

EWELINA POGORZELSKA, JADWIGA HAMUŁKA, AGATA WAWRZYNIAK

ASTAKSANTYNA – BUDOWA, WŁAŚCIWOŚCI I MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA W ŻYWNOSCI FUNKCJONALNEJ

Streszczenie

Astaksantyna jest ksantofilem naturalnie występującym w przyrodzie. Nadaje charakterystyczne różowo-czerwone zabarwienie tkankom ryb, takim jak losoś i pstrąg, a także skorupom skorupiaków. Zwierzęta i ludzie nie przejawiają zdolności syntetyzowania astaksantyny *de novo*. Zdolność tę wykazują niektóre algi, drożdże, bakterie i rośliny. Dzięki budowie chemicznej astaksantyna charakteryzuje się silnymi właściwościami antyoksydacyjnymi. Jest uważana za jeden z najsilniejszych naturalnych antyoksydantów. Jak wynika z dotychczasowych badań, astaksantyna przyjmowana w dużych dawkach nie wykazuje właściwości prooksydacyjnych i toksycznych. Stąd też stosowana jest jako składnik suplementów diety, a ponadto jako dodatek do pasz dla ryb i, w mniejszym stopniu, dla drobiu. Coraz częściej znajduje również zastosowanie jako składnik żywności funkcjonalnej. W pracy przedstawiono szczegółową charakterystykę astaksantyny: jej budowę chemiczną, występowanie, bezpieczeństwo stosowania oraz możliwości jej zastosowania do produkcji żywności funkcjonalnej.

Słowa kluczowe: astaksantyna, występowanie, bezpieczeństwo stosowania, żywność funkcjonalna, suplementy diety

Wprowadzenie

Organizm człowieka narażony jest na działanie zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych czynników prowadzących do zaburzenia równowagi prooksydacyjno-antyoksydacyjnej. Do obrony organizm wykorzystuje własny endogenny system antyoksydacyjny, jak również antyoksydanty pochodzące z pożywienia i/lub dostarczane w postaci suplementów diety [55]. Szczególną rolę w dostarczaniu z dietą substancji bioaktywnych o działaniu antyoksydacyjnym odgrywa żywność funkcjonalna. Rozwijający się rynek żywności funkcjonalnej zmusza producentów do poszukiwania nowych,

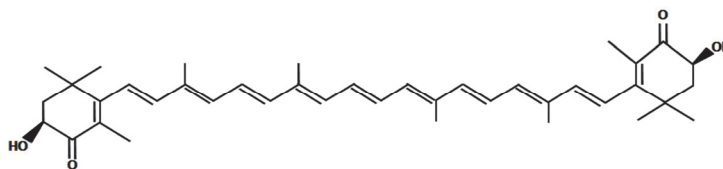
Mgr inż. E. Pogorzelska, Samodzielne Laboratorium Chemicznych Badań Żywności, dr hab. J. Hamułka, prof. nadzw., dr hab. A. Wawrzyniak, prof. nadzw., Katedra Żywienia Człowieka, Wydz. Nauk o Żywieniu Człowieka i Konsumpcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159 C, 02-776 Warszawa. Kontakt: jadwiga_hamułka@sggw.pl

alternatywnych komponentów bioaktywnych, spełniających z jednej strony oczekiwania konsumentów w zakresie pozytywnego oddziaływania na organizm, z drugiej zaś ze względu na bezpieczeństwo ich stosowania. Jednym z takich naturalnych komponentów jest astaksantyna. Właściwości fizykochemiczne oraz prozdrowotne tego związku czynią go atrakcyjnym składnikiem do zastosowania w przemyśle żywnościowym. Astaksantyna stała się przedmiotem licznych badań, zarówno o charakterze biotechnologicznym, jak i medycznym [16, 33, 49, 51, 57,59].

Celem pracy było przedstawienie aktualnej wiedzy na temat charakterystyki astaksantyny, bezpieczeństwa jej stosowania oraz prozdrowotnych właściwości astaksantyny, pożądanych w żywności funkcjonalnej i suplementach diety.

Astaksantyna – charakterystyka ogólna

Astaksantyna (3,3'-dihydroksy- β,β -karoten-4,4'-dion) jest substancją naturalnie występującą w przyrodzie, zaliczaną do ksantofili, tlenowych pochodnych karotenów [23, 24]. Strukturę chemiczną związku tworzy osiem jednostek izoprenowych, w których skład wchodzi 40 atomów węgla ($C_{40}H_{52}O_4$). Polienowy łańcuch węglowy zakończony jest z obydwu końców pierścieniami β -jononowymi, z których każdy ma w swojej strukturze jedną grupę ketonową i jedną grupę hydroksylową (rys. 1). Grupy te odpowiadają za większą stabilność oraz polarność astaksantyny w stosunku do innych znanych karotenoidów [24].



Rys. 1. Wzór strukturalny astaksantyny

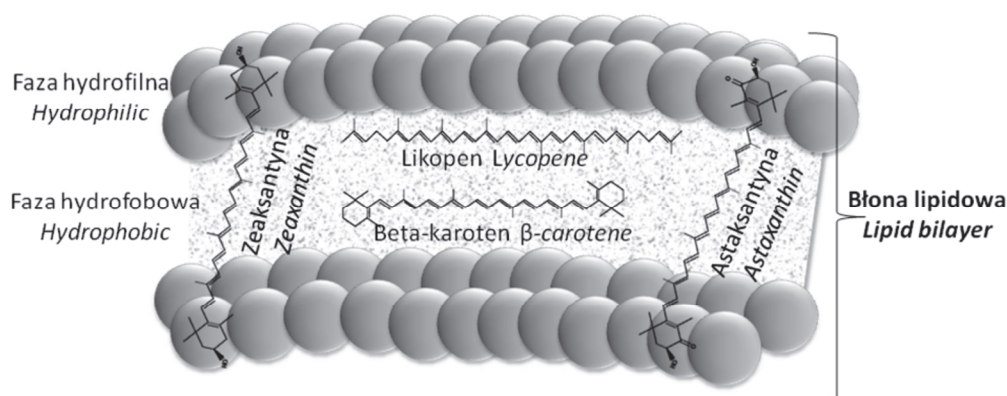
Fig. 1. Structural formula of astaxanthin

Źródło / Source: opracowanie własne / the authors' own study

Udowodniono, że karotenoidy zawierające większą liczbę cząsteczek tlenu przy jednakowej liczbie wiązań podwójnych charakteryzują się większą fotostabilnością oraz większym potencjałem antyoksydacyjnym [11].

Budowa chemiczna astaksantyny odpowiada za jej właściwości, zarówno fizykochemiczne, jak i prozdrowotne. Hydrofobowy łańcuch węglowy zawierający 9 sprzężonych wiązań podwójnych i 2 niesprzężone w pierścieniach β -jononowych odpowiada za wygaszanie reaktywnych form tlenu. Obecność tlenu w pierścieniach końcowych wpływa natomiast na właściwości hydrofilowe astaksantyny, przyczyniając się do neutralizacji wolnych rodników i innych substancji oksydacyjnych w środo-

wisku wodnym. Taka hydrofilowo-hydrofobowo-hydrofilowa struktura astaksantyny jest analogiczna do budowy błony komórkowej, co pozwala na jej rozmieszczenie poprzez całą jej szerokość, umożliwiając usuwanie wolnych rodników i reaktywnych form tlenu zarówno na powierzchni błony, jak i w jej wnętrzu – rys. 2 [20].



Rys. 2. Rozmieszczenie karotenoidów w lipidach błon komórkowych

Fig. 2. Distribution of carotenoids in lipid membranes

Źródło / Source: opracowanie własne / the authors' own study

Astaksantyna charakteryzuje się większą odpornością na działanie światła i wysokiej temperatury w stosunku do pozostałych karotenoidów oraz swobodnym, szybkim przekraczaniem bariery krew-mózg w organizmach zwierząt [4].

Wolna, niezwiązana astaksantyna jest związkiem o barwie czerwonobrunatnej, za którą odpowiada układ sprzężonych wiązań podwójnych w łańcuchu węglowym [6] i została zakwalifikowana do grupy barwników oznaczonych symbolem E161j wg alfanumerycznego systemu oznaczeń UE.

Biosynteza i naturalne źródła występowania astaksantyny

Organizmy wyższe nie wykazują zdolności syntetyzowania astaksantyny *de novo*, jednak drogą pokarmową mogą ją gromadzić, nadając czerwone zabarwienie różnym narządom, najczęściej jednak mięśniom. Zwierzęta, takie jak: skorupiaki (krewetki, homary), niektóre gatunki ryb (łosoś, pstrąg) oraz flamingi swoją barwę zawdzięczają właśnie astaksantynie [10, 60].

Biosynteza astaksantyny ogranicza się jedynie do niektórych gatunków zielonych alg, drożdży, bakterii Gram-ujemnych oraz roślin. Wartość przemysłową mają jedynie nieliczne z nich [8]. Biosynteza astaksantyny rozpoczyna się szklakiem przemian, na skutek których powstaje β -karoten, wspólny prekursor wszystkich ksantofili. Proces ten zachodzi przy udziale czterech enzymów: (i) syntazy pirofosforanu geranylogera-

nylu (GGPP), (ii) syntazy fitoenu, (iii) desaturazy fitoenu, oraz (iv) cyklazy likopenu. Następnie β -karoten, pod wpływem ketalazy β -karotenu oraz hydroksylazy β -karotenu, zostaje przekształcony do astaksantyny, przy czym przemiany te mogą przebiegać różnymi szlakami biochemicznymi [1].

Najbogatszym, naturalnym źródłem astaksantyny są algi *Haematococcus pluvalis* [21, 23]. W warunkach optymalnego wzrostu produkcja astaksantyny dochodzi do 3,0 % suchej masy. Ze względu na duże zapotrzebowanie przemysłu farmaceutycznego na naturalną astaksantynę stosuje się szereg metod poprawiających efektywność produkcji tego karotenoidu, nawet do 4,0 % suchej masy [9]. W tym celu do środowiska rozwoju alg wprowadza się szereg czynników stresogennych, takich jak: ograniczenie/eliminacja składników odżywczych [9], duże stężenie soli [49], wysokie natężenie światła [26], dodatek octanu sodu z żelazem [27]. Dodatkowo, w przypadku hodowli z wykorzystaniem lamp o niebieskiej barwie światła zwiększa się proces produkcji astaksantyny nawet do 7,0 % suchej masy [29].

Alternatywnym, naturalnym źródłem astaksantyny są algi *Chlorella zofingensis* [16]. Wytwarzają mniejsze ilości astaksantyny niż algi *Haematococcus pluvalis*, jednak rosną szybciej i kumulują znaczne ilości astaksantyny nawet w warunkach braku oświetlenia.

Kolejne znaczące źródło naturalnej astaksantyny stanowią drożdże *Xanthophyllomyces dendrorhous*. Są one znacznie łatwiejsze w hodowli niż algi [50], a ponadto astaksantyna z nich pozyskana występuje głównie w formie wolnej [23]. Tak otrzymana astaksantyna jest szczególnie cenna dla hodowców akwakultur, ponieważ ryby w większym stopniu przyswajają astaksantynę w postaci wolnej niż w postaci związanej z estrami [54]. Skłoniło to naukowców do badań nad intensyfikacją astaksantyny również w drożdżach, m.in. poprzez zastosowanie medium z dodatkiem ksylozy oraz naświetlaniem drożdży światłem o różnym natężeniu [52].

Istotnym źródłem astaksantyny, wykorzystywanym do jej pozyskiwania w skali przemysłowej, są odpady poprodukcyjne ze skorupiaków (pancerzyki). Astaksantyna z tego źródła jest mieszaniną formy wolnej oraz związanej z estrami. W przypadku pancrzyków skorupiaków koszt surowca do produkcji astaksantyny jest niewielki. Problemem jest natomiast ekstrakcja, gdyż zbyt wysoka temperatura procesu prowadzi do rozkładu tego karotenoidu. Wprowadza się więc technologię ekstrakcji za pomocą rozpuszczalników organicznych, która pozwala na uzyskanie astaksantyny bez podwyższania temperatury [5].

Astaksantyna – główne źródła w diecie ludzi

Głównym źródłem astaksantyny w diecie ludzi są ryby i owoce morza. Najwięcej astaksantyny zawierają owoce morza, w tym langusta – aż 15 mg/100 g, kraby – 12 mg/100 g, krewetki – 3 ÷ 15 mg/100 g [23], natomiast wśród ryb – łosoś i pstrąg

różowy odpowiednio: 0,44 i 0,28 mg/100 g [18]. Wartości te mogą się jednak różnić od faktycznej zawartości astaksantyny w rybach, gdyż w Dyrektywie UE 2316/98 z dnia 29 października 1998 roku [61] dopuszczono stosowanie astaksantyny jako dodatku do pasz dla ryb. W Polsce dopuszczono stosowanie astaksantyny na podstawie Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z 2003 r. [62] w ilości 100 mg czystej astaksantyny/kg suchej paszy lub jej mieszanki z kantaksantyną, a jej ilość również nie może przekroczyć 100 mg/kg suchej paszy.

W hodowli drobiu i bydła zaczęto w ostatnich latach stosować pasze wzbogacone w astaksantynę w celu poprawy barwy jaj i mleka. Zjawisko to nie jest powszechne, dlatego w literaturze przedmiotu brak jest danych określających ilości astaksantyny w tych produktach finalnych oraz dotyczących spożycia tego karotenoidu z ww. produktami. Mimo obecności astaksantyny w niektórych rybach i owocach morza, nie odgrywa ona większej roli jako źródło tego składnika z uwagi na małą konsumpcję ryb, a przede wszystkim – owoców morza. Dobrym źródłem astaksantyny w diecie człowieka mogą być natomiast suplementy diety. Z analizy dotyczącej warszawskiego rynku farmaceutycznego, przeprowadzonej w 2012 roku [47], wynika, że spożycie suplementów z astaksantyną wzrosło trzykrotnie w stosunku do roku 2009 [22].

Wchłanianie i metabolizm astaksantyny

Astaksantyna, podobnie jak i inne karotenoidy, podlega przemianom w organizmie. Po spożyciu i strawieniu pokarmu w nabłonku jelita cienkiego dochodzi do hydrolizy estrów astaksantyny i jej uwolnienia [41]. Następnie astaksantyna tworzy, wraz z monoglicerydami i wolnymi kwasami tłuszczowymi, w obecności soli kwasów żółciowych, agregaty umożliwiające utrzymanie ich w wodzie w postaci roztworu micelnarnego. Następnie drogą dyfuzji biernej w obecności małej ilości tłuszczu [14], trzustkowej fosfolipazy A i lizofosfatydylocholiny astaksantyna zostaje zaabsorbowana do enterocytów, w których zostaje włączona do chylomikronów, a te są następnie wchłaniane do limfy [56]. W takiej postaci astaksantyna transportowana jest do wątroby, w której nie jest zamieniana w witaminę A, ale wiąże się z poszczególnymi lipoproteinami. W organizmie człowieka najwięcej astaksantyny występuje w połączeniu z lipoproteinami VLDL (36 ÷ 64 %), z lipoproteinami LDL (29 %) i HDL (24 %) [15, 43]. Z wątroby astaksantyna jest przenoszona wraz z krwią do poszczególnych tkanek organizmu i pełni w nich różne funkcje biologiczne [4, 44].

Prozdrowotne właściwości astaksantyny

Właściwości astaksantyny wynikają z 4 głównych obszarów jej działania, tj. antyoksydacyjnego, przeciwzapalnego, przeciwnowotworowego oraz immunomodulacyjnego.

Astaksantyna zaliczana jest do grupy naturalnych antyoksydantów wykazujących silne zdolności reagowania z reaktywnymi formami tlenu i azotu. Naguib [38] wykazał największą aktywność antyoksydacyjną astaksantyny (1,4), mierzoną ilością usuniętych nadtlenu w stosunku do pozostałych badanych związków, takich jak: kwas 6-hydroksy-2,5,7,8-tetrametylochromo-2-karboksylowy (1,0), α -tokoferol (0,9), α -karoten (0,5), likopen i luteina (0,4) oraz β -karoten (0,2). Silny potencjał antyoksydacyjny astaksantyny wykazano również wobec rodników guazynowych [17]. Wykazuje ona także zdolność stymulacji organizmu do zwiększenia aktywności enzymów antyoksydacyjnych [40, 48].

Właściwości przeciwzapalne astaksantyny są ściśle związane z jej właściwościami antyoksydacyjnymi [21]. Astaksantyna, redukując poziom cytokin prozapalnych w neutrofilach stymulowanych lipopolisacharydami, poprawia ich zdolności fagocytarne, pojemność bakterioobójczą oraz redukuje ilość produkowanego przez nie nadtlenu wodoru i anionu ponadtlenkowego [33]. Wykazuje właściwości hamujące proces powstawania mediatorów prozapalnych poprzez blokowanie aktywności syntazy tlenu azotu (iNOS) oraz cyklooksygenazy-2 (COX-2) lub poprzez blokowanie rozpadu iNOS oraz COX-2, regulując procesy zapalne. Ponadto wykazano, że astaksantyna redukuje opuchliznę będącą wynikiem procesów zapalnych zachodzących w organizmie oraz zmniejsza ilość białka C-reaktywnego (CRP), markera chronicznych stanów zapalnych [19].

Karotenoidy, w tym również astaksantyna, wykazują zdolność hamowania wzrostu nowotworów [3, 7]. Palloza i wsp. [44] dowiedli, że astaksantyna nie tylko hamuje rozwój powstałych komórek rakowych okrężnicy, ale również inicjuje proces apoptozy tych komórek. Z kolei Jyonouchi i wsp. [25] stwierdzili wzrost stymulacji komórek odpornościowych zaangażowanych w walkę ze zmutowanymi komórkami po podaniu astaksantyny. Podobne wyniki uzyskali Nakano i wsp. [39]. Z kolei u mysz, którym wszczepiono komórki raka sutka, a następnie podano astaksantynę, odnotowano wzrost w osoczu naturalnych komórek zabójców oraz poziomu interferonu γ [31]. W tym przypadku właściwości przeciwnowotworowe wynikały z właściwości immunomodulacyjnych tego związku. W ostatnich latach wykazano, że astaksantyna ze względu na swoje właściwości, zwłaszcza antyoksydacyjne i przeciwzapalne, może odgrywać istotną rolę w prewencji i/lub leczeniu wielu chorób, w tym chorób układu krążenia, nowotworów, cukrzycy oraz chorób oczu [13, 23, 36, 45, 59].

Bezpieczeństwo stosowania

Decyzją Agencji ds. Żywności i Leków (FDA) z 13.03.1995 roku astaksantyna została dopuszczona w Stanach Zjednoczonych do stosowania jako dodatek do pasz dla ryb w ilości nieprzekraczającej 80 mg/kg paszy. Stosowanie astaksantyny jest też

możliwe w Kanadzie, Japonii i w Europie. W Unii Europejskiej dodatek astaksantyny do pasz nie może przekraczać 100 mg czystego związku na kilogram paszy.

W celu oceny toksyczności astaksantyny przeprowadzono liczne badania na zwierzętach oraz z udziałem ludzi. W badaniu z udziałem 20 zdrowych mężczyzn, którym podawano astaksantynę w dawce 6 mg dziennie, nie stwierdzono żadnych skutków ubocznych [36]. Działań niepożądanych nie wykazano również w badaniach grupy osób ze zwyrodnieniem plamki żółtej (AMD), którym podawano astaksantynę w ilości 4 mg przez 12 miesięcy [45] oraz grupy mężczyzn w średnim wieku po podaniu jednorazowej dawki tego ksantofilu w ilości 100 mg [43].

Badania na zwierzętach, którym podawano jednorazowo kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt razy większe dawki astaksantyny niż w badaniach z udziałem ludzi, sięgające 12 g/kg m.c., nie wykazały negatywnego wpływu tak dużej ilości astaksantyny na ich zdrowie.

Astaksantyna jest stosunkowo szybko usuwana z organizmu, a średni okres półtrwania wynosi do 52 h [15]. W badaniach na szczurach nie zaobserwowano zwiększonej koncentracji astaksantyny w osoczu, nawet w przypadkach długotrwałej suplementacji trwającej 90 dni [53]. Katabolizm astaksantyny zachodzi bez fazy długiego jej przechowywania w tkankach, stąd można wnioskować, że nie jest ona kumulowana w nadmiarze w organizmach ludzi i zwierząt [46].

Możliwości zastosowania astaksantyny w żywności funkcjonalnej

Astaksantyna charakteryzuje się trzema właściwościami, które stanowią o jej unikalnym działaniu bioaktywnym: (i) jest bardzo silnym przeciwutleniaczem [34, 35], (ii) jest bezpieczna nawet w przypadku stosowania dużych dawek [34, 53], a (iii) jej rozmieszczenie w błonie komórkowej pozwala na pełnienie funkcji antyoksydacyjnej zarówno na powierzchni, jak i we wnętrzu komórki [20]. Właściwości te nadają astaksantynie status związku o charakterze prozdrowotnym [57], co umożliwia jej zastosowanie do produkcji żywności funkcjonalnej.

Karotenoid ten jest z powodzeniem stosowany w hodowli drobiu jako dodatek do pasz, wzmacniający barwę mięśni oraz żółtek jaj, jak również przeciwdziałający utlenianiu tłuszczów [58]. W ostatnich latach wykazano również korzyści ze stosowania astaksantyny jako dodatku do pasz w hodowli świń. Stwierdzono bowiem, że dodatek tego karotenoidu wpływał korzystnie na trwałość różowej barwy mięsa, kojarzonej przez konsumentów z atrybutem świeżości [12]. Kolejnym przykładem zastosowania astaksantyny jest jej wykorzystanie do produkcji funkcjonalnego oleju słonecznikowego. Stwierdzono, że dodatek astaksantyny hamuje proces utleniania kwasów tłuszczowych [51]. W niektórych krajach, np. w Indiach, trwają badania nad zastosowaniem dodatku alg zawierających astaksantynę do produkcji funkcjonalnych makaronów [28].

Zainteresowanie wielu ośrodków badawczych astaksantyną, jako dodatkiem do żywności funkcjonalnej, potwierdzają składane wnioski patentowe. W ostatnim czasie zgłoszono kilka patentów dotyczących zastosowania astaksantyny do produkcji żywności innowacyjnej. Dotyczyły one m.in. wypieków z ciasta zawierającego w swoim składzie astaksantynę [42], napojów z dodatkiem astaksantyny [30] oraz mieszanki paszowej dla świń [37].

Ograniczeniem stosowania astaksantyny jako dodatku do żywności na szerszą skalę jest jej zmienna stabilność, natura hydrofobowa, a także zróżnicowana biodostępność, uzależniona od składu surowca, z którym jest przyjmowana. Astaksantyna jest najbardziej stabilna w produktach o niskim pH, takich jak soki owocowe, a jej biodostępność wzrasta w produktach z dużą zawartością białek oraz tłuszczu, takich jak mleko. Największym ograniczeniem jest jednak brak możliwości zastosowania astaksantyny w produktach wodnych, dlatego naukowcy pracują nad opracowaniem metody nanodispersji astaksantyny w roztworach wodnych, co umożliwiłoby zastosowanie astaksantyny w szerszym zakresie [2].

Podsumowanie

Astaksantyna to jeden z najsilniejszych naturalnych antyoksydantów należących do grupy ksantofili, hydroksylowych pochodnych karotenów, zaliczanych do grupy naturalnych barwników (E161j). Właściwości astaksantyny wynikające z jej działania antyoksydacyjnego, przeciwzapalnego, przeciwnowotworowego i immunomodulacyjnego oraz to, że można ją bezpiecznie stosować spowodowały wzrost zainteresowania tym karotenoidem wielu ośrodków naukowych oraz producentów żywności. Wielokierunkowe właściwości astaksantyny wynikają z jej budowy chemicznej. Dzięki obecności sprzężonych wiązań podwójnych w łańcuchu węglowym oraz grup tlenowych w pierścieniach β -jononowych astaksantyna wykazuje zdolność eliminowania wolnych rodników oraz reaktywnych form tlenu i azotu, zarówno wewnątrz błony komórkowej, jak również na jej powierzchni. Astaksantyna nie ulega konwersji do witaminy A, nie jest kumulowana w organizmie. Dotychczas nie określono maksymalnej dawki, jaka może być stosowana bez wystąpienia skutków ubocznych, stąd też astaksantyna uznawana jest za bezpieczną, a podawana w dużych ilościach (nawet do 19 mg) nie stwarza zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi oraz zwierząt. Obecnie stosuje się ją powszechnie jako dodatek do pasz dla ryb oraz drobiu, jak również jako substancję bioaktywną w suplementach diety dla ludzi oraz coraz częściej do produkcji żywności funkcjonalnej.

Literatura

- [1] Alvarez V., Rofríguez-Sáiz M., De la Fuente J.L., Gudiña E.J., Godio R.P., Martín J.F., Barredo J.L.: The crtS gene of *Xanthophyllomyces dendrorhous* encodes a novel cytochrome P-450 hydroxylase involved in the conversion of beta-carotene into astaxanthin and other xanthophylls. *Fungal Genet. Biol.*, 2006, **43**, 261-272.
- [2] Anarjan N., Tan C.P.: Chemical stability of astaxanthin nanodispersions in orange juice and skimmed milk as model food systems. *Food Chem.*, 2013, **139**, 527-531.
- [3] Anderson M.L.: A preliminary investigation of the enzymatic inhibition of 5 α -reduction and growth of prostatic carcinoma cell line LNCap-FGC by natural astaxanthin and saw palmetto lipid extract *in vitro*. *J. Herb. Pharmacother.*, 2005, **5** (1), 17-26.
- [4] Aoi W., Naito Y., Sakuma K., Kuchide M., Tokuda H., Maoka T., Toyokuni S., Oka S., Yasuhara M., Yoshikawa T.: Astaxanthin limits exercise-induced skeletal and cardiac muscle damage in mice. *Antioxid. Redox Signaling*, 2003, **5** (1), 139-144.
- [5] Armenta-López R., Guerrero I.L., Huerta S.: Astaxanthin extraction from shrimp waste by lactic fermentation and enzymatic hydrolysis of the carotenoprotein complex. *J. Food Sci.*, 2002, **67** (3), 1002-1006.
- [6] Bartalucci G., Coppin J., Fisher S., Hall G., Helliwell J.R., Helliwell M., Liaan-Jensen S.: Unravelling the chemical basis of the bathochromic shift in the lobster carapace; new crystal structures of unbound astaxanthin, cathaxanthin and zeaxanthin. *Acta Cryst.*, 2007, **63** (2), 328-337.
- [7] Bertram J.S., Vine A.L.: Cancer prevention by retinoids and carotenoids: Independent action on a common target. *Biochim. Biophys. Acta*, 2005, **1740** (2), 170-178.
- [8] Bhosale P.: Environmental and cultural stimulants in the production of carotenoids from microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2004, **63** (4), 351-361.
- [9] Boussiba S., Bing W., Yuan J.P., Zarka A., Chen F.: Changes in pigments profile in the green alga *Haematococcus pluvialis* exposed to environmental stresses. *Biotechnol. Lett.*, 1999, **21** (7), 601-604.
- [10] Britton G., Liaaen-Jensen S., Pfander H.: Carotenoids today and challenges for the future. Carotenoids. In: Isolation and Analysis. T. IA. Eds. G. Britton, S. Liaaen-Jensen, H. Pfander. Birkhauser Verlag, Basel, Switzerland, 1995, pp. 13-26.
- [11] Camera E., Mastrofrancesco A., Fabbri C., Daubrawa F., Picardo M., Sies H., Stahl W.: Astaxanthin, cantaxanthin and β -carotene differently affect UVA-induced oxidative damage and expression of oxidative stress-responsive enzymes. *Exp. Dermatol.*, 2009, **18** (3), 222-231.
- [12] Carr C.C., Johnson D.D., Brendemuhl J.H., Gonzalez J.M.: Fresh pork quality and shelf-life characteristics of meat from pigs supplemented with natural astaxanthin in the diet. *Prof. Anim. Sci.*, 2010, **26** (1), 18-25.
- [13] Chew W., Mathison B.D., Kimble L.L., Mixter P.F., Chew B.P.: Astaxanthin decreases inflammatory biomarkers associated with cardiovascular disease in human umbilical vein endothelial cells. *Am. J. Adv. Food Sci. Technol.*, 2013, **1**, 1-17.
- [14] Clark R.M., Yao L., She L., Furr H.C.: A comparison of lycopene and astaxanthin absorption from corn oil and olive oil emulsions. *Lipids*, 2000, **35** (7), 803-806.
- [15] Coral-Hinostroza G.N., Ytrestøyl T., Ruyter B., Bjerkeng B.: Plasma appearance of unesterified astaxanthin geometrical E/Z and optical R/S isomers in men given single doses of a mixture of optical 3 and 3'R/S isomers of astaxanthin fatty acyl diesters. *Comp. Biochem. Physiol. Part C Toxicol. Pharmacol.*, 2004, **139**, 99-110.
- [16] Del Campo J.A., Rodriguez H., Moreno J., Vargas M.A., Rivas J., Guerrero M.G.: Accumulation of astaxanthin and lutein in *Chlorella zofingiensis* (Chlorophyta). *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2004, **64**, 848-854.
- [17] Edge R., Gaikwad P., Navaratnam S., Rao B.S., Truscott T.G.: Reduction of oxidized guanosine by dietary carotenoids: A pulse radiolysis study. *Arch. Biochem. Biophys.*, 2010, **504**, 100-103.
- [18] Elmadfa I., Muskat E.: Wielkie tabele kalorii i wartości odżywczych. Wyd. Muza S.A., Warszawa 2011.

- [19] Genest J.: C-reactive protein: Risk factor, biomarker and/or therapeutic target? *Can. J. Cardiol.*, 2010, **26**, 41A-44A.
- [20] Goto S., Kogure K., Abe K., Kimata Y., Yamashita E., Terada H.: Efficient radical trapping at the surface and inside the phospholipid membrane is responsible for highly potent antioxidative activity of the carotenoid astaxanthin. *Biochem. Biophys. Acta.*, 2001, **1512** (2), 251-258.
- [21] Guerin M., Huntley M.E., Olaizola M.: *Haematococcus* astaxanthin: Applications for human health and nutrition. *Trends Biotechnol.*, 2003, **21** (5), 210-216.
- [22] Hamulka J., Wawrzyniak A.: Karotenoidy w suplementach diety. *Probl. Hig. Epidemiol.*, 2011, **92** (1), 67-72.
- [23] Higuera-Ciapara I., Félix-Valenzuela L., Goycoolea F.M.: Astaxanthin: A review of its chemistry and applications. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2006, **46** (2), 185-196.
- [24] Jackson H., Braun C.L., Ernest H.: The chemistry of novel xanthophyll carotenoids. *Am. J. Cardiol.*, 2008, **101** (10A), 50D-57D.
- [25] Jyonouchi H., Sun S., Iijima K., Gross M.D.: Antitumor activity of astaxanthin and its mode of action. *Nutr. Cancer.*, 2000, **36** (1), 59-65.
- [26] Kabayashi M., Kakizono T., Nagai S.: Astaxanthin production by a green alga, *Haematococcus pluvialis* accompanied with morphological changes in acetate media. *J. Ferment. Bioeng.*, 1991, **71** (5), 335-339.
- [27] Kabayashi M., Kakizono T., Nagai S.: Enhanced carotenoid biosynthesis by oxidative stress in acetate-induced cyst cells of a green unicellular alga *Haematococcus pluvialis*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1993, **59** (3), 867-873.
- [28] Kadam S.U., Parabhasankar P.: Marine foods as functional ingredients in bakery and pasta products. *Food Res. Int.*, 2010, **43** (8), 1975-1980.
- [29] Katsuda T., Shiraishi H., Ishizu N., Ranjbar R., Katoh S.: Effect of light intensity and frequency of flashing light from blue light emitting diodes on astaxanthin production by *Haematococcus pluvialis*. *J. Biosci. Bioeng.*, 2008, **105** (3), 216-220.
- [30] Kopsel C.: Pulverulent carotenoid preparation for colouring drinks. Patent US20100267838, 21.10.2010.
- [31] Kurihara H., Koda H., Asami S., Kiso Y., Tanaka T.: Contribution of the antioxidative property of astaxanthin to its protective effect on the promotion of cancer metastasis in mice treated with restraint stress. *Life Sci.*, 2002, **70** (21), 2509-2520.
- [32] List of authorized additives in feedingstuffs published in application of article 9(t) b of Council Directive 70/524/EEC concerning additives in feedingstuffs. OJEC, C 50/1. 25.02.2004.
- [33] Macedo R.C., Bolin A.P., Marin D.P., Otton R.: Astaxanthin addition improves human neutrophils function: In vitro study. *Eur. J. Nutr.*, 2010, **49** (8), 447-457.
- [34] Martin H.D., Ruck C., Schmidt M., Sell S., Beutner S., Mayer B., Walsh R.: Chemistry of carotenoid oxidation and free radical reactions. *Pure Appl. Chem.*, 1999, **71** (12), 2253-2262.
- [35] Miki W.: Biological functions and activities of animal carotenoids. *Pure Appl. Chem.*, 1991, **63** (1), 141-146.
- [36] Miyawaki H., Takahashi J., Tsukahara H., Takehara I.: Effects of astaxanthin on human blood rheology. *J. Clin. Biochem. Nutr.*, 2008, **43** (2), 69-74.
- [37] Monahan P., Hiu S.: Agent for improving carcass performance in finishing hogs. Patent US20120253078, 04.10.2012.
- [38] Naguib Y.M.A.: Antioxidant activities of astaxanthin and related carotenoids. *J. Agric. Food Chem.*, 2000, **48** (8), 1150-1154.
- [39] Nakano M., Onodera A., Saito E., Tanabe M., Yajima K., Takahashi J., Ngyuen V.C.: Effect of astaxanthin in combination with alpha-tocopherol or ascorbic acid against oxidative damage in diabetic ODS rats. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, 2008, **54** (4), 329-334.
- [40] Nishigaki I., Rajendran P., Venugopal R., Ekambaran G., Sakthisekaran D., Nishigaki Y.: Cytoprotective role of astaxanthin against glycated protein/iron chelate-induced toxicity in human umbilical vein endothelial cells. *Phyther. Res.*, 2010, **24**, 54-59.

- [41] Odeberg J.M., Lignell Å., Len Pattersson A., Höglund P.: Oral bioavailability of the antioxidant astaxanthin in humans is enhanced by incorporation of lipid based formulations. *Eur. J. Pharm. Sci.*, 2003, **19** (4), 299-304.
- [42] Ooi Y., Kitamura A., Yamashita E.: Baked food produced from astaxanthin containing dough. Patent US20130108764, 02.05.2013.
- [43] Østerlie M., Bjerkeng B., Liaaen-Jensen S.: Plasma appearance and distribution of astaxanthin E/Z and R/S isomers in plasma lipoproteins of men after single dose administration of astaxanthin. *J. Nutr. Biochem.*, 2000, **11** (10), 482-490.
- [44] Palloza P., Torelli C., Boninsegna A., Simone R., Catalano A., Mele M.C., Picci N.: Growth-inhibitory effects of the astaxanthin-rich alga *Haematococcus pluvialis* in human colon cancer cells. *Cancer Lett.*, 2009, **283** (1), 108-117.
- [45] Parisi V., Tedeschi M., Gallinaro G., Varano M., Saviano S., Piermarocchi S.: Carotenoids and antioxidants in age-related maculopathy italian study: Multifocal electroretinogram modifications after 1 year. *Ophthalmology*, 2008, **115** (2), 324-333.
- [46] Petri D., Lundebye A.K.: Tissue distribution of astaxanthin in rats following exposure to graded levels in the feed. *Comp. Biochem. Physiol. Part C Toxicol. Pharmacol.*, 2007, **145** (2), 202-209.
- [47] Pogorzelska E., Hamulka J.: Analiza rynku suplementów diety z astaksantyną w Polsce. *Handel Wewnętrzny*, 2013, **4**, 107-115.
- [48] Ranga Rao A., Raghunath Reddy R.L., Baskaran V., Sarada R., Ravishankar G.A.: Characterization of microalgal carotenoids by mass spectrometry and their bioavailability and antioxidant properties elucidated in rat model. *J. Agric. Food Chem.*, 2010, **58** (15), 8553-8559.
- [49] Sarada R., Tripathi U., Ravishankar G.A.: Influence of stress on astaxanthin production in *Haematococcus pluvialis* grown under different culture conditions. *Process Biochem.*, 2002, **37** (6), 623-627.
- [50] Stachowiak B., Czarnecki Z.: Drożdże *Phaffia rhodozyma* jako potencjalne źródło naturalnej astaksantyny. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2006, **47** (2), 17-28.
- [51] Stachowiak B., Gramza-Michałowska A., Nowak J., Reguła J.: Potencjał przeciwutleniający ekstraktów karotenoidów pozyskanych z mutantów drożdży *Phaffia rhodozyma* w emulsji kwasu linolowego. *Probl. Hig. Epidemiol.* 2011, **92** (4), 890-893.
- [52] Stachowiak B.: Astaxanthin synthesis by *Xanthophyllomyces dendrorhous* DSM 5626 and its astaxanthin overproducing mutants on xylose media under different illumination. *Acta Sci. Pol., Technol. Aliment.*, 2014, **13** (3), 279-288
- [53] Stewart J.S., Lignell A., Pettersson A., Elfving E., Soni M.G.: Safety of astaxanthin-rich microalgae biomass: Acute and subchronic toxicity studies in rats. *Food. Chem. Toxicol.*, 2008, **46** (9), 3030-3036.
- [54] White D.A., Page G.I., Swaile J., Moody A.J., Davies S.J.: Effect of esterification on the absorption of astaxanthin in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquacult. Res.*, 2002, **33** (5), 343-350.
- [55] Valko M., Rhodes C.J., Moncol J., Izkovic M., Mazur M.: Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer. *Chem. Biol. Interact.*, 2006, **160** (1), 1-40.
- [56] Van Het Hof K.H., West C.E., Weststrate J.A., Hautvast J.G.A.J.: Dietary factors that affect the bioavailability of carotenoids. *J. Nutr.*, 2000, **130** (3), 503-506.
- [57] Yamashita E.: Astaxanthin as a medical food. *FFHD*, 2013, **7** (3), 254-258.
- [58] Yang Y.X., Kim Y.J., Jin Z., Lohakare J.D., Kim C.H., Ohh S.H., Lee S.H., Choi J.Y., Chae B.J.: Effects of dietary supplementation of astaxanthin on production performance, egg quality in layers and meat quality in finishing pigs. *AJAS*, 2006, **19** (7), 1019-1025.
- [59] Yang Y., Kim B., Lee J.Y.: Astaxanthin structure, metabolism, and health benefits. *J. Hum. Nutr. Food Sci.*, 2013, **1**, 1003:1-11.
- [60] Zagalsky P.F.: β -crustacyanin, the blue-purple carotenoprotein of lobster carapace: Consideration of the bathochromic shift of the protein-bound astaxanthin. *Acta. Crystallog.*, 2003, **D59** (8), 1529-1531.
- [61] Commission Regulation (EC) No 2316/98 of 26 October 1998 concerning authorisation of new additives and amending the conditions for authorisation of a number of additives already authorised in feedingstuffs. *Dz.U. UE L 289 z 28.10.1998.*

- [62] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju wsi z dnia 8.01.2003 r. w sprawie wykazu produktów, które do dnia 26 października 2003 r. mogą być wytwarzane i wprowadzane do obrotu bez uprzedniego ich wpisania do odpowiedniego rejestru produktów. Dz. U. 2003 r. Nr 29, poz. 243.

ASTAXANTHIN – STRUCTURE, PROPERTIES, AND APPLICATION POSSIBILITIES IN FUNCTIONAL FOOD

S u m m a r y

Astaxanthin is a naturally occurring xanthophyll. It gives the tissues of fish, such as salmon or trout, as well as the shells of crustaceans a characteristic pink-red colour. Animals and people do not have the ability to synthesize astaxanthin *de novo*. Some algae, yeast, bacteria, and plants possess this ability. Owing to its chemical structure, astaxanthin is characterized by strong antioxidant properties. It is considered one of the most powerful natural antioxidants. Scientific studies carried out so far have proven that astaxanthin, if taken in large doses, does not exhibit any prooxidative and toxic properties. Hence, astaxanthin is used as an ingredient in dietary supplements and, moreover, as a feed additive for fish and, to a lesser extent, for poultry. More and more frequently, it is also applied as a functional food component. The paper presents a detailed characterization of astaxanthin in terms of its chemical structure, occurrence, application safety, and potential applications thereof to produce functional food.

Key words: astaxanthin, occurrence, safety, functional food, dietary supplements 