

<https://doi.org/10.56583/frp.2542>

Judyta Cielecka-Piontek*

*Uniwersytet Medyczny im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu
Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich*

<https://orcid.org/0000-0003-0891-5419>

Elżbieta Studzińska-Sroka**

Uniwersytet Medyczny im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu

<https://orcid.org/0000-0002-0462-1766>

Patryk Kuhn***

Uniwersytet Medyczny im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu

<https://orcid.org/0009-0009-1666-0605>

Maja Paterska****

Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich

<https://orcid.org/0009-0002-5395-9867>

* Judyta Cielecka-Piontek – profesor doktor habilitowany, Kierownik Katedry i Zakładu Farmakognozji i Biomateriałów Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu.

** Elżbieta Studzińska-Sroka – farmakognosta, farmaceutka; doktor habilitowany nauk farmaceutycznych, Adiunkt w Katedrze i Zakładzie Farmakognozji i Biomateriałów Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu.

*** Patryk Kuhn – student Farmacji na Uniwersytecie Medycznym w Poznaniu, członek Studenckiego Koła Naukowego Farmakognozja przy Katedrze i Zakładzie Farmakognozji i Biomateriałów UMP.

**** Maja Paterska – doktor nauk rolniczych, adiunkt w Zakładzie Farmakologii i Fitochemii Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Poznaniu oraz w Katedrze Fizjologii Roślin Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIE ALG – ANALIZA WIELOASPEKTOWA

Streszczenie

Algi są różnorodną grupą organizmów, występującą najczęściej w środowisku wodnym. Wśród nich wyróżnia się różne typy filogenetyczne, między innymi: sinice, zielenice, brunatnice i krasnorosty. Algi stanowią naturalne źródło wielu substancji odżywczych, w tym białek, witamin, kwasów tłuszczowych, mikro- i makroelementów. Ich metabolity cechuje wielokierunkowa aktywność biologiczna: przeciwzapalna, antyoksydacyjna, antybakteryjna a także, według niektórych badań przeciwnowotworowa. Potwierdzają to wyniki badań o charakterze *in vitro* oraz *in vivo*. Ze względu na wysoką wartość odżywczą oraz potencjał prozdrowotny, niektóre algi otrzymały status żywności funkcjonalnej. Algi stosowane są również jako dodatki do żywności i w przemyśle biopaliwowym. Znalazły zastosowanie w leczeniu między innymi jako składnik opatrunków. Do produktów kosmetycznych algi dodawane są ze względu na działanie przeciwstarzeniowe, a także fotoprotekcyjne. Niniejsza praca omawia pozycję systematyczną alg, ich budowę i wytwarzane związki chemiczne, a także charakteryzuje algi jako grupę organizmów o interesującym potencjale biologicznym oraz wysokiej przydatności do wykorzystania w różnych gałęziach przemysłu.

Słowa kluczowe: glony, spirulina, chlorella, barwniki alg, aktywność biologiczna alg, znaczenie alg

PROPERTIES AND APPLICATIONS OF ALGAE – MULTI-ASPECT ANALYSIS

Abstract

Algae are a diverse group of organisms, commonly found in aquatic environments. There are some phylogenetic types, including cyanobacteria, green-algae, brown-algae and red-algae. Algae are a natural source of many nutrients, including proteins, vitamins, fatty acids, micro- and macroelements. Their metabolites are characterized by multidirectional biological activity: anti-inflammatory, antioxidant, antibacterial and also, according to some studies, anticancer, confirmed by the results of *in vitro* and *in vivo* studies. Due to their high nutritional value and health-promoting potential, some algae have been granted functional food status. Algae are also used as food additives and biofuel. They have found use in medicine, for example as an ingredient in dressings. Algae are added to cosmetics for their anti-aging and photoprotective effects. This paper discusses the systematic position of algae, their structure, chemical

compounds and characterizes algae as a group of organisms with interesting biological potential and high suitability for use in various industries.

Keywords: *Algae, spirulina, chlorella, algae pigments, biological activity of algae, use of algae*

~ . ~

Wstęp

Algi to organizmy występujące w wielu ekosystemach, najczęściej jednak są obecne w środowisku wodnym. Różnią się między sobą rozmiarem, kolorem czy też obszarem występowania. Stanowią ważną część łańcuchów pokarmowych w swoich ekosystemach. Początkowo organizmy te błędnie identyfikowano. Pierwsze poważne badania nad właściwą klasyfikacją tych organizmów są datowane na początek XIX w. Od tego czasu wiedza w tym obszarze sukcesywnie wzrastała¹. Pomimo tego w Chinach algi stosowano już 2000 lat temu². Pierwsze doniesienia o wykorzystaniu brunatnic z gatunku *Sargassum spp.* w tradycyjnej medycynie chińskiej pochodzą właśnie z tego okresu³. Obecnie algi są wykorzystywane w farmacji i kosmetologii⁴. W przemyśle spożywczym algi znane są jako, tzw. *super-foods*, między innymi ze względu na wysoką wartość odżywczą oraz znaczną zawartość mikro- i makroelementów⁵. Organizmy te mają również znaczenie dla rozwoju nowych ekologicznych technologii umożliwiających produkcję biotworzyw czy biopaliw⁶. Artykuł ten stanowi omówienie alg jako grupy organizmów, ich pozycji systematycznej, budowy, chemizmu, a także aktywności biologicznej, potencjału leczniczego i możliwości zastosowania w różnych gałęziach przemysłu.

¹ X. Wang, H. Linwen, Y. Yingchao, L. Huan, Y. Wang, B. Xia, G. Wang, *Economically important red algae resources along the Chinese coast: History, status, and prospects for their utilization*, „Algal Research” 2020, vol. 46, 101817.

² Tamże.

³ L. Liu, M. Heinrich, S. Myers, S. A Dworjanyn, *Towards a better understanding of medicinal uses of the brown seaweed Sargassum in Traditional Chinese Medicine: A phytochemical and pharmacological review*, „Journal of Ethnopharmacology” 2012, 142.3, s. 591-619.

⁴ A. Jabłońska-Trypuć, *Algae as Crop Plants Being a Source of Bioactive Ingredients of Pharmaceutical and Dietary Importance*, „Agronomy”, 14.5, 2024, s. 895.

⁵ J. Espinosa-Ramírez, A. C. Mondragón-Portocarrero, J. A. Rodríguez, J. M. Lorenzo, E. M. Santos. *Algae as a potential source of protein meat alternatives*, „Front. Nutr.” 2023, nr 10, 1254300.

⁶ W. Y. Cheah, A. C. Er, K. Aiyub, N. H. M. Yasin, S. L. Ngan, K. W. Chew, P. L. Show, *Current status and perspectives of algae-based bioplastics: A reviewed potential for sustainability*, „Algal Research”, 2023, nr 71, 103078.

Algi w systematyce botanicznej

Nazwa „algi” wywodzi się od łacińskiego słowa *Alga* – co oznacza glon, wodorost. Nauka zajmująca się algami to fykologia lub algologia. Pierwszy z terminów zaczerpnięto z greckiego słowa *Phykos* (glon, wodorost), drugi z łacińskiego *Alga*. Algi są dość liczną grupą organizmów obejmującą ponad 174 tysiące gatunków. Ich klasyfikacja opiera się na istnieniu cech wspólnych w budowie i fizjologii mimo braku tego samego przodka. Aktualnie algi podzielone są na kilkanaście typów filogenetycznych, między innymi: sinice (cyjanobakterie; *Cyanobacteria*), zielenice (algi zielone; *Chlorophyta*), brunatnice (algi brązowe; *Phaeophyceae*) oraz krasnorosty (algi czerwone; *Rodophyta*), a klasyfikacja ta jest zgodna z zabarwieniem tych organizmów⁷. Algi stanowią przykład taksonu polifiletycznego, co oznacza, że w zależności od gatunku należą do różnych królestw organizmów: roślin, protistów lub bakterii. Takie zróżnicowanie wskazuje, że wśród alg wyróżnia się zarówno organizmy bezjądrowe (*Procaryota*), jak i jądrowe (*Eucaryota*).

Algi to organizmy środowisk wilgotnych i wodnych. Spotkać je więc można zarówno na lądzie, jak i w akwenach wód słodkich i słonych. Do alg zaliczyć można organizmy o różnej wielkości i budowie. Wśród nich wymienić należy zarówno organizmy jednokomórkowe, często tworzące kolonie, jak i znacznych rozmiarów plechowce, osiagające nawet kilkadziesiąt metrów⁸. Jedną z klasyfikacji opisuje algi uwzględniając wielkość tych organizmów. Powstały terminy mikro- oraz makroalgi, które rozdzielają algi jednokomórkowe od wielokomórkowych. Makroalgi (inaczej: makroglony) to wielokomórkowe glony widoczne „gołym okiem”. Nazywane są potocznie wodorostami. Zbudowane są z niby-liści i niby-łodygi, część liściokształtna odpowiada u nich za pochłanianie wody oraz minerałów. Należą do nich wielokomórkowe zielenice (np. sałata morską; *Ulva lactuca*), brunatnice (np. morszczyń pęcherzykowaty; *Fucus vesiculosus*) oraz krasnorosty (np. chrzęstnica kędzierzawa; *Chondrus crispus*). Mikroalgi to organizmy jednokomórkowe, które obserwuje się z użyciem przyrządów optycznych. Można je hodować w bioreaktorach lub w hodowlach otwartych. Wybrane algi z grupy mikroalg zostały również uznane za tzw. żywność funkcjonalną. Zwiększyło to zainteresowanie nimi przez przemysł spożywczy. Przykładem alg z grupy mikroalg jest chlorella należąca do zielenic⁹.

⁷ M. D. Guiry, *How many species of algae are there?*, „Journal of phycology” 2012, vol. 48.5, s. 1057-1063.

⁸ A. El Gamal, A. Ali, *Biological Importance of Marine Algae*, “Saudi Pharmaceutical Journal” 2010, vol. 18.1, s. 1-25.

⁹ R. E. Merchant, C. A. Andre, *A review of recent clinical trials of the nutritional supplement Chlorella pyrenoidosa in the treatment of fibromyalgia, hypertension, and ulcerative colitis*, „Altern Ther Health Med” 2001, vol. 7.3, s. 79-92.

Algi mogą wchodzić w symbiozę z innymi organizmami. Jednym z przykładów są zooxantelle z koralowcami. W zależności tej glony, bytując w otworze gębowym koralowca wspomagają ich wzrost (dostarczając tlen, dwutlenek węgla i związki azotu) za co otrzymują schronienie oraz materię nieorganiczną¹⁰. Kolejnym przykładem jest kooperacja zielenic lub sinic z komórkami grzybów (workowców *Ascomycetes* lub podstawczaków *Basidiomycetes*) skutkująca wytworzeniem nowego organizmu – tzw. lichenizowanych grzybów (porostów). Porosty to należące do grzybów, zupełnie odrębne twory charakteryzujące się własną morfologią, chemizmem i wymaganiami środowiskowymi¹¹.

Algi i substancje o charakterze barwników

Algi charakteryzują się zróżnicowanym zabarwieniem co związane jest z trzema grupami związków barwnych: chlorofili, karotenoidów (karoteny i ksantofile) i fikobilin¹². Związki te, w różnym stopniu pozwalają algom na przeprowadzanie procesu fotosyntezy umożliwiającego przemianę energii świetlnej w chemiczną. Ich obecność w glonach związana jest więc również z dostępem do światła słonecznego, a tym samym z głębokością, na której, pod powierzchnią wody żyją poszczególne typy glonów. Im mniej światła dociera pod wodę, tym jego widmo jest uboższe i tylko fale o wybranej długości mogą być pochłaniane przez znajdujące się tam autotrofy¹³.

Absorpcję promieniowania o określonej długości fali (różnej barwie) umożliwiają między innymi różne typy chlorofilu. Chlorofil to zielony barwnik o złożonej strukturze. Zbudowany jest z pierścienia porfiryny, jonu magnezu i przyłączonego do niego łańcucha węglowego. Pierścień porfirynowy jest odpowiedzialny za pochłanianie energii świetlnej, natomiast znajdujący się w jego centrum jon magnezu jest akceptorem elektronów. W związku z modyfikacjami chemicznymi pierścienia porfiryny wyróżnia się chlorofile a-e, z których chlorofil a, b, c i d występują w algach¹⁴. Chlorofil a i b to barwniki asymilacyjne występujące w plastydach

¹⁰ S. Karako, N. Stambler, Z. Dubinsky, *The Taxonomy and Evolution of the Zooxanthellae-Coral Symbiosis*, "Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology Symbiosis" January 2004, s. 539-557.

¹¹ T. Spribille, P. Resl, D. E. Stanton, G. Tagirdzhanova, *Evolutionary biology of lichen symbioses*, „The New phytologist” 2022, vol. 234, 5, s. 1566–1582.

¹² P. Garcia-Perez, C. Lourenço-Lopes, A. Silva, A. G. Pereira, M. Fraga-Corral, C. Zhao, J. Xiao, J. Simal-Gandara, M. A. Prieto, *Pigment Composition of Nine Brown Algae from the Iberian Northwestern Coastline: Influence of the Extraction Solvent*, „Marine drugs” 2022, vol. 20, 2 s. 11-13.

¹³ S. F. Mohsenpour, B. Richards, N. Willoughby N., *Spectral conversion of light for enhanced microalgae growth rates and photosynthetic pigment production*, „Bioresource technology” 2012, nr 125, s. 75-81.

¹⁴ T. Martins, A. N. Barros, E. Rosa, L. Antunes, *Enhancing Health Benefits through Chlorophylls and Chlorophyll-Rich Agro-Food: A Comprehensive Review*, „Molecules” 2023, vol. 28.14, s. 1-21.

żyjących najbliżej lustra wody zielenic¹⁵. Zielenice to jedno- lub wielokomórkowe glony należące do królestwa roślin, które żyją w wodzie morskiej, słodkiej oraz wilgotnych miejscach, na przykład pod korą drzew. Chlorofil a, który jest obecny w roślinach – w tym w zielenicach, absorbuje światło w czerwonym i niebieskim obszarze widma, ze szczytową absorpcją odpowiednio przy około 430 i 662 nm. Nieznaczna różnica w budowie między chlorofilem a i b spowodowała, że chlorofil b pochłania światło w niebiesko-zielonym obszarze widma, z maksymalną absorpcją przy około 453 nm. Chlorofil b odgrywa również rolę w fotosyntezie, ale jego główną funkcją jest ochrona chlorofilu a przed nadmiarem światła. Obecność tego wyspecjalizowania ułatwiła zielenicom funkcjonowanie w środowisku o najwyższym w porównaniu z innymi gatunkami glonów nasłonecznieniu. Najstarsza skamielina zawierająca ślady zielenic pochodzi z okresu Prekambru¹⁶.

Należące do protistów brunatnice to samożywna grupa wielokomórkowych alg, która wytwarza różne substancje o charakterze barwników. W ich plechach znajdują się: chlorofile a i c (mniej niż w innych grupach alg), karoteny, reprezentowane głównie przez α -karoten i β -karoten oraz najbardziej rozpowszechnione w brunatnicach ksantofile (neoksantyna A i B, fukoksantyna i wiolaksantyna)¹⁷. Nie stwierdzono występowania chlorofilu b¹⁸.

Algi czerwone, nazywane krasnorostami, podobnie jak zielenice należą do królestwa roślin. Większość krasnorostów bytuje w wodzie słonej, zdarzają się jednak gatunki żyjące w wodzie słodkiej jako epifity. Nazwa sugeruje, że posiadają barwnik czerwony – fikoerytrynę, lecz oprócz tego zawierają również barwnik niebieski fikocyjan. Krasnorosty występują na Ziemi już ponad miliard lat, są one najstarszymi znanymi organizmami rozmnażającymi się płciowo¹⁹.

Chryzofity, to grupa glonów należąca do protistów, do których zaliczamy najczęściej organizmy jednokomórkowe, czasami skupiające się w kolonie. Wytwarzają barwniki, których kombinacja nadaje im złociste zabarwienie: chlorofil a i c oraz fukoksantynę. Do chryzofitów należą głównie okrzemki, złotowiciowce oraz różnowiciowce.

¹⁵ S. Maruyama, K. Eunsoo, *A modern descendant of early green algal phagotrophs*, „Current biology: CB” 2013, vol. 23.12, s. 1081-1084.

¹⁶ T. P. Durrett, R. Welti, *The tail of chlorophyll: Fates for phytol*, „The Journal of biological chemistry” 2021, vol. 296.

¹⁷ T. Martins, A. N. Barros, E. Rosa, L. Antunes, dz. cyt.

¹⁸ P. Garcia-Perez, C. Lourenço-Lopes, A. Silva, A. G. Pereira, M. Fraga-Corral, C. Zhao, J. Xiao, J. Simal-Gandara, M. A. Prieto, dz. cyt.

¹⁹ N. J. Butterfield, *Bangiomorpha pubescens n. gen., n. sp.: implications for the evolution of sex, multicellularity, and the Mesoproterozoic/Neoproterozoic radiation of eukaryotes*, „Paleobiology” 2000, vol. 26.3, s. 386-404

Spotykane w stojących zbiornikach wodnych sinice (*Cyanobacteria*), inaczej algi niebiesko-zielone, należą do bakterii²⁰. Większość z nich to organizmy samożywne ze względu na obecny w nich chlorofil a. Dodatkowo sinice zawierają niebieski barwnik – fikocyjan, a także czerwoną fikocytrynę lub żółty karoten. Sinice należą do organizmów pionierskich, co oznacza, że dzięki swojej odporności na wpływ szkodliwych dla większości organizmów czynników środowiskowych mogą osiedlać się praktycznie w każdym środowisku na Ziemi. Są organizmami jednokomórkowymi, ale mają zdolność tworzenia skupisk, najczęściej w formie nici²¹. Sinice są organizmami, które jako pierwsze zaczęły produkować tlen na Ziemi. Przykładem sinicy jest spirulina, która posiada zastosowanie w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym.

Związki zawarte w algach

Opócz wymienionych wyżej barwników, algi wytwarzają związki chemiczne, które są coraz chętniej badane pod kątem właściwości leczniczych oraz możliwości wykorzystania ich w przemyśle. Dowiedziono, że zawartość metabolitów produkowanych przez algi jest ściśle związana z gatunkiem, miejscem występowania czy porą zbioru alg²².

Algi zawierają wiele składników odżywczych. Są źródłem białka, w tym aminokwasów egzogennych. W zależności od gatunku, zawartość białka w algach waha się między 10-30% suchej masy, czyli od 10 do 30 gramów białka na 100 gramów suchych alg²³. Istnieją również gatunki, w których zawartość białka jest zdecydowanie wyższa są to: *Pyropia tenera* (znana również jako *Nori*) zawierająca nawet do 47% białka oraz *Chlorella* (zielenice) czy spirulina (sinice) z ponad 50% zawartością białka w suchej masie²⁴. Pomimo wysokiej zawartości tego składnika budulcowego algi, z uwagi na specyficzny zapach są rzadko wybierane jako jego źródło.

Algi są również bogate w mikro- i makroelementy. Jod, magnez, mangan, miedź czy żelazo to przykłady zawartych w glonach minerałów. Zdolność absorbowania pierwiastków ze środowiska ma związek z ilością polisacharydów w ścianie komórkowej glonów²⁵. Opublikowane wyniki badań dowodzą, że największe

²⁰ A. M. Mehdizadeh, H. Peerhossaini, *Cyanobacteria: Model Microorganisms and Beyond*, „Microorganisms” 2022, vol. 10.694, s. 1-17.

²¹ Tamże.

²² M. Ariede, T. Candido, A. Morocho-Jácome, M. Velasco, J. C. Carvalho, A. Baby, *Cosmetic attributes of algae - A review*, „Algal Research” 2018, vol. 25, s. 483-487.

²³ L. Misurcova, *Chemical Composition of Seaweeds*, w: *Handbook of Marine Macroalgae: Biotechnology and Applied Phycology*, First Edition. Edited by Se-Kwon Kim 2012, s. 172-173.

²⁴ E. W. Becker, *Micro-algae as a source of protein*, „Biotechnology advances”, 2007, vol. 25, 2.

²⁵ L. Misurcova, dz. cyt.

stężenie związków mineralnych znajduje się w brunatnicach. Wynika to prawdopodobnie z obecności w plechach alg brunatnych kwasu alginowego, który tworzy sole z metalami, najczęściej z wapniem, potasem, sodem i magnezem. Zbadano zawartość wybranych związków mineralnych znajdujących się w ośmiu gramach suszonych alg i porównano to do rekomendowanej ich dziennej dawki. Na tej podstawie wykazano, że część wodorostów posiadała wysoką zawartość żelaza, przy czym najwięcej związków żelaza zawierała alga *P. tenera* pokrywając 146% dziennego zapotrzebowania na żelazo w ośmiu gramach suszonej algi. Cynk, mangan i miedź były obecne w znacznej (powyżej 50%) ilości tylko w niektórych badanych ośmiogramowych próbkach alg. Wyniki badań wskazują również, że brązowe algi przewyższają zielone i czerwone pod względem zawartości jodu. Algi zawierają również wiele witamin, zarówno rozpuszczalnych w wodzie, jak i rozpuszczalnych w tłuszczach. Są bogatym źródłem witaminy C, co przyczyniło się do tego, że w dawnych czasach algi były spożywane w celu prewencji skorbutu. Wykazano, że niektóre gatunki zielenic i brunatnic zawierają wysokie ilości witaminy C (500 – 3000 mg/kg sproszkowanej algi), co jest porównywalne do ilości witaminy C zawartej w bogatych w tę witaminę warzywach – pietruszki i czerwonej papryki. Większość alg czerwonych i brązowych zawiera także witaminy z grupy B, w szczególności B₁, B₂ oraz B₁₂. Wszystkie trzy są ważnymi koenzymami w wielu reakcjach metabolicznych w organizmie. Z witamin rozpuszczalnych w tłuszczach, w algach znajduje się witaminę E oraz karotenoidy. Brunatnice i krasnorosty zawierają ich więcej niż zielenice²⁶.

Algi są również źródłem cennych wielonienasyconych kwasów tłuszczowych – ω-3 i ω-6. Źródłem kwasów ω-3 są posiadające zdolność do szybkiego wzrostu mikroalgi. Liczne badania wskazują, że do kwasów ω-3 najobficiej występujących w mikroalgach należą: kwas α-linolenowy (ALA), kwas eikozapentanowy (EPA) i kwas dokozaheksanowy (DHA). Średnia ich zawartość w mikroalgach może przekraczać nawet 13% ogólnej zawartości kwasów tłuszczowych²⁷. Wśród makroalg przykładem gatunków zawierających kwas EPA są *Ulva lactuca* (*Chlorophyta*) i *Porphyra spp.* (*Rhodophyta*)²⁸.

Algi stanowią też źródło wielu polisacharydów o szerokim spektrum zastosowania. Profil polisacharydowy mocno różni się między grupami alg. Brunatnice zawierają kwas alginowy, fukoidynę i laminarynę, krasnorosty stanowią natomiast źródło agaru i karagenu.

²⁶ Tamże.

²⁷ B. A. Perdana, Z. Chaidir, A. J. Kusnanda, A. Dharma, I. J. Zakaria, A. Syafrizayanti, A. Bayu, M. Y. Putra, *Omega-3 fatty acids of microalgae as a food supplement: A review of exogenous factors for production enhancement*, „Algal Research” 2021, vol. 60, 102542.

²⁸ H. S. El-Beltagi, A. A. Mohamed, H. I. Mohamed, K. M. A. Ramadan, A. A. Barqawi, A. T. Mansour, *Phytochemical and Potential Properties of Seaweeds and Their Recent Applications: A Review*, „Mar. Drugs” 2022, vol. 20.6, 2022, 342, s. 1-49.

Aktywność biologiczna

Metabolity alg wykazują niezwykle ciekawą aktywność biologiczną. Jednym z bardziej interesujących związków, występującym w brunatnicach są polimeryczne pochodne floroglucyny – florotaniny²⁹. Florotaniny znajdujące się w algach brązowych wykazują aktywność przeciwzapalną, antybakteryjną oraz przeciwnowotworową³⁰. Przeprowadzone na myszach badania dowiodły, że niektóre florotaniny, na przykład floroglucynol mogą hamować rozwój nowotworu piersi. Tę zdolność badano na liniach komórkowych MCF-7, SK-BR3 oraz BT549. Florotaniny posiadają również działanie chroniące przed promieniowaniem UV-B, co sugeruje zastosowanie tych związków w produkcji preparatów zawierających naturalne filtry przeciwsłoneczne. Natomiast florotanina – oktafloretol A, pozyskana z brunatnicy *Ishige sinicola* podana szczurom silnie obniżała skurczowe ciśnienie tętnicze, a siła obserwowanego działania była zbliżona do efektu terapeutycznego referencyjnego kaptoprylu. Poza tym, florotaniny wykazują działanie antyoksydacyjne oraz hepatoprotekcyjne. Algi wytwarzają również lektyny o udowodnionym potencjale leczniczym: przeciwbakteryjnym, przeciwwirusowym oraz przeciwgrzybiczym. Wartą uwagi jest lektyna griffithsin, która została wyizolowana z morskich krasnorostów *Griffithsia* sp. Związek ten wykazywał interesującą aktywność przeciwwirusową przeciw wirusom SARS-CoV, zapaleniu wątroby typu C oraz wirusowi opryszczki. Natomiast fukoksantyna, brązowy barwnik występujący szczególnie obficie w brunatnicach wykazuje działanie neuroprotektoryjne, przeciwnowotworowe, antydepresyjne oraz przeciwzapalne³¹. Karagen, jeden z ważniejszych składników chrząstki kędzierzawej został przebadany pod kątem przeciwwirusowych właściwości. Otrzymane wyniki dowiodły aktywności wobec brodawczaka ludzkiego, ospy oraz SARS-CoV2. Karagen posiada też działanie przeciwbakteryjne na bakterie Gram dodatnie oraz Gram ujemne, obniżające poziom cholesterolu, antykoagulacyjne, antyoksydacyjne oraz przeciwnowotworowe³².

²⁹ T. Imbs, T. Zvyagintseva, *Phlorotannins are Polyphenolic Metabolites of Brown Algae*, „Russian Journal of Marine Biology” 2018, nr 44, s. 263-273.

³⁰ G. P. Rosa, W. R. Tavares, P. M. Sousa, A. K. Pagès, A. M. L. Seca, D. C. G. A. Pinto, *Seaweed Secondary Metabolites with Beneficial Health Effects: An Overview of Successes in In Vivo Studies and Clinical Trials*, „Mar Drugs” 2019, vol. 18.1, s. 1-32.

³¹ Tamże.

³² A. Bahari, K. Moelants, J. Wallecan, G. Mangiante, J. Mazoyer, M. Hendrickx, T. Grauwet, *Understanding the effect of time, temperature and salts on carrageenan extraction from Chondrus crispus*, „Algal Research” 2021, vol. 58, s. 1-16.

Badania kliniczne ekstraktów i preparatów z alg

Badania kliniczne pozwalają stwierdzić czy substancja lub produkt ją zawierający, może wywołać efekt farmakologiczny, a także czy jest bezpieczna przy stosowaniu przez człowieka. Zdolność do redukcji przebarwień skóry oraz działanie przeciwzapalne o znaczeniu w leczeniu łuszczycy dowiedziono dla kremów z wyciągami z algi *Gracilaria sp.* Badanie to przeprowadzono na 30 pacjentach z łuszczycą a substancją referencyjną był 0,05% krem z klobetazolem³³. Ponadto dowiedziono, że zażywanie preparatów zawierających spirulinę i chlorellę, które są bogate w białka i aminokwasy, wspomaga syntezę białek w tkance mięśniowej³⁴. Wykazano również, w badaniu na 52 pacjentach statystycznie znaczący spadek wagi, frakcji cholesterolu LDL, wzrost frakcji HDL oraz spadek stężenia glukozy na czczo po stosowaniu preparatu zawierającego ekstrakt wodny z alg słodkowodnych³⁵. Wnioski z innych badań wskazały, że wyciąg z algi *Klamath*, stosowane przez 15 kobiet w okresie menopauzy zmniejszył prawdopodobieństwo wystąpienia depresji w porównaniu do 15 pacjentek nie stosujących takiego preparatu³⁶. W podwójnie zaślepionym, randomizowanym badaniu wykazano również wpływ codziennej suplementacji preparatami zawierającymi chlorellę na: ciśnienie tętnicze krwi (obserwowano efekt hipotensyjny), poziom cholesterolu (obserwowano efekt hipolipemiczny), gojenie się ran (przyspieszały ten proces) oraz stymulację odpowiedzi immunologicznej³⁷.

Zastosowanie alg w medycynie

Tradycyjne zastosowanie alg jest ściśle związane z naturalnym leczeniem chińskim, gdzie stosowano je w celu detoksykacji organizmu, przeciwzapalnie,

³³ M. Ali, S. Shatalebi, S. Bokaie Jazi, A. Yegdaneh, F. Iraj, A. H. Siadat, P. Noorshargh, *Comparative evaluation of Gracilaria algae 3% cream vs Clobetasol 0.05% cream in treatment of plaque type psoriasis: A randomized, split-body, triple-blinded clinical trial*, „Dermatologic therapy” 2020, vol. 33, e14317.

³⁴ I. van der Heijden, S. West, A. J. Monteyne, T. J. A. Finnigan, D. R. Abdelrahman, A. J. Murton, F. Stephens, B. T. Wall, *Algae Ingestion Increases Resting and Exercised Myofibrillar Protein Synthesis Rates to a Similar Extent as Mycoprotein in Young Adults*, „The Journal of nutrition” 2023, vol. 153.12, s. 3406-3417.

³⁵ J. Oben, E. Enonchong, D. Kuate, D. Mbanya, T. C. Thomas, D. J. Hildreth, T. D. Ingolia, M. S. Tempesta, *The effects of ProAlgaZyme novel algae infusion on metabolic syndrome and markers of cardiovascular health*, „Lipids in health and disease” 2007, vol. 6.20, s. 1-9.

³⁶ A. D. Genazzani, E. Chierchia, C. Lanzoni, S. Santagni, F. Veltri, F. Ricchieri, E. Rattighieri, R. E. Nappi, *Effetti degli estratti di Alga Klamath sul tono dell'umore e la depressione in menopausa: studio pilota* [Effects of Klamath Algae extract on psychological disorders and depression in menopausal women: a pilot study], „Minerva ginecologica” 2010, vol. 62 (5): 381-88.

³⁷ R. E. Merchant, C. A. Andre, dz. cyt.

na wzmocnienie kości i zębów oraz dla zwiększenia witalności. Były one używane również przez Rzymian do leczenia ran oraz oparzeń. Wspomniane wykorzystanie w lecznictwie tradycyjnym ma odzwierciedlenie we wskazaniach do stosowania obecnie dostępnych preparatów zawierających algi lub związki z nich otrzymane. Europejska agencja leków (EMA) w raporcie dotyczącym preparatów z morską pęcherzykowatą (*F. vesiculosus*) podaje zastosowanie wspomagające utratę wagi, leczenie łuszczycy, refluksu żołądkowo-przełykowego czy nawet w anemii³⁸. Morszczyzn stosowany jest również ze względu na zawartość jodu jako suplement diety uzupełniający niedobory jodu w diecie. Nowoczesne materiały opatrunkowe zawierają alginian sodowo-wapniowy, dzięki temu opatrunk ten umożliwia okluzję rany, a co za tym idzie lepsze jej gojenie. Alginiany stosowane są również w stomatologii do wykonywania wycisków uzębienia. Dostępne są również preparaty z astaksantyną działającą antyoksydacyjnie³⁹, badania naukowe podają również pozytywny efekt astaksantyny na działanie układu krwionośnego czy nawet poprawę wzorku przy regularnym stosowaniu suplementów zawierających ten związek. Karagen z alg czerwonych używany jest w leczeniu kaszlu⁴⁰, również w postaci sprayu donosowego w celu leczenia wirusowych chorób układu oddechowego⁴¹. Ponadto coraz większe uznanie w świecie nauki zyskuje modyfikowanie mikroalg jako jadalnych szczepionek. Badania wskazują, że zmodyfikowane na drodze inżynierii genetycznej chloroplasty mikroalgi *Chlamydomonas reinhardtii* są zdolne do odtworzenia białek wirusowych. Daje to możliwość wytworzenia szczepionek np. na malarię czy wirusa brodawczaka ludzkiego. Potrzeba jednak dalszych badań, aby po zastosowaniu takich produktów uzyskać odpowiednią odpowiedź immunologiczną⁴². Natomiast β -glukan pozyskiwany z alg posiada zdolności immunostymulujące, ale również używany jest w leczeniu ran, prewencji hipercholesterolemii czy miażdżycy⁴³.

³⁸ European medicines agency, *Assessment report on Fucus vesiculosus L*, "Thallus", 2014.

³⁹ J. Keshri, M. Schwimmer, *Algae in Medicine*, The University of Burdwan 2012, s. 31-50.

⁴⁰ A. Kandale, M. Meda, P. Panda, A. K. Babu., *Marine algae: An Introduction, Food value and Medicinal uses*, „Journal of Pharmacy Research” 2011, vol. 4.1, s. 219-221.

⁴¹ Z. M. Jessop, Z. M. Jessop, J. Gibson, J. Y. Lim, T. H. Jovic, E. Combella, T. D. Dobbs, K. Carter, S. Hiles, S. Islam, B. Healy, I. Humphreys, R. Eccles, H. A. Hutchings, I. S. Whitaker, *A study protocol for a double-blind randomised placebo-controlled trial evaluating the efficacy of carrageenan nasal and throat spray for COVID-19 prophylaxis-ICE-COVID*, „Trials” 2022, vol. 23, 1.782.

⁴² M. G. Jiji, M. A. Ninan, V. P. Thomas, *Edible microalgae: potential candidate for developing edible vaccines*, „Vegetos” 2023, 1-6.

⁴³ J. Keshri, M. Schwimmer, dz. cyt.

Zastosowanie alg w kosmetologii

Coraz większe zainteresowanie produktami ekologicznymi w przemyśle kosmetycznym otworzyło drogę dla alg jako składników produktów kosmetycznych. Algi wykazują działanie pielęgnacyjne na skórę, co znajduje potwierdzenie w wynikach badań ich aktywności biologicznej. W kosmetykach algi wykazują działanie przeciwzapalne oraz antyoksydacyjne⁴⁴. Algi ze względu na zawartość naturalnych filtrów UV, są również dobrym zamiennikiem chemicznych filtrów w prewencji oparzeń słonecznych oraz fotostarzenia skóry. Przykładem substancji o działaniu fotoprotekcyjnym jest floroglucynol pozyskiwany z *Eisenia bicyclis*⁴⁵ i ekstrakt z *Phaeodactylum tricornutum*⁴⁶. Aminokwasy mykosporynopodobne to wytwarzane przez algi mikrobiologiczne filtry przeciwsłoneczne, które są zdolne do silnej absorpcji promieniowania UV-A⁴⁷. Ekstrakt z należącego do krasnorostów *Asparagopsis armata* (ASPARAGE™) stanowi składnik balsamów o właściwościach przeciwstarzeniowych⁴⁸. Natomiast scytonemina to wytwarzana w niektórych sinicach związek o właściwościach filtra UV i przeciwutleniacza, która ma wartość komercyjną w kosmetyce i medycynie⁴⁹. Wyciągi z różnych grup glonów korzystnie wpływają na kolor skóry, eliminując przebarwienia i redukując zaczerwienienia (np. ekstrakt z *Nannochloropsis oculata*)⁵⁰. Polisacharydy zawarte w algach pomagają utrzymać skórę w dobrej kondycji, wspomagają uzyskanie odpowiedniego nawilżenia skóry oraz zapobiegają jej starzeniu się (efekt *anti-aging*)⁵¹. Mikroalgi, spirulina oraz chlorella dodawane są do szamponów, mydeł oraz kremów ze względu na działanie nawadniające skórę i włosy, wygładzając je oraz nadając im połysk⁵². Ponadto związek typu monoterpenów: występujący powszechnie w algach brunatnych (*Sargassum crassifolium* i *Padina tetrastroma-*

⁴⁴ M. Ariede, T. Candido, A. Morocho-Jácome, M. Velasco, J. C. Carvalho, A. Baby, dz. cyt.

⁴⁵ G. P. Rosa, W. R. Tavares, P. M. Sousa, A. K. Pagès, A. M. L. Seca, D. C. G. A. Pinto, dz. cyt.

⁴⁶ I. Priyadarshani, B. Rath, *Commercial and industrial applications of micro algae – A review*, „J. Algal Biomass Utiln” 2012, vol. 3.4, s. 89-100.

⁴⁷ S. Raj, A. M. Kuniyil, A. Sreenikethanam, P. Gugulothu, R. B. Jeyakumar, A. K. Bajhaiya, *Microalgae as a Source of Mycosporine-like Amino Acids (MAAs); Advances and Future Prospects*, „Int. J. Environ. Res. Public Health” 2021, nr 18, 12402.

⁴⁸ A. Leandro, L. Pereira, A. M. M. Gonçalves, *Diverse Applications of Marine Macroalgae*, „Mar. Drugs” 2020, vol. 18.17.

⁴⁹ X. Gao, X. Jing, X. Liu, P. Lindblad, *Biotechnological Production of the Sunscreen Pigment Scytonemin in Cyanobacteria: Progress and Strategy*, „Mar. Drugs” 2021, vol. 19.2, 129.

⁵⁰ I. Priyadarshani, B. Rath, dz. cyt.

⁵¹ M. Yuan, J. Wang, L. Geng, N. Wu, Y. Yang, Q. Zhang, *A review: Structure, bioactivity and potential application of algal polysaccharides in skin aging care and therapy*, „International Journal of Biological Macromolecules” 2024, vol. 272, 132846.

⁵² I. Priyadarshani, B. Rath., dz. cyt.

tica) i algach czerwonych (*Corallina pilulifera*) poprawiał wzrost włosów poprzez aktywację sygnalizacji WNT (wingless-int) za pośrednictwem AKT⁵³.

Algi jako żywność funkcjonalna

Wysoka wartość odżywcza, duża zawartość związków mineralnych, a także obecność innych biologicznie aktywnych substancji, sprawia, że niektóre z gatunków alg mogą być zaliczone do tzw. żywności funkcjonalnej. Żywność funkcjonalna poza dostarczaniem składników odżywczych powinna wywierać korzystny wpływ na zdrowie człowieka lub nawet zmniejszać ryzyko rozwoju chorób cywilizacyjnych. Nieprzetworzona żywność pochodzenia naturalnego spełniająca kryteria żywności funkcjonalnej nazywana jest *super-foods*. Algi, które w definicję pojęcia żywności funkcjonalnej wpisują się bardzo dobrze to chlorella i spirulina. Zawierają związki o działaniu antyoksydacyjnym, wielonienasycone kwasy tłuszczowe, fitosterole, białka i wolne aminokwasy, a także witaminy: A, C, E, B₁, B₂, B₃, B₅, B₆, B₉ i B₁₂⁵⁴. Oba gatunki charakteryzują się wysoką zawartością chlorofilu, który posiada właściwości antyoksydacyjne, przeciwzapalne i hipolipemiczne⁵⁵. Ponadto działanie promujące zdrowie mogą wywierać też inne gatunki alg m.in. obniżając poziom cholesterolu i glukozy we krwi i zmniejszając tym samym ryzyko chorób sercowo-naczyniowych oraz cukrzycy⁵⁶.

Inne zastosowanie alg

Poza zastosowaniem alg w medycynie i kosmetologii są one wykorzystywane w innych gałęziach przemysłu. Agar pozyskiwany z krasnorostów stanowi ważny składnik podłoża do wzrostu drobnoustrojów wykorzystywany w mikrobiologii. Metabolity alg, w tym substancje o charakterze barwników mogą być dodawane do żywności jako pigmenty lub substancje poprawiające właściwości technologiczne czy zdrowotne. Natomiast agar i kwas alginowy używane są ze względu na swoje właściwości żelujące w przemyśle cukierniczym. Wiele produktów spożywczych dostępnych na półkach sklepowych zawiera karagen. Używany jest on do produkcji lodów, puddingów, żelek, nawet do produktów mięsnych ze względu na swoje działanie zagęszczające⁵⁷. Ciekawym zastosowaniem karagenu może

⁵³ Y. R. Lee, S. Bae, J. Y. Kim, J. Lee, D. H. Cho, H. S. Kim, I. S. An, S. An, *Monoterpenoid Loliolide Regulates Hair Follicle Inductivity of Human Dermal Papilla Cells by Activating the Akt/ β -Catenin Signaling Pathway*, „J. Microbiol. Biotechnol” 2019, vol. 29.11, 1830-1840.

⁵⁴ I. Priyadarshani, B. Rath, dz. cyt.

⁵⁵ Z. Chen, W. Wu, Y. Wen, *Recent advances of natural pigments from algae*, „Food Prod Process and Nutr 5” 2023, vol. 5.1, 39.

⁵⁶ R. E. Merchant, C. A. Andre, dz. cyt.

⁵⁷ S. Ścieszka, E. Klewicka *Algae in food – a general review*, „Critical Reviews in Food Science and Nutrition” 2018, vol. 59, s. 3538-3547.

okazać się możliwość jego zastosowania jako nano-biokompozyty, które z uwagi na zwiększoną stabilność, biodegradowalność i biokompatybilność, są obiecującą alternatywą dla zastosowań w dostarczaniu leków, gojeniu ran czy inżynierii tkankowej⁵⁸. Algi są również potencjalnym dodatkiem do wytwarzania biopaliw, ponieważ produkują długołańcuchowe węglowodory przydatne w produkcji olejów napędowych. Niektóre algi produkują też wodór, który zaczyna cieszyć się powodzeniem jako ekologiczna substancja energetyczna⁵⁹. Z uwagi na wysoką zawartość związków mineralnych w tym potasu i azotu, algi mają również znaczenie jako nawozy, które wspomagają wzrost roślin oraz zapobiegające chorobom ze względu na przeciwdrobnoustrojowe działanie⁶⁰. Wiadomo, że niektóre sinice (*Nostoc* i *Anabaena*), wiążą azot atmosferyczny. Ma to znaczenie dla poprawy żyzności gleby i jej właściwości fizykochemicznych⁶¹ i było wykorzystywane na polach ryżowych. Płynny nawóz z alg bogaty jest natomiast w regulatory wzrostu roślin m.in. auksyny, cytokininy i gibereliny⁶². Obecnie, ponieważ algi nie są używane jako nawóz przemysłowo⁶³, zastosowanie bionawozów z alg rozpatrywane jest w kategoriach nowoczesnych praktyk rolniczych jako alternatywa do szkodzących środowisku konwencjonalnych nawozów⁶⁴. Algi mogą również stanowić dodatek do paszy dla zwierząt. Pochodzący z alg β -glukan jest stosowany w paszach w hodowli trzody chlewnej. Prowadzone badania wykazały, że substancja ta może działać immunomodulująco w kierunku poprawy odporności na wirusy, przez co może przyczynić się do zmniejszenia zachorowalności świń⁶⁵.

Działania toksyczne alg

Niektóre gatunki alg, jak i pojedyncze, pozyskiwane z nich substancje mogą wywierać działanie toksyczne. Szczególną uwagę należy zwrócić na hepatotoksyczne, cytotoksyczne czy neurotoksyczne działanie toksyn alg powodujących zakwity

⁵⁸ J. James, *Nanotechnology-driven improvisation of red algae-derived carrageenan for industrial and bio-medical applications*, „World J. Microbiol. Biotechnol.” 2024, vol. 40.1, 4.

⁵⁹ A. Demirbas, *Use of algae as biofuel sources*, „Energy Conversion and Management” 2010, 51.12, s. 2738-2749.

⁶⁰ S. Ścieszka, dz. cyt.

⁶¹ F. Hussain, S. Z. Shah, H. Ahmad, S. A. Abubshait, H. A. Abubshait, A. Laref., M. Iqbal, *Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review*, „Renew. Sustain. Energy Rev.” 2021, 137, 110603.

⁶² S. B. Chuaychu, C. Sirisereewan, N. Techakriengkrai, P. Tummaruk, R. Thanawongnuwech, T. Nedumpun, *Enhancement of systemic virus-specific T lymphocyte responses in pigs supplemented with algae-derived β -glucan*, „The Veterinary Journal” 2024, 4.1, s. 564-574.

⁶³ L. Mau, J. Kant, R. Walker, C. M. Kuchendorf, S. D. Schrey, U. Roessner, M. Watt, dz. cyt.

⁶⁴ N. Choudhary, dz. cyt.

⁶⁵ S. B. Chuaychu, C. Sirisereewan, N. Techakriengkrai, P. Tummaruk, R. Thanawongnuwech, T. Nedumpun, dz. cyt.

wód⁶⁶. Jednym z gatunków powodującym zakwity wód jest mikroalga *Prymnesium parvum*⁶⁷. Produkowane przez nią toksyny podczas zakwitów wód są szkodliwe nie tylko dla środowiska wodnego, ale również dla zdrowia człowieka⁶⁸. Ponadto algi mogą wywoływać również alergię skórne. Ten typ działań niepożądanych ma znaczenie szczególnie przy zewnętrznym zastosowaniu produktów kosmetycznych zawierających wyciągi z glonów. Z kolei w przypadku doustnego przyjmowania produktów zawierających algi na liście działań niepożądanych mogą pojawić się objawy gorączkopodobne, zaparcia, biegunki, niestrawność, bóle brzucha, wymioty, zawroty głowy⁶⁹. Dużą barierą w stosowaniu alg jest również ich zapach oraz smak, próbuje się to zamaskować zamykając wyciągi suche w kapsułce.

Podsumowanie

Biorąc pod uwagę wyniki prowadzonych badań nad potencjałem biologicznym różnych typów alg i ich metabolitów, jak i doniesienia na temat możliwości ich wykorzystania w różnych gałęziach przemysłu, należy uznać, że te związane z wodnym środowiskiem organizmy są cennym źródłem substancji poprawiających zdrowie człowieka i zwierząt. Są także cennym materiałem do pozyskiwania ekologicznych biomateriałów (np. paliw i nawozów). Co ważne, możliwość szybkiego namnażania niektórych typów alg sprawia, że jest to produkt naturalny łatwy do wytworzenia, co zwiększa możliwość swobodnego jego wykorzystania. Dzięki tym walorom algi mogą stać się źródłem nowatorskich rozwiązań, które zrewolucjonizują różne gałęzie gospodarki i zmniejszą negatywne oddziaływanie człowieka na środowisko naturalne

References

Bibliografia

Ariede M., Candido T., Morocho-Jácome A., Velasco M., Carvalho J. C. Baby A., *Cosmetic attributes of algae - A review*, „Algal Research” 2018, vol. 25, s. 483-487.

⁶⁶ H. Dong, M. T. Aziz, S. D. Richardson, *Transformation of Algal Toxins during the Oxidation/Disinfection Processes of Drinking Water: From Structure to Toxicity*, „Environmental science & technology” 2023, vol. 57.35, s. 12944-12957.

⁶⁷ B. A. Wagstaff, *Insights into toxic Prymnesium parvum blooms: the role of sugars and algal viruses*, „Biochemical Society transactions”, 2018.

⁶⁸ H. Dong, M. T. Aziz, S. D. Richardson, dz. cyt.

⁶⁹ S. Vitale, N. R. Miller, L. J. Mejico, J. D. Perry, M. Medura, S. K. Freitag, C. Girkin, *A randomized, placebo-controlled, crossover clinical trial of super blue-green algae in patients with essential blepharospasm or Meige syndrome*, „American journal of ophthalmology” 2004, vol. 138, s. 18-32.

- Bahari A., Moelants K., Wallecan J., Mangiante G., Mazoyer J., Hendrickx M., Grauwet T., *Understanding the effect of time, temperature and salts on carrageenan extraction from Chondrus crispus*, „Algal Research” 2021, vol. 58, s. 1-16.
- Butterfield N. J., *Bangiomorpha pubescens n. gen., n. sp.: implications for the evolution of sex, multicellularity, and the Mesoproterozoic/Neoproterozoic radiation of eukaryotes*, „Paleobiology” 2000, vol. 26.3, s. 386-404.
- Cheah W. Y., Er A. C., Aiyub K., Yasin N. H. M., Ngan S. L., Chew K. W., ... Show P. L. *Current status and perspectives of algae-based bioplastics: A reviewed potential for sustainability*, „Algal Research”, 71, (2023), 103078 .
- Chen Z., Wu W., Wen Y., *Recent advances of natural pigments from algae*, „Food Prod Process and Nutr 5” 2023, vol. 5.1, 39.
- Choudhary N., Tripathi A., Singh P. K., Parikh H. S., Tiwari A., *Application of algae for enhanced plant growth and food productivity*, „Syst Microbiol and Biomanuf” 2024, 4.1, s. 564-574.
- Chuaychu S. B., Sirisereewan C., Techakriengkrai N., Tummaruk P., Thanawongnuwech R., Nedumpun T. *Enhancement of systemic virus-specific T lymphocyte responses in pigs supplemented with algae-derived β -glucan*, „The Veterinary Journal” 2024, 106182.
- Demirbas A., *Use of algae as biofuel sources*, „Energy Conversion and Management” 2010, 51.12, s. 2738-2749.
- Dong H., Aziz M. T., Richardson S. D. *Transformation of Algal Toxins during the Oxidation/Disinfection Processes of Drinking Water: From Structure to Toxicity*, „Environmental science & technology” 2023, vol. 57.35, s. 12944-12957.
- Durrett T. P., Welti R., *The tail of chlorophyll: Fates for phytol*, „The Journal of biological chemistry” 2021, vol. 269.
- El-Beltagi H. S., Mohamed A. A., Mohamed H. I., Ramadan K. M. A., Barqawi A. A., Mansour A. T., *Phytochemical and Potential Properties of Seaweeds and Their Recent Applications: A Review*, „Mar. Drugs” 2022, vol. 20.6, 2022, 342, s. 1-49.
- El Gamal, Ali A., *Biological Importance of Marine Algae*, “Saudi Pharmaceutical Journal” 2010, vol. 18.1, s. 1-25.
- Espinosa-Ramírez J., Mondragón-Portocarrero A. C., Rodríguez J. A., Lorenzo J. M., Santos E. M. *Algae as a potential source of protein meat alternatives*, „Front. Nutr.”, nr 10, (2023), 1254300.
- European medicines agency, *Assessment report on Fucus vesiculosus L.*, “Thallus”, 2014.
- Gao X., Jing X., Liu X., Lindblad P., *Biotechnological Production of the Sunscreen Pigment Scytonemin in Cyanobacteria: Progress and Strategy*, „Mar. Drugs” 2021, vol. 19.2, 129.
- Garcia-Perez P., Lourenço-Lopes C., Silva A., Pereira A. G., Fraga-Corral M., Zhao C., Xiao J., Simal-Gandara J., Prieto M. A., *Pigment Composition of Nine Brown Algae from the Iberian Northwestern Coastline: Influence of the Extraction Solvent*, „Marine drugs” 2022, vol. 20.2, 1-17.
- Genazzani A. D., Chierchia E., Lanzoni C., Santagni S., Veltri F., Ricchieri F., Rattighieri E., Nappi R. E., *Effetti degli estratti di Alga Klamath sul tono dell'umore e la depressione in menopausa: studio pilota [Effects of Klamath Algae extract on psychological disorders and depression in menopausal women: a pilot study]*, „Minerva ginecologica” 2010, vol. 62 (5): 381-88.
- Guiry M. D., *How many species of algae are there?*, „Journal of phycology” 2012, vol. 48, s. 1057-1063.
- van der Heijden I., West S., Monteyne A. J., Finnigan T. J. A., Abdelrahman D. R., Murton A. J., Stephens F. B., Wall B. T., *Algae Ingestion Increases Resting and Exercised Myofibrillar Protein Synthesis Rates to a Similar Extent as Mycoprotein in Young Adults*, „The Journal of nutrition” 2023, vol. 153.12, s. 3406-3417.
- Hussain F., Shah S. Z., Ahmad H., Abubshait S. A., Abubshait H. A., Laref A., ... Iqbal, M., *Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review*, „Renew. Sustain. Energy Rev.” 2021, 137, 110603.

- Imbs T., Zvyagintseva T., *Phlorotannins are Polyphenolic Metabolites of Brown Algae*, „Russian Journal of Marine Biology” 2018, nr 44, s. 263-273.
- Jabłońska-Trypuć A., *Algae as Crop Plants Being a Source of Bioactive Ingredients of Pharmaceutical and Dietary Importance*, „Agronomy”, 14.5, 2024, s. 895.
- James J., *Nanotechnology-driven improvisation of red algae-derived carrageenan for industrial and bio-medical applications*, „World J. Microbiol. Biotechnol.” 2024, vol. 40.1, 4.
- Jessop Z. M., Gibson J., Lim J. Y., Jovic T. H., Combella E., Dobbs T. D., Carter K., Hiles, S., Islam S., Healy B., Humphreys I., Eccles R., Hutchings H. A., Whitaker I. S., *A study protocol for a double-blind randomised placebo-controlled trial evaluating the efficacy of carrageenan nasal and throat spray for COVID-19 prophylaxis-ICE-COVID*, „Trials” 2022, vol. 23, 1.782.
- Jiji M. G., Ninan M. A., Thomas V. P., *Edible microalgae: potential candidate for developing edible vaccines*, „Vegetos”, 2023, 1-6.
- Kandale A., Meda M., Panda P., Babu A. K., *Marine algae: An Introduction, Food value and Medicinal uses*, „Journal of Pharmacy Research” 2011, vol. 4.1, s. 219-221.
- Karako S., Stambler N., Dubinsky, Z., *The Taxonomy and Evolution of the Zooxanthellae-Coral Symbiosis*, 2004, s. 539-557. *The Taxonomy and Evolution of the Zooxanthellae-Coral Symbiosis*, “Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology Symbiosis” January 2004, s. 539-557
- Keshri J., Schwimmer, M., *Algae in Medicine*, „The University of Burdwan”, (2012), s. 31-50.
- Leandro A., Pereira L., Gonçalves A.M.M. *Diverse Applications of Marine Macroalgae*, „Mar. Drugs” 2020, vol. 18.17.
- Lee Y. R., Bae S., Kim J. Y., Lee J., Cho D. H., Kim H. S., An I. S., An S., *Monoterpenoid Loliolide Regulates Hair Follicle Inductivity of Human Dermal Papilla Cells by Activating the Akt/ β -Catenin Signaling Pathway*, „J. Microbiol. Biotechnol” 2019, vol. 29.11, 1830-1840.
- Liu L., Heinrich M., Myers S., Dworjanyn S. A., *Towards a better understanding of medicinal uses of the brown seaweed Sargassum in Traditional Chinese Medicine: A phytochemical and pharmacological review*, „Journal of Ethnopharmacology”, 142.3, 2012, s. 591-619.
- Martins T., Barros A. N., Rosa E., Antunes L., *Enhancing Health Benefits through Chlorophylls and Chlorophyll-Rich Agro-Food: A Comprehensive Review*, „Molecules” 2023, vol. 28.14, s. 1-21.
- Maruyama S., Eunsoo K., *A modern descendant of early green algal phagotrophs*, „Current biology: CB” 2013, vol. 23.12, s. 1081-1084.
- Mehdizadeh A. M., Peerhossaini H., *Cyanobacteria: Model Microorganisms and Beyond*, „Microorganisms” 2022, vol. 10.694, s. 1-17.
- Merchant R. E., Andre C. A., *A review of recent clinical trials of the nutritional supplement Chlorella pyrenoidosa in the treatment of fibromyalgia, hypertension, and ulcerative colitis*, „Altern Ther Health Med” 2001, vol. 7.3, s. 79-92.
- Mau L., Kant J., Walker R., Kuchendorf C. M., Schrey S. D., Roessner U., Watt M., *Wheat Can Access Phosphorus From Algal Biomass as Quickly and Continuously as From Mineral Fertilizer*. „Frontiers in plant science” 2021, vol. 12, 631314.
- Misurcova L., *Chemical Composition of Seaweeds*, w: *Handbook of Marine Macroalgae: Biotechnology and Applied Phycology*, First Edition. Edited by Se-Kwon Kim 2012, s. 172-192.
- Mohsenpour S. F., Richards B., Willoughby N., *Spectral conversion of light for enhanced microalgae growth rates and photosynthetic pigment production*, „Bioresource technology” 2012, nr 125, s. 75-81.
- Oben J., Enonchong E., Kuate D., Mbanya D., Thomas T. C., Hildreth D. J., Ingolia T. D., Tempesta M. S., *The effects of ProAlgaZyme novel algae infusion on metabolic syndrome and markers of cardiovascular health*, „Lipids in health and disease” 2007, vol. 6.20, s. 1-9.

- Perdana B. A., Chaidir Z., Kusnanda A. J., Dharma A., Zakaria I. J., Syafrizayanti, Bayu A., Putra M. Y., *Omega-3 fatty acids of microalgae as a food supplement: A review of exogenous factors for production enhancement*, „Algal Research” 2021, vol. 60, 102542.
- Raj S., Kuniyil A. M., Sreenikethanam A., Gugulothu P., Jeyakumar R. B., Bajhaiya A. K., *Microalgae as a Source of Mycosporine-like Amino Acids (MAAs); Advances and Future Prospects*, „Int. J. Environ. Res. Public Health” 2021, nr 18, 12402.
- Priyadarshani I., Rath B., *Commercial and industrial applications of micro algae – A review*, „J. Algal Biomass Utln” 2012, vol. 3.4, s. 89-100.
- Rosa G. P., Tavares W. R., Sousa P. M. C., Pagès A. K., Seca A. M.L., Pinto D. C. G. A., *Seaweed Secondary Metabolites with Beneficial Health Effects: An Overview of Successes in In Vivo Studies and Clinical Trials*, „Mar Drugs” 2019, vol. 18.1, s. 1-32.
- Shatalebi M. A., Bokaie Jazi S., Yegdaneh A., Iraj F., Siadat A. H., Noorshargh, P., *Comparative evaluation of Gracilaria algae 3% cream vs Clobetasol 0.05% cream in treatment of plaque type psoriasis: A randomized, split-body, triple-blinded clinical trial*, „Dermatologic therapy” 2020, vol. 33, e14317.
- Spribile T., Resl P., Stanton D. E., Tagirdzhanova G. *Evolutionary biology of lichen symbioses*, „The New phytologist” 2022, vol. 234, 5, s. 1566-1582.
- Ścieszka S., Klewicka E., *Algae in food – a general review*, „Critical Reviews in Food Science and Nutrition” 2018, vol. 59, s. 3538-3547.
- Vitale S., Miller N. R., Mejico L. J., Perry J. D., Medura M., Freitag S. K., Girkin, C. *A randomized, placebo-controlled, crossover clinical trial of super blue-green algae in patients with essential blepharospasm or Meige syndrome*, „American journal of ophthalmology” 2004, vol. 138, s. 18-32.
- Wang X., Linwen H., Yingchao Y., Huan L., Wang Y., Xia B., Wang G., *Economically important red algae resources along the Chinese coast: History, status, and prospects for their utilization*, „Algal Research” 2020, vol. 46, 101817.
- Yuan M., Wang J., Geng L., Wu N., Yang Y., Zhang Q. *A review: Structure, bioactivity and potential application of algal polysaccharides in skin aging care and therapy*, „International Journal of Biological Macromolecules” 2024, vol. 272, 132846.