowi około 0,4–0,6% [Innis 2007, Jensen 2002]. Oba te związki są niezbędne dla prawidłowego rozwoju układu nerwowego, siatkówki oka i funkcji immunologicznych noworodka.

Mleko kozie i owcze charakteryzuje się wysoką zawartością średniołańcuchowych kwasów tłuszczowych, takich jak kwas kapronowy (C6:0), kaprylowy (C8:0) i kaprynowy (C10:0). W mleku kozim stanowią one około 15% całkowitego tłuszczu, natomiast w mleku krowim ich udział wynosi około 6% [Haenlein 2004]. Kwasy te są dobrze przyswajalne, szybko metabolizowane i wykazują właściwości przeciwdrobnoustrojowe, co sprzyja utrzymaniu równowagi mikrobioty jelitowej. Mleko owcze zawiera również więcej wolnych kwasów tłuszczowych, w tym kwasu masłowego (C4:0), kapronowego (C6:0), kaprylowego (C8:0) i kaprynowego (C10:0) niż mleko krowie. Ich łączna zawartość w mleku owczym sięga około 140 µg/g tłuszczu, podczas gdy w mleku krowim wynosi około 92 µg/g [German i Dillard 2006]. Szczególnie istotny jest kwas masłowy, który wspiera integralność nabłonka jelitowego i może działać przeciwzapalnie.

Szczególne znaczenie biologiczne przypisuje się obecności w mleku sprzężonego kwasu linolowego, zwłaszcza izomerowi *cis*-9, *trans*-11. Związek ten, naturalnie występujący w mleku przeżuwaczy w wyniku działania bakterii fermentacyjnych w żwaczu, wykazuje silne właściwości przeciwnowotworowe, przeciwzapalne, hipolipemiczne i immunomodulujące [Parodi 2003]. Najwyższą zawartość sprzężonego kwasu linolowego obserwuje się w mleku owczym (0,6–0,9% ogólnej puli kwasów tłuszczowych), a nieco niższą w mleku krowim i kozim (0,4–0,6%). W mleku ludzkim zawartość sprzężonego kwasu linolowego jest znikoma. Warto podkreślić, że jego stężenie może być modulowane przez sposób żywienia zwierząt – szczególnie wzrasta w okresach wypasu na zielonkach [Parodi 2003].

W mleku obecny jest także kwas stearynowy, znany jako kwas oktadekanowy, należący do grupy długocząłkowych kwasów tłuszczowych nasyconych. Stanowi on od 8 do 15% całkowitej puli kwasów tłuszczowych w mleku krowim i owczym, a jego udział w mleku kozim jest nieco niższy. Choć kwas stearynowy formalnie zaliczany jest do nasyconych kwasów tłuszczowych, nie wpływa negatywnie na profil lipidowy krwi, gdyż w organizmie człowieka łatwo ulega przemianie do kwasu oleinowego. W przeciwieństwie do kwasu palmitynowego czy mirystynowego nie podnosi on poziomu cholesterolu frakcji LDL, co czyni go neutralnym lub nawet korzystnym składnikiem żywieniowym [Hunter i in. 2010].

Szczególne uwagę w ostatnich latach zwraca się również na obecność kwasu wakcenenowego (*trans*-11 C18:1) będącego głównym izomerem *trans* jednonienasyconych kwasów tłuszczowych naturalnie występujących w mleku przeżuwaczy. Związek ten występuje w mleku krowim, kozim i owczym w stężeniu od 1,0 do 2,5% całkowitej zawartości kwasów tłuszczowych, natomiast w mleku ludzkim występuje jedynie w ilościach śladowych. W warunkach wypasu na zielonkach jego zawartość w mleku krowim może wzrosnąć do ponad 3% [Lock i Bauman 2004]. Kwas wakcenenowy wykazuje działanie biologiczne podobne do sprzężonego kwasu linolowego, ponieważ w organizmie człowieka może ulegać biokonwersji do izomeru *cis*-9, *trans*-11, co nadaje mu potencjalne właściwości przeciwnowotworowe i przeciwzapalne [Corl i in. 2001].

Lipidy mleka są również nośnikiem witamin rozpuszczalnych w tłuszczach – A, D, E i K – oraz składnikiem błony kuleczek tłuszczowych, czyli struktur otaczających rdzeń triacyloglicerolowy. Błona ta, określana jako błona kuleczki tłuszczowej mleka (*milk fat globule membrane*), zawiera szereg bioaktywnych składników, w tym fosfolipidy, sfingomielinę, cholesterol, mucynę, butylofilinę oraz enzymy, takie jak dehydrogenaza ksantynowa [Hernell i in. 2016]. Składniki te pełnią funkcje przeciwdrobnoustrojowe, wspomagają rozwój układu nerwowego i odpornościowego oraz mogą regulować skład mikrobioty jelitowej. Najmniejsze kuleczki tłuszczowe występują w mleku ludzkim (1–5 mikrometrów), co zwiększa ich powierzchnię biologicznie aktywną. Mleko kozie i owcze zawiera drobniejsze kuleczki tłuszczu niż mleko krowie, co sprzyja lepszej jego strawności i biodostępności lipidów [Gallier i Singh 2015]. Tłuszcz mleczny, dzięki

obecności związków o działaniu przeciwutleniającym, przeciwzapalnym i regulującym lipidy, może wykazywać działanie protekcyjne, wspierając homeostazę oksydacyjną i zapobiegając chorobom dietozależnym, takim jak cukrzyca typu 2 czy miażdżyca [Haug i in. 2007].

Witaminy i składniki mineralne

Witaminy rozpuszczalne w tłuszczach, takie jak witamina A (retinol i karotenoidy), witamina D (cholekalcyferol), witamina E (tokoferole) i witamina K (filochinon), występują w największych ilościach w mleku owczym i kozim, co wiąże się z wyższą zawartością tłuszczu [Park i Haenlein 2006]. Mleko ludzkie, mimo niższych stężeń niektórych witamin, zawiera formy bardziej biodostępne oraz większą ilość związków o działaniu antyoksydacyjnym i regulującym, takich jak β -karoten, witamina C i kwas foliowy [Koletzko i in. 2005].

Stężenie witaminy A w mleku krowim wynosi średnio 40–50 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$, w kozim 50–60 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$, w ludzkim 28–38 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$, natomiast w owczym nawet do 75 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$ [Park i Haenlein 2006]. Witamina D występuje w mleku w niskich stężeniach: najwięcej zawiera jej mleko owcze i kozie (0,05–0,07 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$), a najmniej mleko krowie i ludzkie (<0,02 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$) [Cashman 2006]. Witamina E osiąga najwyższe stężenie w mleku ludzkim (0,25–0,45 $\text{mg}/100\text{ ml}$), a niższe w krowim (0,10–0,15 $\text{mg}/100\text{ ml}$), kozim i owczym (0,20–0,30 $\text{mg}/100\text{ ml}$) [Jensen 2002]. Mleko ludzkie zawiera także najwięcej witaminy C – 3–5 $\text{mg}/100\text{ ml}$ – w porównaniu do mleka krowiego i koziego (1–2 $\text{mg}/100\text{ ml}$) oraz owczego (ok. 2 $\text{mg}/100\text{ ml}$) [Koletzko i in. 2005]. Witaminy z grupy B, szczególnie ryboflawina (0,15–0,21 $\text{mg}/100\text{ ml}$) i kobalamina (0,3–0,5 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$), występują w większych ilościach w mleku krowim, kozim i owczym niż w mleku kobiecym (0,04–0,06 mg i <0,05 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$) [Park i Haenlein 2006]. Z kolei kwas foliowy i witamina C osiągają najwyższe stężenia w mleku ludzkim, co ma kluczowe znaczenie dla hematopoezy i ochrony przed stresem oksydacyjnym [Koletzko i in. 2005].

Mleko owcze i kozie cechuje się najwyższą zawartością wapnia, fosforu, magnezu i cynku, co wyróżnia je pod względem wartości mineralnej. Stężenie wapnia wynosi odpowiednio: 170–200 $\text{mg}/100\text{ ml}$ w mleku owczym, 130–150 $\text{mg}/100\text{ ml}$ w kozim, 120–130 $\text{mg}/100\text{ ml}$ w krowim, natomiast w mleku ludzkim tylko 25–35 $\text{mg}/100\text{ ml}$ [Jensen 2002, Park i Haenlein 2006]. Pomimo najniższej zawartości wapń z mleka kobiecego jest najlepiej przyswajalny – jego biodostępność przekracza 60% dzięki obecności laktozy, β -kazeiny oraz korzystnemu stosunkowi wapnia do fosforu. Mikroelementy takie jak żelazo, cynk, miedź, selen i jod występują w mleku w niewielkich ilościach, lecz pełnią istotne funkcje biologiczne, m.in. w regulacji odporności, procesach oksydacyjnych oraz w pracy tarczycy. Mleko owcze i kozie zawiera wyższe stężenia tych pierwiastków

w porównaniu z mlekiem krowim, jednak to mleko kobiece dostarcza je w formach lepiej przyswajalnych – m.in. dzięki obecności laktoferyny i białek nośnikowych [Combs 2001].

Oligosacharydy, immunoglobuliny, czynniki wzrostu i hormony

Wśród bioaktywnych składników mleka szczególne znaczenie przypisuje się oligosacharydom, immunoglobulinom oraz czynnikom wzrostu i hormonom, które pełnią istotne funkcje regulacyjne, odpornościowe i ochronne, zwłaszcza u niemowląt i noworodków. Oligosacharydy mleka występują w najwyższym stężeniu w mleku kobiecym, gdzie ich zawartość sięga od 5 do 15 g/l, podczas gdy w mleku krowim, kozim i owczym obecne są jedynie w ilościach śladowych, nieprzekraczających 0,05–0,1 g/l [Urashima i in. 2018]. Oligosacharydy mleka ludzkiego to złożone wielocukry oparte na laktozie z przyłączonymi resztami fukozy i kwasu sjałowego. Nie ulegają trawieniu, są fermentowane przez *Bifidobacterium*, wspierają mikroflorę, odporność i barierę jelitową. Immunoglobulina A (IgA) chroni błony śluzowe, neutralizuje patogeny i łagodzi stany zapalne [Brandtzaeg 2010]. Średnia zawartość wydzielniczej IgA w mleku dojrzalym wynosi 1–2 g/l, natomiast w sianie może dochodzić nawet do 10 g/l. Mleko krowie, kozie i owcze zawiera głównie immunoglobulinę G, której ilość waha się od 0,6 do 1,0 g/l, przy czym jej forma i odporność na trawienie są mniej dostosowane do ludzkiego układu pokarmowego, co ogranicza jej funkcjonalność w kontekście odżywiania niemowląt. Czynniki wzrostu i hormony obecne w mleku, mimo że występują w stosunkowo niewielkich ilościach, wywierają korzystny wpływ na rozwój tkanek i funkcje układu odpornościowego. Do najlepiej poznanych należy insulinopodobny czynnik wzrostu I (IGF-I), naskórkowy czynnik wzrostu (EGF) oraz transformujący czynnik wzrostu beta (TGF- β). IGF-I występuje w mleku kobiecym w stężeniu 5–25 ng/ml i bierze udział w regulacji wzrostu i dojrzewania komórek nabłonka jelitowego, natomiast EGF, obecny w sianie w ilości 30–50 ng/ml, wspomaga regenerację tkanek i szczelność bariery jelitowej [Donovan 2006]. TGF- β wykazuje działanie immunomodulujące, promując tolerancję pokarmową i ograniczając nadreaktywność układu odpornościowego. Stężenia tych czynników są znacząco wyższe w mleku kobiecym niż w mleku krowim, kozim czy owczym, w których są obecne w śladowych lub trudnych do oznaczenia ilościach. Wśród hormonów obecnych w mleku istotną rolę pełnią leptyna (0,2–1,0 ng/ml), grelina, insulina i adiponektyna. Leptyna reguluje łaknienie i gospodarkę energetyczną oraz wspiera rozwój odporności u niemowląt. Insulina i grelina uczestniczą w regulacji glikemii oraz funkcjonowaniu osi jelitowo-mózgowej. Mleko zwierząt gospodarskich zawiera te hormony w niższych stężeniach i często w formie mniej aktywnej biologicznie, co ogranicza ich wpływ na organizm ludzki po spożyciu.

Bibliografia

- Bahar A.A., Ren D., McGrath P.T. (2023). Bioactive peptides for anticancer therapies. *Cancer Cell International*, 23, 115.
- Bevilacqua C., Martin P., Candalh C., Fauquant J., Piot M., Roux F., Léonil J. (2000). Secreted phosphoproteins are differently expressed in human and ruminant milk. *Journal of Dairy Research*, 67, 129–138.
- Brandtzaeg P. (2010). The mucosal immune system and its integration with the mammary glands. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 51(3), 11–19.
- Cashman K.D. (2006). Milk minerals (including vitamin D) and bone health. *International Dairy Journal*, 16(11), 1389–1398.
- Cichosz G., Czeżot H. (2013). Bioaktywne peptydy mleka – potencjalne znaczenie w terapii i profilaktyce chorób cywilizacyjnych. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, 67, 130–145.
- Combs G.F. Jr. (2001). Selenium in global food systems. *British Journal of Nutrition*, 85(5), 517–547.
- Corl B.A., Baumgard L.H., Dwyer D.A., Griinari J.M., Phillips B.S., Bauman D.E. (2001). The role of $\Delta 9$ -desaturase in the production of cis-9, trans-11 CLA. *Journal of Dairy Science*, 84(4), 1025–1031.
- Danków R., Pikul J. (2011). Przydatność technologiczna mleka koziego do przetwórstwa. *Nauka Przyroda Technologie*, 5(2), 2–10.
- Donovan S.M. (2006). Role of human milk components in gastrointestinal development: current knowledge and future needs. *Journal of Pediatrics*, 149(5), 49–61.
- Fox P.F. (2003). The major constituents of milk. [W:] G. Smit (red.): *Dairy processing. Improving quality*. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Boca Raton, 5–38.
- Fox P.F., McSweeney P.L.H. (2015). *Dairy Chemistry and Biochemistry*. Springer, New York.
- Gallier S., Singh H. (2015). Structure–function relationship of the milk fat globule membrane for nutrient delivery and health. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 18(2), 147–152.
- German J.B., Dillard C.J. (2006). Composition, structure and absorption of milk lipids: a source of energy, fat-soluble nutrients and bioactive molecules. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(1), 57–92.
- Ghosh S.K., Chakraborty P., Chatterjee S. (2022). A comprehensive review on lactoferrin: A natural multifunctional protein. *Food & Function*, 13(1), 19–38.
- Giambra M., Erhardt G., Di Gregorio G., Bordonaro A. (2013). Investigating the genetic polymorphism of sheep milk proteins: A comparison of analytical methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(9), 2127–2133.
- Główny Urząd Statystyczny. (2024). *Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2024*. Warszawa: GUS. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-rolnictwa-2024,6,18> (dostęp: 13.04.2025).
- Guaadaoui A., Benaicha S., Elmajdoub N., Bellaoui M., Hamal A. (2014). What is a bioactive compound? A combined definition for a preliminary consensus. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(3), 174–179.
- Haenlein G.F.W. (2004). Goat milk in human nutrition. *Small Ruminant Research*, 51(2), 155–163.
- Haug A., Hostmark A.T., Harstad O.M. (2007). Bovine milk in human nutrition – a review. *Lipids in Health and Disease*, 6, 25.
- Hayes M., Stanton C., Fitzgerald G.F., Ross R.P. (2007). Bioactive peptides from milk: Animal determinants and their implications in human health. *Journal of Dairy Research*, 74(1), 20–29.

- Heck J.M.L., Schennink A., Valenberg H.J.F. van, Bovenhuis H., Visker M.H.P.W., Arendonk J.A.M. van, Hooijdonk A.C.M. van (2009). Effects of milk protein variants on the protein composition of bovine milk. *Journal of Dairy Science*, 92(3), 1192–1202.
- Hernell O., Timby N., Domellöf M., Lönnerdal B. (2016). Clinical benefits of milk fat globule membranes for infants and children. *The Journal of Pediatrics*, 173, 60–65.
- Hunter J.E., Zhang J., Kris-Etherton P.M. (2010). Cardiovascular disease risk of dietary stearic acid compared with trans, other saturated, and unsaturated fatty acids: a systematic review. *American Journal of Clinical Nutrition*, 91(1), 46–63.
- Innis S.M. (2007). Human milk: Maternal dietary lipids and infant development. *Proceedings of the Nutrition Society*, 66(3), 397–404.
- Jandal J.M. (1996). Comparative aspects of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, 22(2), 177–185.
- Jensen R.G. (2002). The composition of bovine milk lipids: January 1995 to December 2000. *Journal of Dairy Science*, 85(2), 295–350.
- Koletzko B., Kries R. von, Closa R., Escribano J., Scaglioni S., Giovannini M., Grote V. (2005). Can infant feeding choices modulate later obesity risk? *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(3), 584–589.
- Korhonen H., Pihlanto A. (2006). Bioactive peptides: Production and functionality. *International Dairy Journal*, 16(9), 945–960.
- Kuczyńska B., Nałęcz-Tarwacka T., Gołębiewski M., Puppel K., Ślósarz J. (2013). Bioaktywne składniki jako wyznacznik jakości prozdrowotnej mleka. *Medycyna Rodzinna*, 1, 11–18.
- Lock A.L., Bauman D.E. (2004). Modifying milk fat composition of dairy cows to enhance fatty acids beneficial to human health. *Lipids*, 39(12), 1197–1206.
- Lönnerdal B. (2013). Bioactive proteins in breast milk. *Journal of Paediatrics and Child Health*, 49(1), 1–7.
- Mather I.H. (2000). A review and proposed nomenclature for major proteins of the milk-fat globule membrane. *Journal of Dairy Science*, 83(2), 203–247.
- Parodi P.W. (2003). Conjugated linoleic acid in food. [In:] J.L. Sebedio, W.W. Christie, R. Adloff (Eds.): *Advances in Conjugated Linoleic Acid Research*, Volume 2. AOCS Press, 101–122.
- Park Y.W., Haenlein G.F.W. (Eds.) (2006). *Handbook of milk of non-bovine mammals*. Blackwell Publishing.
- Tomita M., Wakabayashi H., Yamauchi K., Teraguchi S., Hayasawa H. (2002). Bovine lactoferrin and lactoferricin derived from milk: Production and applications. *Biochemistry and Cell Biology*, 80, 109–112.
- Urashima T., Hirabayashi S., Sato S., Kobata A. (2018). Human milk oligosaccharides as essential tools for basic and application studies on galectins. *Trends in Glycoscience and Glycotechnology*, 30(172), 51–65.
- Zare-Zardini H., Saberian E., Jenča A., Ghanipour-Meybodi R., Petrášová A., Jenčová J. (2024). From defense to offense: antimicrobial peptides as promising anticancer agents. *Frontiers in Oncology*, 14, 1463088.
- Zimecki M., Artym J. (2005). Milk-derived proteins and peptides in clinical trials. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, 59, 309–323.

Bioactive Components of Milk

Abstract: Milk serves as a rich source of bioactive components whose physiological effects have been extensively documented. The principal bioactive constituents include peptides, oligosaccharides, long-chain fatty acids, immunoglobulins, lactoferrin, various growth factors, and hormones. These

compounds demonstrate anti-inflammatory, antioxidant, immunomodulatory, and antimicrobial activities, and contribute to the maturation and optimal function of the gastrointestinal tract, the nervous system, and the immune system. Some of these bioactives also play key roles in regulating lipid metabolism, enhancing mineral bioavailability, and conferring protection against oxidative stress and microbial infection. Collectively, these properties render milk a functional food capable of supporting physiological homeostasis and mitigating the risk of lifestyle-related disorders – such as obesity, insulin resistance, and gut microbiota dysbiosis. The biological activity of milk's bioactive constituents is modulated by several factors, including the milk's compositional profile, processing techniques, and the physiological and nutritional status of the recipient.