

Weronika Jacuńska¹ , Wioletta Biel 

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Biotechnologii i Hodowli Zwierząt, Katedra Nauk o Zwierzętach Monogastrycznych, Klemensa Janickiego 29, 71–270 Szczecin

¹Studenckie Koło Naukowe Żywieniowców

e-mail: wioletta.biel@zut.edu.pl

ZNACZENIE I ŹRÓDŁA DŁUGOŁAŃCUCHOWYCH WIELONASYCONYCH KWASÓW TŁUSZCZOWYCH DHA I EPA W DIECIE PSÓW

THE SIGNIFICANCE AND DIETARY SOURCES OF LONG-CHAIN POLYUNSATURATED FATTY ACIDS DHA AND EPA IN CANINE DIET

ABSTRACT

Fatty acids (FA) are the main structural material that the body uses to derive structural components of cells, tissues and organs, and for the synthesis of certain biologically active substances. Among them, long-chain polyunsaturated fatty acids (LC-PUFA) of the n-3 family have been the subject of much interest in recent years. The results of a number of studies have shown that LC-PUFAs, among other things, stimulate the cardiovascular system, as well as play a key role in the development of the nervous system during embryonic life and early growth. The parental form of the n-3 fatty acid family is linolenic acid (ALA, C18:3 n-3), and the bioactive forms are eicosapentaenoic acid (EPA; C20:5 n-3) and docosahexaenoic acid (DHA; C22:6 n-3) and their derivatives. The dog's body does not have the ability to synthesize ALA acid. Therefore, EPA and DHA acids must be supplied directly from the dog's diet. Their main dietary sources to this day are mainly oily marine fish. Unfortunately, the deteriorating situation of fish stocks, water purity or climate change is prompting the search for additional options for obtaining or producing LC-PUFA DHA and EPA. These acids are part of lipids found mainly among marine organisms and plants, but they can also be produced by yeast or molds. This article aims to present the most important beneficial actions of EPA and DHA acids and the common and unconventional sources of their presence.

KEY WORDS: docosahexaenoic acid, eicosapentaenoic acid, microalgae, fish, nutrition.

STRESZCZENIE

Kwasy tłuszczowe (FA, fatty acids) stanowią główny materiał budulcowy, z którego organizm czerpie składniki strukturalne komórek, tkanek i narządów oraz do syntezy niektórych substancji biologicznie czynnych. Spośród nich długołańcuchowe kwasy tłuszczowe (LC-PUFA, long-chain polyunsaturated fatty acids) z rodziny n-3 są w ostatnich latach obiektem dużego zainteresowania. Wyniki wielu badań wykazały, że LC-PUFA m.in. pobudzają układ sercowo-naczyniowy, jak również pełnią kluczową rolę w rozwoju układu nerwowego podczas życia płodowego i we wczesnym wzroście. Macierzystą formą rodziny kwasów n-3 jest kwas linolenowy (ALA, C18:3 n-3), a bioaktywnymi formami jest kwas eikozapentaenowy (EPA; C20:5 n-3) oraz kwas dokozaheksaenowy (DHA; C22:6 n-3) oraz ich pochodne. Organizm psa nie posiada zdolności syntezy kwasu ALA. Z tego względu kwasy EPA i DHA muszą być dostarczane bezpośrednio z diety psa. Ich głównym źródłem w diecie do tej pory są głównie tłuste ryby morskie. Niestety pogarszająca się sytuacja zasobów rybnych, czystości wód czy zmian klimatycznych skłania do poszukiwania dodatkowych możliwości pozyskania lub produkcji LC-PUFA DHA i EPA. Kwasy te wchodzi w skład lipidów występujących głównie wśród organizmów morskich i roślin, ale także mogą być one produkowane przez drożdże czy pleśnie. Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie najważniejszych korzystnych działań kwasów EPA i DHA oraz powszechnych i niekonwencjonalnych ich źródeł występowania.

SŁOWA KLUCZOWE: kwas dokozaheksaenowy, kwas eikozapentaenowy, mikroalgi, ryby, żywienie.

WSTĘP

Żywnienie zwierząt towarzyszących jest tematem, który zyskuje na popularności. Związane jest to przede wszystkim ze wzrastającą świadomością opiekunów, dotyczącą prawidłowego żywienia oraz wzrastającą stale liczbą zwierząt pod ich opieką. Prawidłowo zbilansowana dieta powinna zawierać wszystkie niezbędne składniki odżywcze w odpowiednich ilościach i proporcjach. Tłuszcz jest podstawowym, wysokoenergetycznym makroskładnikiem. Jednocześnie uważa się, że wysoki poziom spożycia tłuszczu, jak i niewłaściwy jego skład mogą powodować zagrożenia różnymi chorobami cywilizacyjnymi także u psów (Lenox and Bauer, 2013; Lenox, 2016; Moinard et al., 2020). Dlatego przywiązuje się coraz większą uwagę do profilu kwasów tłuszczowych (FA, fatty acids).

Niektóre FA, takie jak wielonienasycone kwasy tłuszczowe (LC-PUFA, long-chain polyunsaturated fatty acids) z rodziny n-3; kwas dokozaheksaenowy (DHA, C22:6) i eikozapentaenowy (EPA, C20:5) mają szczególne znaczenie. Zgodnie z zaleceniami Europejskiej Federacji Przemysłu Żywnieniowego Zwierząt Domowych (FEDIAF, the European Pet Food Industry Federation) zaliczane jednak są tylko u szczeniąt do grupy związków niezbędnych/egzogennych (EFA, essential fatty acids) w diecie (FEDIAF, 2021), a powinny – w każdej grupie wiekowej. Kwasy te mają ograniczoną zdolność jednostek do ich syntezy. W konsekwencji najskuteczniejszym sposobem na zwiększenie ich stężenia w tkankach jest włączenie ich do diety psa. Niedobór tych kwasów został powiązany z takimi chorobami jak niepłodność, choroba niedokrwienna serca, zapalenie naczyń obwodowych skóry, słabe przyrosty masy ciała u psów rosnących, zaburzenia funkcji poznawczych czy retinopatie oczu (Yurko-Mauro, 2010; Bauer, 2011; Lenox and Bauer, 2013; Lenox, 2016; Gaylord, Remillard and Saker, 2018; Alonge et al., 2019; Santos et al., 2021). Celem pracy jest przedstawienie aktualnej wiedzy naukowej na temat roli i źródeł długołańcuchowych wielonienasyconych kwasów tłuszczowych DHA i EPA w diecie psów.

BUDOWA CHEMICZNA I PODZIAŁ KWASÓW TŁUSZCZOWYCH

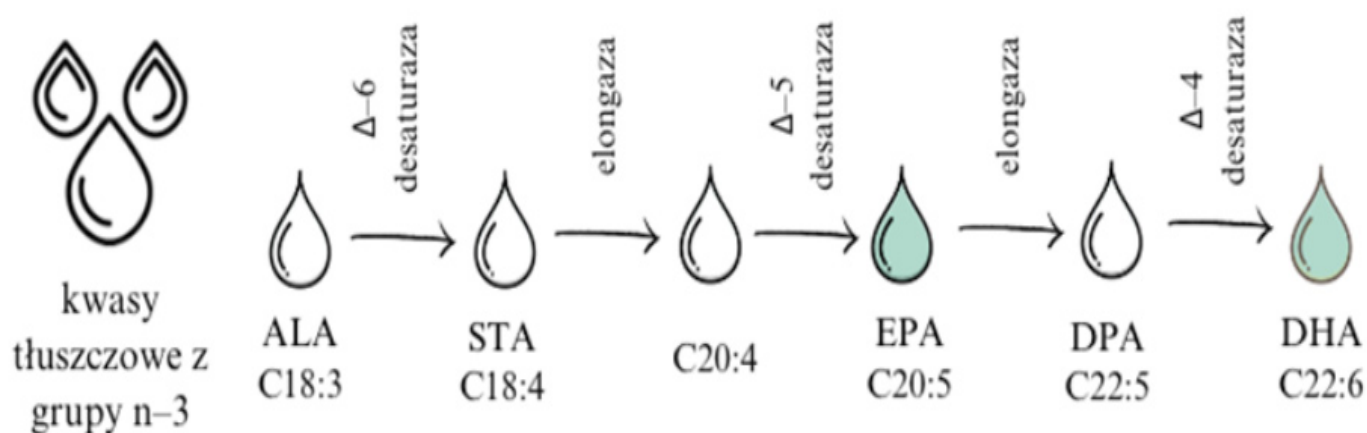
Lipidy są związkami organicznymi najczęściej zbudowanymi z atomów węgla, tlenu i wodoru o bardzo zróżnicowanej budowie, nie rozpuszczają się w wodzie. Podstawowym składnikiem tłuszczów prostych i złożonych są kwasy tłuszczowe (FA, fatty acids). Lipidy proste mają dwa komponenty – kwasy tłuszczowe oraz składniki alkoholowe (O'Keefe and Sarnoski, 2017). W procesie ich hydrolizy powstają dwa składniki – alkohol i kwas. Lipidy złożone z kolei obejmują fosfolipidy, glikolipidy i sfingolipidy, a każde z nich jest szeroko rozpowszechnione w całym organizmie, ponieważ są składową błon komórkowych. W wyniku hydrolizy, powstają trzy lub więcej różnych związków. W pożywieniu najczęściej występują kwasy o parzystej liczbie atomów węgla ułożonych w łańcuchu prostym. Podziału FA można dokonać poprzez określenie liczby atomów węgla w łańcuchu. Wyróżnia się tutaj kwasy tłuszczowe krótkołańcuchowe (SCFA, short-chain fatty acids), zawierające maksymalnie do 6 atomów węgla, następnie kwasy tłuszczowe średniołańcuchowe (MCFA, medium-chain fatty acids) zawierające od 8 do 12 atomów węgla. Długołańcuchowe kwasy tłuszczowe (LCFA, long-chain fatty acids) zawierają od 14 do 24 atomów węgla (Balasinska, Jank and Kulasek, 2010; Ceregrzyn, Lechowski and Barszczewska, 2013). Biorąc więc pod uwagę liczbę atomów węgla kwasy EPA i DHA zaliczane są do długołańcuchowych (LCFA). Nieco inny podział dotyczy rodzaju i liczby wiązań podwójnych w cząsteczkach tworzących dane kwasy. Klasyfikacja ta wyróżnia nasycone (SFA, saturated fatty acids) i nienasycone (UFA, unsaturated fatty acids) kwasy tłuszczowe. Kwasy UFA dzielą się na jednonienasycone (MUFA, monounsaturated fatty acids) posiadające jedno wiązanie podwójne oraz wielonienasycone (PUFA, polyunsaturated fatty acids) mające dwa lub więcej wiązań podwójnych w cząsteczce. Kwas EPA posiada 5 wiązań podwójnych w łańcuchu węglowym w konfiguracji cis, natomiast kwas DHA wiązań podwójnych izolowanych zawiera 6. Podsumowując, w opisanej klasyfikacji kwasy te zaliczane są do wielonienasyconych długołańcuchowych kwasów tłuszczowych (LC-PUFA).

BUDOWA CHEMICZNA I PODZIAŁ KWASÓW TŁUSZCZOWYCH

Według wytycznych żywieniowych opracowanych przez FEDIAF kwasy EPA (C20:5 n-3) i DHA (C22:6 n-3), a właściwie ich suma, obligatoryjnie musi się znaleźć w dawce pokarmowej psów na etapie wczesnego (poniżej 14 tyg. życia) oraz późnego wzrostu (powyżej 14 tyg. życia) w ilości 0,13 g/1000 kcal diety (FEDIAF, 2021). Oprócz tych kwasów tłuszczowych do EFA zalicza się również kwas linolowy (LA, C18:2 n-6), kwas α -linolenowy (ALA, C18:3 n-3) oraz kwas arachidonowy (C20:4 n-6). Na etapie dorosłego organizmu w.w. wytyczne definiują jedynie minimalne zalecane ilości dla kwasu LA.

Proces syntezy kwasów EPA i DHA u psów rozpoczyna się od kwasu ALA. Aby przekształcić ten kwas w EPA i DHA, psy wykorzystują obecność dwóch enzymów: Δ -6 desaturazy i Δ -5 desaturazy (ryc. 1), ale proces ten jest zdecydowanie niewystarczający, aby móc mówić o ilościach zbliżonych do poziomu zalecanego w terapii chorób (Lindqvist et al., 2023). Aktywność tych enzymów jest zależna od ekspresji genu FADS1 (Fatty Acid Desaturase 1) i FADS2 (Fatty Acid Desaturase 2), kodujących desaturazę Δ -5 i desaturazę Δ -6 (Glaser, Heinrich and Koletzko, 2010; Stanisław Proskura et al., 2019).

Oba omawiane w pracy kwasy wykazują zdecydowanie odmienne działanie w organizmie.



RYCINA 1. KONWERSJA KWASÓW Z RODZINY N-3 W LC-PUFA EPA I DHA Z ICH PREKURSORÓW (OPRACOWANIE WŁASNE NA PODSTAWIE MARCINIAK-LUKASIAK, 2011).

Kwas DHA jest niezbędnym składnikiem diety młodych osobników, gdyż jego obecność warunkuje prawidłowy rozwój oraz funkcjonowanie układu nerwowego i siatkówki oka (Mirowski, 2018; Kaur et al., 2020). Jest prekursorem dla dokozatrienów i neuroprotektyn, wchodzi w skład błon komórkowych i może modulować transport glukozy (Tassoni et al., 2008; Farooqui, 2009). Ilość oraz jakość lipidów budujących błony komórkowe będzie bezpośrednio oddziaływać na jej charakter poprzez określenie przepuszczalności, integralności oraz płynności. Różnice w składzie błony mogą zależeć od charakterystyki lipidów budujących ową ścianę – dominacja kwasów nasyconych spowoduje bardziej zbity charakter błony, natomiast przewaga kwasów nienasyconych da efekt odwrotny – rozluźnienie przestrzeni wpływając na jej zwiększoną przepuszczalność oraz elastyczność (Staroszczyk and Sikorski, 2017). Największe ilości kwasu DHA w mózgu występują w korze przedczołowej, a najmniejsze w istocie czarnej będącej częścią śródmózgowia (Farooqui, 2009). Kora przedczołowa odpowiada chociażby za procesy uczenia się, kontrolę emocji czy koordynację ruchową, a niedostarczenie odpowiedniej ilości DHA wraz z pokarmem może w przyszłości rzutować na pogorszone funkcjonowanie poznawcze u dorosłych osobników. Kwas EPA z kolei nie występuje w tak znacznych ilościach w błonach komórkowych, ale za to jest niezbędny do przekazywania sygnałów między komórkami nerwowymi (Evbuomwan, Omotosho and Mgbojikwe, 2023; Stachowicz, 2023). Odpowiada także za syntezę prostaglandyn i leukotrienów, stąd odpowiednie ukształtowanie wciąż dojrzewającego układu odpornościowego wymaga uwzględnienia w diecie kwasu EPA (Serhan, 2005; Calder, 2020).

W diecie ludzi dobrymi źródłami EFA mogą być produkty oparte na roślinach oleistych jak i na surowcach zwierzęcych. W przypadku psów to surowce zwierzęce stanowią największą część diety, dlatego ich

rodzaj powinien zostać dobrany w taki sposób, aby zapewnić wszystkich niezbędnych składników odżywczych.

WYKORZYSTANIE LC-PUFA EPA I DHA W PROFILAKTYCE CHORÓB PSÓW

UKŁAD KOSTNO-STAWOWY

Choroba zwyrodnieniowa stawów (OA, osteoarthritis/osteoartroza) jest główną przyczyną przewlekłego bólu u psów (Sandersoln et al., 2009; Catarino et al., 2020), skutkującego zmniejszoną aktywnością fizyczną. Powszechnie stosowane są w OA niesteroidowe leki przeciwzapalne (NLPZ) (Pye et al., 2022), które niestety mogą powodować szereg reakcji niepożądanych. Coraz chętniej wspierane jest leczenie farmakologiczne poprzez stosowanie substancji czynnych o udowodnionym działaniu. Badania wskazują, że stosowanie PUFA z rodziny n-3 łagodzi objawy kliniczne OA (Fritsch et al., 2010; Barbeau-Grégoire et al., 2022). Zasadność stosowania olejów z ryb tłustych/morskich u psów z OA wynika z obecności w nich dużych ilości PUFA, zwłaszcza z ostatnich etapów ich metabolizmu, czyli omawianego w niniejszym artykule kwasu EPA i DHA. Wzbogacenie diety psa w kwasy tłuszczowe z rodziny n-3 wpływa na skład lipidowy błon komórkowych, zmniejszając w nich zawartość kwasu arachidonowego (AA, C20:4, n-6) wchodzącego w skład błony komórkowej, która w przebiegu OA zostaje uszkodzona. Kwasy z grupy n-6 posądzają się o działania prowadzące do degradacji chrząstki, jeśli ich ilość w diecie jest zbyt duża (Kobayashi et al., 2008). Kwas AA jest metabolizowany do prozapalnych czynników lipidowych takich jak prostaglandyna E2 i leukotrien B4 (Kamola et al., 2013).

Mechanizm wielu leków wykorzystywanych w terapii OA polega na blokowaniu konwersji kwasu AA, dzięki czemu rozwój stanu zapalnego zostaje zahamowany. Wykazano, że podaż diety u psów wzbogaconej olejem rybnym zawierającej kwas EPA zmieniło skład lipidowy błon komórkowych, zmniejszając w nich zawartość kwasu arachidonowego (Leblanc et al., 2008; Roush et al., 2010). Dodatkowo, kwas ten wpływa na spowolnienie mechanizmów przyczyniających się do rozkładu tkanki chrzęstnej (Curtis et al., 2000; Roush et al., 2010; Johnson, Lee and Swanson, 2020). Kwas EPA ma także działanie przeciwzapalne, ponieważ hamuje produkcję cytokin prozapalnych (Venkatraman and Meksawan, 2002). Wykazano w badaniach klinicznych, że podawanie psom oleju rybiego przez 16 tygodni znacząco poprawiło wiele parametrów świadczących o rzeczywistym złagodzeniu objawów bólowych (Hielm-Björkman et al., 2012). Dlatego włączenie ich do diety może być szczególnie zalecane u zwierząt z OA, które nie mogą przyjmować NLPZ. Sugerowana dawka: 174,5 mg EPA+DHA/kg m.c. (Richter, 2017). Podawanie oleju rybiego bogatego w kwasy EPA i DHA ma uzasadnienie u psów spożywających głównie karmy komercyjne, które mają przeważnie wysoki stosunek kwasów n-6 do n-3 (Jacuńska et al., 2022), co może prowadzić do deficytu. Dodatkowo, karmy komercyjne nie zawsze są wystarczającym źródłem LC-PUFA, gdyż mogą zawierać ilości mniejsze niż deklarowane na etykiecie produktu (Jacuńska, 2022).

UKŁAD SERCOWO-NACZYNIOWY

Kwasy tłuszczowe EPA i DHA wykazują przeciwzapalne działanie, które może mieć pozytywny wpływ na leczenie psów cierpiących z powodu zmian zwyrodnieniowych zastawek przedsionkowo-komorowych, przetrwałego przewodu tętniczego czy ubytków przegrody międzykomorowej. Działanie tych kwasów tłuszczowych polega na ograniczaniu funkcjonowania mediatorów zapalnych co prowadzi do zmniejszenia katabolizmu białek w organizmie (Hirschberg et al., 1990; Cottin, Sanders and Hall, 2011; Calder, 2012). W schorzeniach układu sercowo-naczyniowego może dochodzić do arytmii serca, a dodanie kwasów EPA i DHA może pomóc w ograniczeniu tego stanu dzięki ich antyarytmicznemu działaniu. Wbudowywanie się w strukturę błon komórkowych obserwuje się nie tylko w obszarach tkanki mózgowej czy tkanki chrzęstnej, ale także gdy mowa o sercu – w błonie mięśnia sercowego. Wiedzę tę wykorzystuje się w badaniach określających rolę LC-PUFA w zapobieganiu arytmii serca, migotaniu komór czy niedokrwieniu mięśnia sercowego (McLennan, 2001), a także w zapobieganiu miażdżycy. Kwas DHA może także regulować przepuszczalność kanałów jonowych poprzez zmiany w pobudliwości błony komórkowej w sercu (Ferrier et al., 2002).

UKŁAD POKARMOWY

Wiele schorzeń związanych z układem pokarmowym jest powiązanych z występowaniem stanów zapalnych. Kwasy EPA i DHA, ze względu na swoje właściwości, mogą złagodzić i zapobiec uciążliwym stanom zapalnym. U zwierząt z dysfunkcją przewodu pokarmowego, oprócz hamowania procesów zapalnych, kwasy te powinny znaleźć się w dawce pokarmowej, gdyż stanowią cenne źródło energii. Zmiany diety w przypadku nieswoistego zapalenia jelit (IBD, inflammatory bowel disease) u psów uwzględniają zmiany proporcji kwasów tłuszczowych poprzez zwiększenie udziału kwasów n-3 w stosunku do kwasów n-6 (Simpson, 1998).

W badaniach na myszach postawiono hipotezę, że kwasy EPA i DHA mogą blokować rozwój zapalenia jelita grubego poprzez wzmocnienie bariery śluzowej okrężnicy (Fang et al., 2022). Badania te potwierdziły ich dobroczynny wpływ na błonę śluzową jelita grubego, tym samym tworząc odpowiednie warunki do bytowania korzystnych bakterii. W przebiegu IBD dość istotnym czynnikiem jest produkcja czynnika martwicy nowotworów α (TNF- α , tumor necrosis factor α), która zostaje obniżona przy zastosowaniu kwasów EPA i DHA (Gupta, Srivastava and Lall, 2019). Zapalenie jelita grubego wiąże się z pogorszonym transportem substancji odżywczych przez uszkodzenia błony śluzowej, a kwas DHA może ten proces skutecznie przywrócić do pierwotnego stanu (Castilla-Madrigal et al., 2020). Wynika to z obecności wyspecjalizowanych mediatorów lipidowych takich jak MaR1, RvD1 i RvD2, które wydają się być obiecujące w kontekście leczenia oraz wspomagania pacjentów z nieswoistym zapaleniem jelit. Kwas EPA z kolei może działać łagodząco na podrażniony nabłonek jelita grubego. Wyniki te uzyskano na modelu mysim z indukowanym wrzodziejącym zapaleniem z zastosowaniem niskich i wysokich dawek EPA oraz DHA jako substancji potencjalnie przydatnych (Zhang et al., 2021). Dzięki zastosowaniu wysokich dawek EPA, autorom udało się uzyskać wyniki wskazujące na obniżony poziom cytokin i komórek zapalnych, a nawet zaobserwowano odnowę uszkodzonych komórek nabłonka.

UKŁAD NERWOWY

Kwas DHA odgrywa kluczową rolę w zdrowym funkcjonowaniu układu nerwowego oraz siatkówki oka, co z kolei wpływa na rozwój funkcji poznawczych i procesów uczenia się u psów (Zicker et al., 2012; Mirowski, 2018). Mechanizm ten jest związany z właściwościami przeciwzapalnymi kwasów tłuszczowych, które dodatkowo wpływają na metabolizm kwasu arachidonowego. Wzrost ich ilości w błonach komórkowych prowadzi do obniżenia stężenia kwasu arachidonowego poprzez konkurencyjne wypieranie go (Ahlström et al., 2004). W mózgu kwas DHA ma zdolność utrzymywania integralności struktur między częścią presynaptyczną a postsynaptyczną komórek nerwowych, co prowadzi do poprawy ich komunikacji i aktywności (Farooqui, 2011).

Utrzymanie LC-PUFA w diecie na odpowiednich poziomach może także wpływać na działanie układu serotonergicznego (Kaur et al., 2020). Produktem metabolizmu serotoniny jest aldehyd 5-hydroksyindoloctowy, który następnie utleniony jest do kwasu 5-hydroksyindoloctowego (Semczuk-Kaczmarek et al., 2018). Kwas ten występował w podwyższonych ilościach u zwierząt spożywających większe ilości DHA w diecie (Jiang, Liang and Shi, 2012). Badania wykazały, że zmiana diety u dojrzałych psów na bogatą w olej rybi, witaminy z grupy B, antyoksydanty i L-argininę przynosi korzyści, które przejawiają się w polepszonym funkcjonowaniu poznawczym (Pan et al., 2018). Jest to niezwykle przydatne działanie, gdyż zaburzenia poznawcze u psów w wieku 11–12 lat może wykazywać nawet połowa osobników (Neilson et al., 2001), chociaż zaburzenia funkcji poznawczych u psów (CCD, canine cognitive dysfunction/CDS, cognitive dysfunction syndrome) będące odpowiednikiem choroby Alzheimer'a u ludzi (AD, Alzheimer's disease) mogą dotyczyć psów już w wieku 8 lat (Dewey et al., 2019). Kwasy te można także wykorzystać w spowolnieniu procesów starzenia się mózgu, dzięki ich ochronnemu działaniu na komórki nerwowe (Echeverría et al., 2017).

NIEWYDOLNOŚĆ NEREK

W przypadku niewydolności nerek nie istnieją żadne metody leczenia, które mogłyby przywrócić nerkom całkowitą wydolność, jeśli doszło do ostrej lub przewlekłej niewydolności tego narządu. Niestety objawy niewydolności nerek zaobserwować można dopiero gdy około 75% nefronów przestaje prawidłowo funkcjonować (Couto and Nelson, 2009). W żywieniu psów z przewlekłą chorobą nerek kwasy n-3 mogą być pomocnym dodatkiem wywierającym działanie renoprotekcyjnej (Heinze, 2016) poprzez obniżanie ciśnienia śródkłębuszkowego (Pedrinelli et al., 2020). W przypadku dodania do diety kwasów EPA i DHA wyraźne efekty obserwuje się po około 6 miesiącach suplementacji (Vedin et al., 2012; Dahms et al., 2016; Hall et al., 2018).

W badaniu na szczurach z towarzyszącą nefropatią cukrzycową wykazano zmniejszenie zwłóknienia cewkowo-śródmiąższowego, które występuje wskutek uszkodzenia lub zapalenia w okolicach narządu, w tym przypadku nerek, po suplementacji kwasem eikozapentaenowym (Chow, 2007). Dodatkowo zauważono obniżenie regulacji białka chemoatrakcyjnego monocytów-1 (MCP-1, monocyte chemoattractant protein 1), którego skutkiem może być osłabiona odpowiedź zapalna. Przeciwnieństwem dla kwasów n-3 są kwasy z rodziny n-6, które nasilają zaburzenia czynności nerek, jednak odpowiednio wysokie stężenie kwasu DHA może kwas arachidonowy (AA, C20:4, n-6) z organizmu wypierać. Sugerowana dawka: 50 – 80 mg/kg m.c. lub 140 mg EPA i DHA/kg m.c (Bauer, 2011; Richter, 2017).

NOWOTWORY

Choroba nowotworowa dotyka zarówno psów młodych jak i tych w podeszłym wieku. Znane są przypadki stwierdzenia obecności komórek nowotworowych nawet u psów, które nie przekroczyły jeszcze 12 miesięcy życia, choć ryzyko zachorowania wzrasta znacząco koło 9 roku życia psa (Gabor and Vanderstichel, 2006; Schmidt et al., 2010). Choroby nowotworowe charakteryzują się nadmiernym wzrostem komórek, prowadzącym do zaburzenia równowagi między ich wzrostem a śmiercią. Wykazano w badaniach na modelach zwierzęcych, że istnieje możliwość wydłużenia czasu przeżycia poprzez połączenie oleju rybnego chociażby z arginina (Ogilvie et al., 2000; Theinel et al., 2023). Kwas DHA ma potencjał zwiększania responsywności komórek rakowych na stosowane leki (Siddiqui et al., 2011; Nabavi et al., 2015), ale jednocześnie działa niekorzystnie na proliferację komórek nowotworowych (Gleissman, Johnsen and Kogner, 2010). Leki stosowane w leczeniu nowotworów takie jak adriamycyna, tlenek arsenu, doksorubicyna, celekoksyb i paklitaksel wykazują silne działanie *in vitro* w połączeniu z kwasem DHA (Ogilvie et al., 2000; Siddiqui et al., 2011).

Nieleczone choroby jelit generujące przewlekły stan zapalny mogą zwiększać ryzyko wystąpienia nowotworów. Kwasy EPA i DHA mogą mieć istotne znaczenie w profilaktyce raka jelita grubego, ponieważ istnieje podejrzenie, że wykazują właściwości przeciwnowotworowe w okrężnicy. Ich dobrym źródłem mogą być mikroalgi, które oprócz tego, że zawierają odpowiednie ilości LC-PUFA, wykazują także działanie przeciwnowotworowe dzięki obecności substancji biologicznie aktywnych takich jak β -karoten i astaksantyna (Talero et al., 2015; Sathasivam and Ki, 2018; Martínez-Ruiz et al., 2022). Mechanizmy, które odpowiadają za tę ochronną rolę wciąż stanowią obiekt badań w celu ich lepszego zrozumienia. Kwasy te wykazują zdolność do hamowania wzrostu komórek nowotworowych i prowokowania ich śmierci, stąd wnioskuje się, że wpływają na każdy etap rozwoju nowotworu (Mirowski and Jachnis, 2018). Sugerowana dawka: 3370 mg EPA+DHA/1000 kcal (Dobson and Lascelles, 2011).

DAWKOWANIE I POTENCJALNE DZIAŁANIA NIEPOŻĄDANE

Zalecane dawki kwasów mogą się różnić w zależności od konkretnego schorzenia, ale co istotne, nie zanotowano poważnych działań niepożądanych związanych z suplementacją tych kwasów. Jedynie bardzo wysokie ilości podawane przez długi czas mogą skutkować objawami ze strony układu pokarmowego, układu krwionośnego prowadząc do nieprawidłowego gojenia się uszkodzeń skóry, interakcji z lekami (Lenox

and Bauer, 2013). Stan taki wpływa także na wrażliwość na insulinę oraz niekorzystnie wpływa na układ odpornościowy. Przestrzeganie zaleceń NRC dotyczących maksymalnych dawek wynoszących nie więcej niż 2800 mg EPA+DHA/1000 kcal powinno zminimalizować to ryzyko (National Research Council, 2006; Lenox and Bauer, 2013).

ŹRÓDŁA KWASÓW EPA I DHA W DIECIE PSÓW

Aby nie doprowadzić do niedoborów PUFA w diecie psów, należy odpowiednie produkty włączyć na stałe do ich jadłospisu. Opiekunowie mają szeroki wybór naturalnych źródeł LC-PUFA, jak i gotowych produktów przeznaczonych dla zwierząt domowych. Najbogatsze źródło kwasów EPA i DHA to oczywiście ryby i oleje z nich pozyskiwane (Usydus et al., 2007; Luczynska, Tonska and Borejszo, 2011; Molversmyr et al., 2022). Szczególnie bogate w te kwasy są tłuste ryby, jak sardynka, łosoś, śledź, tuńczyk, sandacz czy sardela (tab. 1).

Jednak rosnący popyt, powiązany ze wzrostem populacji na świecie sprawia, że pojawił się problem przełowienia najczęściej łowionych ryb na świecie. Również w wyniku postępującego skażenia wód, zmniejsza się populacja ryb morskich stanowiących główne źródła tych cennych kwasów. W poszukiwaniu bardziej przyjaznych środowisku źródeł tych kwasów tłuszczowych warto zatrzymać się na chwilę przy hodowlach ekologicznych. Rozporządzenie nr 848 z 2018 r. reguluje takie kwestie jak dobrostan hodowanych zwierząt w warunkach ekologicznych. Zastosowane składniki w żywieniu tych zwierząt dodatkowo reguluje ustawa z dnia 23 czerwca 2022 r. i wspomniane wcześniej europejskie rozporządzenie 848/2018. Każdy z tych czynników przyczynia się do zmian w profilach odżywczych ryb porównując je do ich konwencjonalnych odpowiedników. Różnice pojawiają się chociażby w udziale tkanki tłuszczowej, ale także w zawartości EPA i DHA w całej kompozycji kwasów tłuszczowych. Na przykładzie łososia *Salmo salar* może być ona wyższa o 48% niż u ryb z hodowli konwencjonalnej (Esaiassen et al., 2022). Bardzo dobrym źródłem tych kwasów jest kryl antarktyczny *Euphausia superba*. Pojawia się coraz więcej alternatywnych źródeł otrzymywania EPA i DHA, takich jak bakterie, grzyby czy mikroalgi, które są obecnie badane pod kątem produkcji komercyjnej. Mikroalgi są pierwszymi producentami EPA i DHA w łańcuchu pokarmowym morskim. Mogą one naturalnie szybko rosnąć w różnych warunkach hodowli o wysokim potencjale produkcji LC-PUFA (Winwood, 2013; Li-Beisson et al., 2019; Mariamenatu and Abdu, 2021). Przykładem mogą być *Cryptocodinium cohnii* lub *Schizochytrium* sp. (Chi et al., 2022; Moniz et al., 2022). Źródła takie jak zooplankton morski (kryl) lub fitoplankton (mikroalgi heterotroficzne) stanowią obiecujące opcje, chociaż pozostają kwestie biologiczne i techniczne które sprawiają, że obecnie są one mało opłacalnymi alternatywami (Tocher, 2015).

Również dzięki postępowi w biotechnologii i modyfikacjom genetycznym uzyskiwane są surowce zawierające kwasy DHA i EPA w naturze ich nie posiadające. Przykładem może być lnianka siewna (*Camelina sativa* L.). Nasiona tej rośliny oleistej należącej do rodziny *Brassicaceae* zawierają 30–40% tłuszczu, z którego otrzymuje się olej rydzowy o bardzo wysokiej wartości odżywczej (Kurasiak-Popowska, 2019). Współczesne transformacje genetyczne lnianki siewnej celem modyfikacja składu kwasów tłuszczowych sprawiły, że w składzie tłuszczu genetycznie zmodyfikowanych (GM) nasion lnianki są również duże ilości kwasów EPA i DHA (tab. 1) (Petrie et al., 2014; Betancor et al., 2021; Ghidoli et al., 2023). Zbliżona sytuacja wystąpiła podczas stworzenia odmiany rzepaku *Brassica napus*, w którym zawartości kwasu DHA odpowiadały tym z olejów rybnych. Pojawiają się również możliwości otrzymywania EPA ze źródeł mikrobiologicznych. Spośród drobnoustrojów pleśnie są najlepszymi producentami EPA, gdyż charakteryzują się zdolnością do wydajnej akumulacji tłuszczów z wysokim udziałem PUFA, w tym EPA.

Badania wskazują, że EPA jest również syntetyzowany przez grupy drobnoustrojów: grzyby strzępkowe (pleśnie), grzyby jednokomórkowe (drożdże) oraz bakterie (Certik and Shimizu, 1999; Ledesma-Amaro and Nicaud, 2016; Cao et al., 2022). Skład FA, w tym EPA zależy od rodzaju drobnoustroju oraz od warunków hodowli. Na przykład zastosowanie 1% oleju lnianego w podłożu hodowlanym *Mortierella elongata* NRRL 5513 pozwoliło na dwukrotnie zwiększenie udziału EPA w tłuszczu ogółem (Dyal and Narine, 2005). Większość drożdży nie wykazuje zdolności do akumulacji EPA w znaczących ilościach, ale aktualne badania koncentrują się na zastosowaniu inżynierii genetycznej pozwalającej modyfikować znane gatunki drożdży

(np. modyfikacje genetyczne szczepu *Yarrowia lipolytica* Y4305) w sposób umożliwiający zwiększoną biomasę EPA nawet do 56% (Xue et al., 2013). Również drożdże *Saccharomyces cerevisiae* po aktywowaniu desaturazy delta-5 są zdolne do przekształcania AA do EPA z dużą wydajnością sięgającą 21% (Hornung et al., 2005). Są one szczególnie ciekawe nie tylko pod względem zawartości LC-PUFA, które są stosowane w profilaktyce chorób zarówno u ludzi jak i zwierząt, ale także są bogactwem bioaktywnych substancji mających zastosowanie nie tylko w żywieniu, ale także w farmaceutyce czy branży biotechnologicznej (Metting and Pyne, 1986; Sathasivam and Ki, 2018; Ścieszka and Klewicka, 2019; Barros de Medeiros et al., 2022; Martínez-Ruiz et al., 2022).

Poziom kwasów tłuszczowych w tkance tłuszczowej zwierząt jest silnie skorelowany z ich dietą, stąd innymi poziomami będą się charakteryzować ryby poławiane i hodowane w akwakulturach (Haliloğlu et al., 2004; Parrish et al., 2015). Podobny wpływ na ich zawartość wywiera płeć, wiek, miejsce połowu, środowisko życia czy pora roku (Kaliniak, Florek and Skątecki, 2015; Zhang et al., 2020). Ryby zamieszkujące obszary morskie zazwyczaj wykazują większy udział tłuszczu w tkance mięśniowej niż ryby słodkowodne, ale jest to nie tylko związane ze środowiskiem ich życia, a więc zasoleniem czy temperaturą wody, ale także z dostępnymi składnikami ich diety. Ryby słonowodne odżywiają się głównie zooplanktonem czy mikroalgami bardzo bogatymi w EPA i DHA, a w przypadku ryb słodkowodnych są to rośliny charakterystyczne dla danego obszaru (Horn et al., 1982; Christensen and Moore, 2008; Carrasco et al., 2012).

Naturalne źródła tych kwasów tłuszczowych obejmują zarówno tłuste ryby, skorupiaki takie jak kryl antarktyczny *Euphausia superba*, ale także mikroalgi *Schizochytrium* sp. czy *Cryptocodinium cohnii*, które w ostatnich latach coraz częściej rozważane są jako składnik diety ludzi jak i psów dzięki swoim bogatym komponentom, a także zrównoważonej uprawy mającej znacznie mniejszy wpływ na środowisko chociażby pod względem wykorzystanej energii, wody czy emisji gazów cieplarnianych (Clarens et al., 2010; Menezes, 2012; Gomez Pinchetti, 2016; Ścieszka and Klewicka, 2019). Obiecującymi źródłami mogą być grzyby strzępkowe, grzyby jednokomórkowe oraz bakterie, których hodowla także wydaje się wywierać mniejszy wpływ na środowisko, a zawartości LC-PUFA przy odpowiednich metodach wytwarzania mogą okazać się ciekawą alternatywą dla ryb czy innych organizmów morskich, których połowy obecnie stają się coraz bardziej problematyczne.

Coraz większa świadomość opiekunów zwierząt dotycząca działania EPA i DHA na organizm psa, a także ludzki wywołuje znaczny wzrost popytu na źródła ich spożycia. Jednocześnie w wyniku postępującego skażenia wód zmniejsza się populacja ryb morskich stanowiących główne źródła tych dwóch LCFA-PUFA. Konieczne staje się poszukiwanie innych „producentów” EPA i DHA. Należy podkreślić, że modyfikacje genetyczne przyniosły istotne zwiększenie produktywności EPA u drożdży olejogennych i znalazły one zastosowanie w produkcji pasz stosowanych w hodowli np. łososia (Berge et al., 2013).

PODSUMOWANIE

Kwasy tłuszczowe EPA i DHA wykazują różnorodne korzystne działanie na organizm psa. Są ważne na każdym etapie życia psa (szczenię, dorosły, senior) wywołując różne pozytywne efekty biologiczne. Lista właściwości i zastosowania terapeutycznego kwasów EPA i DHA jest obszerna. Kwas DHA pełni niezbędną rolę w prawidłowym rozwoju i funkcjonowaniu układu nerwowego oraz siatkówki oka. Stanowi kluczowy element we wspomaganie procesów uczenia się, kontroli emocji i koordynacji ruchowej. Z kolei kwas EPA odgrywa istotną rolę w przekazywaniu sygnałów między komórkami nerwowymi i reguluje funkcje odpornościowe organizmu. W przypadku profilaktyki różnych schorzeń, takich jak choroba zwyrodnieniowa stawów, nowotwory, choroby układu pokarmowego, układu sercowo-naczyniowego i niewydolność nerek, zaleca się stosowanie kwasów EPA i DHA, gdyż swoim działaniem mogą wspomagać leczenie i poprawiać samopoczucie pacjenta.

Należy pamiętać by przestrzegać zaleceń dotyczących maksymalnych dawek kwasów tłuszczowych, uwzględniając zawartości EPA+DHA także w podawanej psu diecie. Ważne jest, aby nie podawać zbyt dużej ich ilości, ponieważ może to spowodować biegunkę, wymioty oraz okresowe krwawienia.

TABELA 1. UDZIAŁ KWASÓW TŁUSZCZOWYCH EPA I DHA W WYBRANYCH SUROWCACH (% SUMY FA).

Wyszczególnienie	EPA	DHA	Źródło danych
Ryby			
Karp (<i>Cyprinus carpio</i> L.)	0,69–4,06	0,65–3,01	(Grela et al., 2010; Luczynska, Tonska and Borejszo, 2011)
Łosoś (<i>Salmo salar</i> L.)	6,04–9,0	3,0–9,93	(Luczynska, Tonska and Borejszo, 2011)
Sandacz (<i>Sander lucioperca</i> L.)	5,10–5,93	13,25–14,28	(Grela et al., 2010)
Sardela (<i>Engraulis encrasicolus</i> L.)	6,33–9,38	8,84–10,34	(Kaya and Turan, 2010)
Sardynki (<i>Sardinops melanostictus</i> J.)	6,9–18,9	10,7–32,5	(Shirai, Terayama and Takeda, 2002)
Śledź (<i>Clupea harengus</i> L.)	4,49–19,1	2,0–21,1	(Linko, Kaitaranta and Vuorela, 1985; Aro et al., 2000)
Tuńczyk (<i>Euthynnus pelamis</i> L.)	2,5–12,4	20,0–34,1	(Saito, Ishihara and Murase, 1997; Peng et al., 2013)
Algi			
<i>Cryptocodinium cohnii</i> S. *	0,1	40–46	(De Swaaf, 2003)
<i>Schizochytrium</i> sp. *	0,27	20,48	(Hadley, Bauer and Milgram, 2017; Mariane et al., 2020)
Oleje			
Olej z menhadena	3,2–16,3	5,0–10,1	(Chen and Yi-Hsu Ju, 2000)
Olej z nasion GM lnicznika siewnego (<i>Camelia sativa</i> L.)	6,0	5,1	(Betancor et al., 2016)
Inne			
Kryl (<i>Euphausia superba</i> D.)	2,6–31,2	1,2–19,2	(Fricke et al., 1984)
Omulek zielonowargowy (<i>Perna viridis</i> L.)	17,89–20	18,30–38,06	(Chan et al., 2004; Loehfelm, Rizwan and Tups, 2021)

*% udział EPA i DHA w sumie kwasów tłuszczowych w przeliczeniu na suchą masę

By włączyć kwasy EPA i DHA do diety psa nie tylko trzeba sięgać po gotowe suplementy. Warto mieć na uwadze, że naturalnym źródłem wielonienasyconych kwasów tłuszczowych z rodziny n–3, a zwłaszcza kwasu EPA i DHA są głównie ryby oraz oleje z nich wytwarzane, algi i fitoplankton morski, ale także ich źródło to grzyby strzępkowe, grzyby jednokomórkowe oraz bakterie.

LITERATURA

Ahlstrøm, Ø. et al. (2004) 'Fatty acid composition in commercial dog foods', *The Journal of nutrition*, 134(8), pp. 2145–2147. doi: 10.1093/jn/134.8.2145S.

Alonge, S. et al. (2019) 'The effect of dietary supplementation of vitamin E, selenium, zinc, folic acid, and n–3 polyunsaturated fatty acids on sperm motility and membrane properties in dogs', *Animals*, 9(2). doi: 10.3390/ani9020034.

- Balasinska, B., Jank Michał and Kulasek Gustaw (2010) 'Właściwości i rola wielonienasyconych kwasów tłuszczowych w utrzymaniu zdrowia ludzi i zwierząt', *Życie Weterynaryjne*, 85(09).
- Barbeau–Grégoire, M. et al. (2022) 'A 2022 systematic review and meta–analysis of enriched therapeutic diets and nutraceuticals in canine and feline osteoarthritis', *International Journal of Molecular Sciences*, 23(18). doi: 10.3390/ijms231810384.
- Barros de Medeiros, V. P. et al. (2022) 'Microalgae as source of functional ingredients in new–generation foods: challenges, technological effects, biological activity, and regulatory issues', *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(18), pp. 4929–4950. doi: 10.1080/10408398.2021.1879729.
- Bauer, J. E. (2011) Therapeutic use of fish oils in companion animals, *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 239(11), pp. 1444–1451. doi: 10.2460/javma.239.11.1441.
- Berge, G. M. et al. (2013) 'Physical treatment of high EPA *Yarrowia lipolytica* biomass increases the availability of n–3 highly unsaturated fatty acids when fed to Atlantic salmon', *Aquaculture Nutrition*, 19, pp. 110–121. doi: 10.1111/anu.12092.
- Betancor, M. B. et al. (2016) 'Nutritional evaluation of an EPA–DHA oil from transgenic *Camelina sativa* in feeds for post–smolt Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)', *PLoS ONE*, 11(7). doi: 10.1371/journal.pone.0159934.
- Betancor, M. B. et al. (2021) 'Oil from transgenic *Camelina sativa* as a source of EPA and DHA in feed for European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.)', *Aquaculture*, 530. doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735759.
- Calder, P. C. (2012) 'The role of marine omega–3 (n–3) fatty acids in inflammatory processes, atherosclerosis and plaque stability', *Molecular Nutrition and Food Research*, 56(7), pp. 1073–1080. doi: 10.1002/mnfr.201100710.
- Calder, P. C. (2020) 'n–3 PUFA and inflammation: from membrane to nucleus and from bench to bedside', *Proceedings of the Nutrition Society*. Cambridge University Press, pp. 404–416. doi: 10.1017/S0029665120007077.
- Cao, L. et al. (2022) 'Engineering *Yarrowia lipolytica* to produce nutritional fatty acids: current status and future perspectives', *Synthetic and Systems Biotechnology*, 7(4), pp. 1024–1033. doi: 10.1016/j.synbio.2022.06.002.
- Castilla–Madrigal, R. et al. (2020) 'DHA and its derived lipid mediators MaR1, RvD1 and RvD2 block TNF– α inhibition of intestinal sugar and glutamine uptake in caco–2 cells', *Journal of Nutritional Biochemistry*, 76. doi: 10.1016/j.jnutbio.2019.108264.
- Catarino, J. et al. (2020) 'Treatment of canine osteoarthritis with allogeneic platelet–rich plasma: review of five cases', *Open Veterinary Journal*, 10(2), pp. 226–231. doi: 10.4314/ovj.v10i2.12.
- Ceregrzyn, M., Lechowski, R. and Barszczewska, B. (2013) "Podstawy żywienia psów i kotów", Wrocław, Wydawnictwo Elsevier Urban & Partner.
- Certik, M. and Shimizu, S. (1999) 'Biosynthesis and regulation of microbial polyunsaturated fatty acid production', *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 87(1), pp. 1–14. doi: 10.1016/S1389–1723(99)80001–2.
- Chan, K. et al. (2004) 'Lipid content and fatty acid composition in the green–lipped mussel *Perna Fixidis* (L.)', *Journal of Food Lipids*, 11, pp. 123–130. doi: 10.1111/j.1745–4522.2004.tb00265.x.
- Chen, T. C. and Yi–Hsu Ju (2000) 'Enrichment of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid in sapo-

Chow, C. K. (2007) 'Fatty acids in foods and their health implications', CRC Press.

Christensen, D. R., and Moore, B. C. (2008) 'Diet composition and overlap in a mixed warm–and coldwater fish community', *Journal of Freshwater Ecology*, 23(2), pp. 195–204. doi: 10.1080/02705060.2008.9664191.

Clarens, A. F. et al. (2010) 'Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks', *Environmental Science and Technology*, 44(5), pp. 1813–1819. doi: 10.1021/es902838n.

Cottin, S. C., Sanders, T. A. and Hall, W. L. (2011) 'The differential effects of EPA and DHA on cardiovascular risk factors', *Proceedings of the Nutrition Society*, pp. 215–231. doi: 10.1017/S0029665111000061.

Couto, G. C. and Nelson, R. W. (2009) "Choroby wewnętrzne małych zwierząt", TOM II, Elsevier Urban & Partner.

Carrasco, N. K., et al. (2012) 'Diet of selected fish species in the freshwater–deprived St Lucia Estuary, South Africa, assessed using stable isotopes', *Marine Biology Research*, 8(8), pp. 701–714. doi: 10.1080/17451000.2012.678855.

Curtis, C. L. et al. (2000) 'n–3 Fatty acids specifically modulate catabolic factors involved in articular cartilage degradation', *Journal of Biological Chemistry*, 275(2), pp. 721–724. doi: 10.1074/jbc.275.2.721.

Dahms, I., Bailey–Hall, E., and Salem Jr, N. (2016) 'Kinetics of docosahexaenoic acid ethyl ester accumulation in dog plasma and brain', *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 113, 1–8. doi: 10.1016/j.plefa.2016.09.001.

Dewey, C. W. et al. (2019) 'Canine cognitive dysfunction: pathophysiology, diagnosis, and treatment', *Veterinary Clinics of North America – Small Animal Practice*, 49(3), pp. 477–499. doi: 10.1016/j.cvsm.2019.01.013.

Dobson, J. M. and Lascelles, B. D. (2011) 'BSAVA manual of canine and feline oncology', British Small Animal Veterinary Association.

Dyal, S. D. and Narine, S. S. (2005) 'Implications for the use of *Mortierella fungi* in the industrial production of essential fatty acids', *Food Research International*, 38(4), pp. 445–467. doi: 10.1016/j.foodres.2004.11.002.

Echeverría, F. et al. (2017) 'Docosahexaenoic acid (DHA), a fundamental fatty acid for the brain: new dietary sources', *Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.plefa.2017.08.001.

Esaiassen, M. et al. (2022) 'Nutritional value and storage stability in commercially produced organically and conventionally farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in Norway', *Applied Food Research*, 2(1). doi: 10.1016/j.afres.2021.100033.

Evbuomwan, S. A., Omotosho, O. E. and Mgbojikwe, I. (2023) 'Roles and mechanisms of docosahexaenoic acid (DHA) in neurodevelopment, neuronal functions, learning and memory', *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 40, pp. 104–119.

Fang, J. et al. (2022) 'EPA and DHA differentially coordinate the crosstalk between host and gut microbiota and block DSS–induced colitis in mice by a reinforced colonic mucus barrier', *Food & Function*, 13(8), pp. 4399–4420. doi: 10.1039/D1FO03815J.

Farooqui, A. A. (2009) 'Beneficial effects of fish oil on human brain', New York, Springer.

Farooqui, A. A. (2011) 'Lipid mediators and their metabolism in the brain', Springer Science & Business Media.

FEDIAF (2021) 'Nutritional guidelines for complete and complementary pet food for cats and dogs', Bruxelles, Belgium.

Ferrier, G. R. et al. (2002) 'Differential effects of docosahexaenoic acid on contractions and L-type Ca current in adult cardiac myocytes', *Cardiovascular Research*, 54, pp. 601–610. doi: 10.1016/S0008–6363(02)00275–4.

Fritsch, D. et al. (2010) 'Dose–titration effects of fish oil in osteoarthritic dogs', *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 24(5), pp. 1020–1026. doi: 10.1111/j.1939–1676.2010.0572.x.

Gabor, L. J., and Vanderstichel, R. V. (2006) 'Primary cerebral hemangiosarcoma in a 6–week–old dog', *Veterinary Pathology*, 43(5), pp. 782–784. doi: 10.1354/vp.43–5–782.

Gaylord, L., Remillard, R. and Saker, K. (2018) 'Risk of nutritional deficiencies for dogs on a weight loss plan', *Journal of Small Animal Practice*, 59(11), pp. 695–703. doi: 10.1111/jsap.12913.

Ghidoli, M. et al. (2023) 'Genetic improvement of *Camelina sativa* (L.) Crantz: opportunities and challenges', *Plants*, 12(3). doi: 10.3390/plants12030570.

Glaser, C., Heinrich, J. and Koletzko, B. (2010) 'Role of FADS1 and FADS2 polymorphisms in polyunsaturated fatty acid metabolism', *Metabolism: Clinical and Experimental*, pp. 993–999. doi: 10.1016/j.metabol.2009.10.022.

Gleissman, H., Johnsen, J. I. and Kogner, P. (2010) 'Omega–3 fatty acids in cancer, the protectors of good and the killers of evil?', *Experimental Cell Research*. Academic Press Inc., pp. 1365–1373. doi: 10.1016/j.yexcr.2010.02.039.

Gomez Pinchetti, J. L. (2016) 'Algae production and their potential contribution to a nutritional sustainability', *Journal of Environment and Health Science*, 2(3), pp. 1–3. doi: 10.15436/2378–6841.16.1101.

Gupta, R. C., Srivastava, A. and Lall, R. (2019) *Nutraceuticals in Veterinary Medicine*. Springer.

Haliloğlu, H. I. et al. (2004) 'Comparison of fatty acid composition in some tissues of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) living in seawater and freshwater', *Food Chemistry*, 86(1), pp. 55–59. doi: 10.1016/j.foodchem.2003.08.028.

Hall, J. A., et al. (2018) 'A longitudinal study on the acceptance and effects of a therapeutic renal food in pet dogs with IRIS–stage 1 chronic kidney disease', *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 102(1), 297–307. doi: 10.1111/jpn.12810.

Heinze, C. R. (2016) 'Diety stosowane w chorobach nerek – czym karmić i kiedy zacząć', *Weterynaria po Dyplomie*, 17(6).

Hjelm–Björkman, A. et al. (2012) 'An un–commissioned randomized, placebo–controlled double–blind study to test the effect of deep sea fish oil as a pain reliever for dogs suffering from canine OA', *BMC Veterinary Research*, 8. doi: 10.1186/1746–6148–8–157.

Hirschberg, Y. et al. (1990) 'The effects of chronic fish oil feeding in rats on protein catabolism induced by recombinant mediators', *Metabolism*, 39(4), pp. 397–402. doi: 10.1016/0026–0495(90)90255–B.

Horn, M. H. et al. (1982) 'Dietary selectivity in the field and food preferences in the laboratory for two herbivorous fishes (*Cebidichthys violaceus* and *Xiphister mucosus*) from a temperate intertidal zone', *Marine Biology*, 67, pp. 237–246. doi: 10.1007/BF00397664.

- Hornung, E. et al. (2005) 'Specific formation of arachidonic acid and eicosapentaenoic acid by a front-end $\Delta 5$ -desaturase from *Phytophthora megasperma*', *Biochimica et Biophysica Acta – Molecular and Cell Biology of Lipids*, 1686(3), pp. 181–189. doi: 10.1016/j.bbalip.2004.11.001.
- Jacuńska W. et al. (2022) 'Ocena wartości energetycznej i jakości tłuszczu w karmach dla szczeniąt', *Materiały pokonferencyjne z LXXXVI Zjazdu Naukowego Polskiego Towarzystwa Zootechnicznego w Krakowie. Hodowla i chów zwierząt w Polsce – od tradycji do nowoczesności – 100 lat Polskiego Towarzystwa Zootechnicznego*, 21–23.09.2022, pp. 202.
- Jacuńska, W. (2022) 'Ocena wartości energetycznej i jakości tłuszczu w karmach dla szczeniąt', *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Materiały pokonferencyjne VIII Ogólnopolskiej Sesji Studenckich Kół Naukowych*, 01.12.2022, pp. 279.
- Jiang, L.–H., Liang, Q.–Y. and Shi, Y. (2012) 'Pure docosahexaenoic acid can improve depression behaviors and affect HPA axis in mice', *Cellulose*, 50, pp. 1767–1773.
- Johnson, K. A., Lee, A. H. and Swanson, K. S. (2020) 'Nutrition and nutraceuticals in the changing management of osteoarthritis for dogs and cats', *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 256(12), pp. 1335–1341.
- Kaliniak, A., Florek, M. and Skąłdecki, P. (2015) 'Profil kwasów tłuszczowych mięsa, ikry i wątroby ryb', *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 22(2), pp. 29–46. doi: 10.15193/zntj/2015/99/020.
- Kamola, D., et al. (2013) 'Rola wielonienasyconych kwasów tłuszczowych n–3 w leczeniu nieswoistego zapalenia jelita u psów.', *Zycie Weterynaryjne*, 88(9), pp. 768–771.
- Kaur, H. et al. (2020) 'Role of omega–3 fatty acids in canine health: a review', *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(3), pp. 2283–2293. doi: 10.20546/ijcmas.2020.903.259.
- Kobayashi, S. et al. (2008) 'Molecular aspects of rheumatoid arthritis: role of environmental factors', *FEBS Journal*, 275(18), pp. 4456–4462. doi: 10.1111/j.1742–4658.2008.06581.x.
- Kurasiak–Popowska, D. (2019) 'Lnianka siewna—roślina historyczna czy perspektywiczna', *Fragmenta Agronomica*, 36(2), pp. 42–54. doi: 10.26374/fa.2019.36.15.
- Leblanc, C. J. et al. (2008) 'Effects of dietary supplementation with fish oil on in vivo production of inflammatory mediators in clinically normal dogs', *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 69(4), 486–493. doi: 10.2460/ajvr.69.4.486.
- Ledesma–Amaro, R. and Nicaud, J. M. (2016) '*Yarrowia lipolytica* as a biotechnological chassis to produce usual and unusual fatty acids', *Progress in Lipid Research*, 61, pp. 40–50. doi: 10.1016/j.plipres.2015.12.001.
- Lenox, C. E. (2016) 'Role of dietary fatty acids in dogs & cats', *Today's Veterinary Practice Journal: ACVN Nutrition Notes*, 6(5), pp. 83–90.
- Lenox, C. E. and Bauer, J. E. (2013) 'Potential adverse effects of omega–3 fatty acids in dogs and cats', *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 27(2), pp. 217–226. doi: 10.1111/jvim.12033.
- Li–Beisson, Y. et al. (2019) 'The lipid biochemistry of eukaryotic algae', *Progress in Lipid Research*, 74, pp. 31–68. doi: 10.1016/j.plipres.2019.01.003.
- Lindqvist, H. et al. (2023) 'Comparison of fish, krill and flaxseed as omega–3 sources to increase the omega–3 index in dogs', *Veterinary Sciences*, 10(2), pp. 1–10 doi: 10.3390/vetsci10020162.

Luczynska, J. , Tonska, E. , and Borejszo, Z. (2011) 'Zawartość makro– i mikroelementów oraz kwasów tłuszczowych w mięśniach łososia (*Salmo salar* L.), pstrąga tęczowego (*Oncorhynchus mykiss* Walb.) i karpia (*Cyprinus carpio* L.)', *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 18(3), pp. 162–172.

Marciniak–Lukasiak, K. (2011) 'Rola i znaczenie kwasów tłuszczowych omega–3', *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 18(6), pp. 24–35.

Mariamnatu, A. H. and Abdu, E. M. (2021) 'Overconsumption of omega–6 polyunsaturated fatty acids (PUFAs) versus deficiency of omega–3 PUFAs in modern–day diets: the disturbing factor for their "balanced antagonistic metabolic functions" in the human body', *Journal of Lipids*, 2021, pp. 1–15. doi: 10.1155/2021/8848161.

Mariane, C. et al. (2020) 'The effect of supplementation of microalgae *Schizochytrium* sp. as a source of docosahexaenoic acid (DHA) on dogs with naturally occurring gingivitis.', *Archives of Veterinary Science*, 25(1), pp. 80–86. doi: 10.5380/avs.v25i1.62680.

Martínez–Ruiz, M. et al. (2022) 'Microalgae bioactive compounds to topical applications products—a review', *Molecules*. MDPI. doi: 10.3390/molecules27113512.

McLennan, P. L. (2001) 'Myocardial membrane fatty acids and the antiarrhythmic actions of dietary fish oil in animal models', *Lipids*, 36(s1), pp. 111–114. doi: 10.1007/s11745–001–0692–x.

Menetrez, M. Y. (2012) 'An overview of algae biofuel production and potential environmental impact', *Environmental Science and Technology*, 46(13), pp. 7073–7085. doi: 10.1021/es300917r.

Metting, B. and Pyne, J. W. (1986) 'Biologically active compounds from microalgae', *Enzyme and Microbial Technology*, 8(7), pp. 386–394. doi: 10.1016/0141–0229(86)90144–4

Mirowski, A. (2018) 'Oleje rybne w żywieniu psów i kotów', *Życie Weterynaryjne*, 93(10), pp. 688–690.

Mirowski, A. and Jachnis, A. (2018) 'Długołańcuchowe wielonienasycone kwasy tłuszczowe z rodziny n–3 a choroby nowotworowe', *Życie Weterynaryjne*, 93(01).

Moinard, A. et al. (2020) 'Effects of high–fat diet at two energetic levels on fecal microbiota, colonic barrier, and metabolic parameters in dogs', *Frontiers in Veterinary Science*, 7, pp. 1–15. doi: 10.3389/fvets.2020.566282.

Molwersmyr, E. et al. (2022) 'Identification and quantification of lipids in wild and farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*), and salmon feed by GC–MS', *Food Science and Nutrition*, 10(9), pp. 3117–3127. doi: 10.1002/fsn3.2911.

Moniz, P. et al. (2022) 'The biorefinery of the marine microalga *Cryptocodinium cohnii* as a strategy to valorize microalgal oil fractions', *Fermentation*, 8(10), pp. 502. doi: 10.3390/fermentation8100502.

Nabavi, S. F. et al. (2015) 'Omega–3 polyunsaturated fatty acids and cancer: lessons learned from clinical trials', *Cancer and Metastasis Reviews*, 34(3), pp. 359–380. doi: 10.1007/s10555–015–9572–2.

National Research Council (2006) *Nutrient Requirements of Dogs and Cats, Nutrient Requirements of Dogs and Cats*. National Academies Press. doi: 10.17226/10668.

Neilson, J. C. et al. (2001) 'Prevalence of behavioral changes associated with age–related cognitive impairment in dogs', *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 218(11), pp. 1787–1791. doi: 10.2460/javma.2001.218.1787.

Ogilvie, G. K. et al. (2000) 'Effect of fish oil, arginine, and doxorubicin chemotherapy on remission and survi-

val time for dogs with lymphoma a double-blind, randomized placebo-controlled study', *Cancer: Interdisciplinary International Journal of the American Cancer Society*, 88(8), pp. 1916–1928. doi: 10.1002/(SICI)1097-0142(20000415)88:8<1916::AID-CNCR22>3.0.CO;2-F.

O'Keefe, S. F. and Sarnoski, P. J. (2017) 'Nomenclature and classification of lipids', *Food Lipids: Chemistry, Nutrition, and Biotechnology*. CRC press, pp. 3–19.

Pan, Y. et al. (2018) 'Cognitive enhancement in old dogs from dietary supplementation with a nutrient blend containing arginine, antioxidants, B vitamins and fish oil', *British Journal of Nutrition*, 119(3), pp. 349–358. doi: 10.1017/S0007114517003464.

Parrish, C. C. et al. (2015) 'Direct determination of fatty acids in fish tissues: quantifying top predator trophic connections', *Oecologia*, 177(1), pp. 85–95. doi: 10.1007/s00442-014-3131-3.

Pasławski, R. et al. (2021) 'Effect of 6-month feeding with a diet enriched in EPA + DHA from fish meat on the blood metabolomic profile of dogs with myxomatous mitral valve disease', *Animals*, 11(12). doi: 10.3390/ani1123360.

Pedrinelli, V. et al. (2020) 'Nutritional and laboratory parameters affect the survival of dogs with chronic kidney disease', *PLoS ONE*, 15(6 June). doi: 10.1371/journal.pone.0234712.

Petrie, J. R. et al. (2014) 'Metabolic engineering *Camelina sativa* with fish oil-like levels of DHA', *PLoS ONE*, 9(1), pp. 1–8. doi: 10.1371/journal.pone.0085061.

Pye, C. et al. (2022) 'Advances in the pharmaceutical treatment options for canine osteoarthritis', *Journal of Small Animal Practice*, 63(10), pp. 721–738. doi: 10.1111/jsap.13495.

Richter, G. (2017) *The ultimate pet health guide: breakthrough nutrition and integrative care for dogs and cats*. Hay House Inc.

Roush, J. K. et al. (2010) 'Evaluation of the effects of dietary supplementation with fish oil omega-3 fatty acids on weight bearing in dogs with osteoarthritis', *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 236(1), pp. 67–73.

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/848 z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie produkcji ekologicznej i znakowania produktów ekologicznych i uchylające rozporządzenie Rady (WE) nr 834/2007 (Dz.U. L 150, 14.6.2018).

Sandersoln, R. et al. (2009) 'Systematic review of the management of canine osteoarthritis', *Veterinary Record*, 164(14), pp. 418–424. doi: 10.1136/vr.164.14.418.

Santos, M. C. et al. (2021) 'Salmon oil supplementation in dogs affects the blood flow of testicular arteries', *Reproduction in Domestic Animals*, 56(3), pp. 476–483. doi: 10.1111/rda.13886.

Sathasivam, R. and Ki, J. S. (2018) 'A review of the biological activities of microalgal carotenoids and their potential use in healthcare and cosmetic industries', *Marine Drugs*, 16(1), pp. 1–31 doi: 10.3390/md16010026.

Schmidt, J. M. et al. (2010) 'Canine paediatric oncology: retrospective assessment of 9522 tumours in dogs up to 12 months (1993–2008)', *Veterinary and Comparative Oncology*, 8(4), pp. 283–292. doi: 10.1111/j.1476-5829.2010.00226.x.

Simpson, J. W. (1998) 'Diet and large intestinal disease in dogs and cats', *The Journal of Nutrition*, 128(12), pp. 2717S–2722S. doi: 10.1093/jn/128.12.2717S.

- Ścieszka, S. and Klewicka, E. (2019) 'Algae in food: a general review', *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(21), pp. 3538–3547. doi: 10.1080/10408398.2018.1496319.
- Semczuk–Kaczmarek, K. et al. (2018) 'Związek układu serotonergicznego i układu sercowo–naczyniowego', *Folia Cardiologica*, 13(5), pp. 420–427. doi: 10.5603/fc.a2018.0088.
- Serhan, C. N. (2005) 'Novel ω – 3–derived local mediators in anti–inflammation and resolution', *Pharmacology and Therapeutics*, 105(1), pp. 7–21. doi: 10.1016/j.pharmthera.2004.09.002.
- Siddiqui, R. A. et al. (2011) 'Docosahexaenoic acid: a natural powerful adjuvant that improves efficacy for anticancer treatment with no adverse effects', *BioFactors*, 37(6), pp. 399–412. doi: 10.1002/biof.181.
- Stachowicz, K. (2023) 'The role of polyunsaturated fatty acids in neuronal signaling in depression and cognitive processes', *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 737, p. 109555. doi: 10.1016/j.abb.2023.109555.
- Proskura, S. et al. (2019) 'The effect of polymorphism in the FADS2 gene on the fatty acid composition of bovine milk', *Archives Animal Breeding*, 62(2), pp. 547–555. doi: 10.5194/aab–62–547–2019.
- Staroszczyk, H. and Sikorski, Z. (2017) 'Główne składniki żywności. Chemia żywności', TOM 1, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Talero, E. et al. (2015) 'Bioactive compounds isolated from microalgae in chronic inflammation and cancer', *Marine Drugs*, 13(10), pp. 6152–6209. doi: 10.3390/md13106152.
- Tassoni, D. et al. (2008) 'The role of eicosanoids in the brain', *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 17(S1), pp. 220–228.
- Theinel, M. H. et al. (2023) 'The effects of omega–3 polyunsaturated fatty acids on breast cancer as a preventive measure or as an adjunct to conventional treatments', *Nutrients*, 15(6), pp. 1310. doi: 10.3390/nu15061310.
- Tocher, D. R. (2015) 'Omega–3 long–chain polyunsaturated fatty acids and aquaculture in perspective', *Aquaculture*, 449, pp. 94–107. doi: 10.1016/j.aquaculture.2015.01.010.
- Ustawa z dnia 23 czerwca 2022 r. o rolnictwie ekologicznym i produkcji ekologicznej (Dz.U. 2022 poz. 1370).
- Usydus, Z., et al. (2007) 'Study on the nutritive value of raw fish oils', *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 57(4c), pp. 593–596.
- Vedin, I., et al. (2012) 'Effects of DHA–rich n–3 fatty acid supplementation on gene expression in blood mononuclear leukocytes: the OmegaAD study', *PloS One*, 7(4), e35425. doi: 10.1371/journal.pone.0035425.
- Venkatraman, J. T. and Meksawan, K. (2002) 'Effects of dietary 3 and 6 lipids and vitamin E on chemokine levels in autoimmune–prone MRL/MpJ–lpr/lpr mice', *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 13(8), pp. 479–486. doi: 10.1016/S0955–2863(02)00201–2.
- Winwood, R. J. (2013) 'Recent developments in the commercial production of DHA and EPA rich oils from microalgae', *OCL – Oilseeds and fats, crops and lipids*, 20(6). doi: 10.1051/ocl/2013030.
- Xue, Z. et al. (2013) 'Production of omega–3 eicosapentaenoic acid by metabolic engineering of *Yarrowia lipolytica*', *Nature Biotechnology*, 31(8), pp. 734–740. doi: 10.1038/nbt.2622.
- Yurko–Mauro, K. (2010) 'Cognitive and cardiovascular benefits of docosahexaenoic acid in aging and cogni-

Yurko–Mauro, K. (2010) ‘Cognitive and cardiovascular benefits of docosahexaenoic acid in aging and cognitive decline’, *Current Alzheimer Research*, 7(3), pp. 190–196. doi: 10.2174/156720510791050911.

Zhang, X. et al. (2020) ‘Fatty acid composition analyses of commercially important fish species from the Pearl River Estuary, China’, *PLoS ONE*, 15(1), pp. 1–16. doi: 10.1371/journal.pone.0228276.

Zhang, Z. et al. (2021) ‘Differential effects of EPA and DHA on DSS–induced colitis in mice and possible mechanisms involved’, *Food and Function*, 12(4), pp. 1803–1817. doi: 10.1039/d0fo02308f.

Zicker, S. et al. (2012) ‘Evaluation of cognitive learning, memory, psychomotor, immunologic, and retinal functions in healthy puppies fed foods fortified with docosahexaenoic acid–rich fish oil from 8 to 52 weeks of age’, *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 241(5), pp. 583–594. doi: 10.2460/javma.241.5.583.

§ Praca wpłynęła do redakcji: 03.09.2023r.
Zrecenzowano: 15.09.2023r.
Przyjęto do druku: 19.09.2023r.