

Primjena mikroalgi u prehrambenoj industriji i proizvodnji nutraceutika

Jelušić, Katarina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:226:826034>

Rights / Prava: [Attribution-NoDerivatives 4.0 International](#)/[Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Marine Studies](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA
PREDDIPLOMSKI STUDIJ BIOLOGIJA I TEHNOLOGIJA MORA

Katarina Jelušić

PRIMJENA MIKROALGI U PREHRAMBENOJ
INDUSTRIJI I PROIZVODNJI NUTRACEUTIKA

Završni rad

Split, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA
PREDDIPLOMSKI STUDIJ BIOLOGIJA I TEHNOLOGIJA MORA

**PRIMJENA MIKROALGI U PREHRAMBENOJ
INDUSTRIJI I PROIZVODNJI NUTRACEUTIKA**

Završni rad

Predmet: Očuvanje i prerada proizvoda mora II

Mentor:

prof. dr. sc. Vida Šimat

Student:

Katarina Jelušić

Split, rujan 2023.

Zahvale

Htjela bih se zahvaliti mentorici prof. dr. sc. Vidi Šimat za sav trud, strpljenje i vodstvo koje mi je iskazala tokom pisanja ovog rada. Zahvalila bih se i Roberti Frleti Matas, mag. ing. agr. za izdvojeno vrijeme i trud te pomoć u oblikovanju rada. Teško bih uspjela bez vas, hvala vam!

Sveučilište u Splitu
Sveučilišni odjel za studije mora
Preddiplomski studij Biologija i tehnologija mora

Završni rad

PRIMJENA MIKROALGI U PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI I PROIZVODNJI NUTRACEUTIKA

Katarina Jelušić

Sažetak

U ovom radu dan je pregled primjene mikroalgi u prehrambenoj industriji i proizvodnji nutraceutika. Mikroalge su mikroskopski fotosintetski organizmi koji se mogu uzgajati u otvorenim ili zatvorenim bioreaktorima. Zatvoreni su pogodniji jer štite uzgajani soj od varijabilnih atmosferskih prilika i kontaminacije. Za rast im je potrebno osigurati dovoljnu količinu svjetla i nutrijenata. Mikroalge obiluju velikom količinom visoko vrijednih spojeva kao što su proteini, masne kiseline, pigmenti, vitamini i minerali zbog čega su sve popularnije u prehrambenoj industriji. Njihova biomasa može se koristiti u proizvodnji gotovih proizvoda i za direktnu konzumaciju. Potrošači zapadnih zemalja nisu navikli na morski okus mikroalgi te ih preferiraju konzumirati kao dodatke prehrani koji se na tržište plasiraju u obliku kapsula, tableta, praha i sirupa. Visoko vrijedni spojevi, plasirani na tržište kao nutraceutici, preveniraju različite kronične bolesti te pomažu u njihovom liječenju. Mikroalge su manipulativni organizmi, koji mogu povećati proizvodnja željenog visoko vrijednog spoja promjenom uzgojnih uvjeta, što ih čini održivim resursom molekula koje doprinose zdravlju.

(18 stranica, 3 slike, 6 tablica, 23 literaturna navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Ključne riječi: mikroalge, prehrambena industrija, nutraceutici, visoko vrijedni spojevi

Mentor: prof. dr. sc. Vida Šimat

Ocjenjivači: 1. Izv. prof. dr. sc. Vedran Poljak
2. Prof. dr. sc. Vida Šimat
3. Izv. prof. dr. sc. Danijela Skroza

University of Split
Department of Marine Studies
Undergraduate study Marine Biology and Technology

BSc Thesis

**PRIMJENA MIKROALGI U PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI I PROIZVODNJI
NUTRACEUTIKA**

Katarina Jelušić

Abstract

This paper gives an overview of the application of microalgae in the food industry and in the production of nutraceuticals. Microalgae are microscopic photosynthetic organisms that can be grown in open or closed bioreactors. Closed systems is more suitable because it protects the cultivated strains from variable weather conditions and contamination. In order to grow, they need to be provided with sufficient light and nutrients. Microalgae are rich in high-value compounds such as proteins, fatty acids, pigments, vitamins and minerals, which makes them increasing for food industry. Their biomass can be used for the production of ready-to-eat products and for direct consumption. Consumers in western countries are not used to the taste of algae and prefer to consume them as a food supplements, marketed in the form of capsules, tablets, powders and syrups. High-value compounds, marketed as nutraceuticals prevent and help treat various chronic diseases. Microalgae are manipulative organisms, which can increase the production of the desired high-value compound by changing the growth conditions, making them a new sustainable resource of health molecules.

(18 pages, 3 figures, 6 tables, 23 references, original in: Croatian)

Keywords: microalgae, food industry, nutraceuticals, high-value compounds

Supervisor: Vida Šimat PhD/Full professor

Reviewers:

1. Vedran Poljak, PhD / Associate Professor
2. Vida Šimat, PhD / Full Professor
3. Danijela Skroza, PhD / Associate Professor

SADRŽAJ:

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. RAZRADA TEME | 3 |
| 2.1. Uzgojni sustavi..... | 3 |
| 2.1.1. Otvoreni sustav | 3 |
| 2.1.2. Zatvoreni sustav | 4 |
| 2.2. Uvjeti rasta | 5 |
| 2.3. Visoko vrijedni spojevi | 6 |
| 2.3.1. Proteini | 8 |
| 2.3.2. Masne kiseline | 8 |
| 2.3.3. Pigmenti..... | 10 |
| 2.4. Komercijalno važne vrste..... | 11 |
| 2.5. Primjena mikroalgi u prehrambenoj industriji | 12 |
| 2.6. Mikroalge kao dodaci prehrani i nutraceutici | 14 |
| 3. ZAKLJUČCI..... | 16 |
| 4. LITERATURA | 17 |

1. UVOD

Mikroalge su mikroskopski organizmi koji su se na Zemlji pojavili prije više od dvije milijarde godina (Bosak, 2017). Većina mikroalgi su autotrofi, organizmi koji sami proizvode složene organske spojeve (proteini, ugljikohidrati i masti) iz jednostavnih spojeva prisutnih u okolini. Mikroalge su poglavito fotoautotrofi, koriste sunčevu svjetlost kao izvor energije. Iako se većina razvila kao autotrofni organizam, postoje i heterotrofne kao i miksotrofne mikroalge. Heterotrofne trebaju organski izvor ugljika za rast, dok miksotrofne mogu provoditi fotosintezu ili uzimati organski ugljik iz okoline za rast ovisno o uvjetima u okolišu (Enzing i sur., 2014). Godišnja primarna produkcija mikroalgi procjenjuje se na 10^{11} tona suhe tvari a također su odgovorene i za proizvodnju 50% kisika na Zemlji (Muller-Feuga, 2013).

Obzirom na staničnu građu i fiziologiju mikroalge se dijele na dvije skupine: prokariotske cijanobakterije i eukariotske mikroalge (Bosak, 2017). Cijanobakterije ili modrozeleno alge su prokariotski organizmi široke rasprostranjenosti, a nastanjuju slatku vodu, vlažno tlo, drveće i more (Hrvatska enciklopedija, 2021). Najpoznatije modrozeleno alge su *Arthrospira platensis* i *Arthrospira maxima*, popularno zvane *Spirulina* (Kratzer i Murkovic, 2021), koje se već dugi niz godina uzgajaju za potrebe prehrambene industrije. Eukariotske mikroalge nastanjuju vrlo različita staništa i objedinjuju mnogo skupina algi: zeleni bičaši (*Euglenophyta*), svjetleći bičaši (*Dinoflagellata*), zlatnožute alge (*Chrysophyta*), dijatomeje (*Diatomeae*), zelene alge (*Chlorophyta*), smeđe alge (*Phaeophyta*) i crvene alge (*Rhodophyta*) (Hrvatska enciklopedija, 2021). Najuzgajanije vrste u prehrambenoj industriji su *Chlorella vulgaris* koja se koristi za proizvodnju prehrambenih dodataka, *Dunaliella salina* za proizvodnju β -karotena i *Haematococcus pluvialis* za proizvodnju astaksantina (Kratzer i Murkovic, 2021).

Potencijal mikroalgi krije se u njihovom kemijskom sastavu. Ovisno o vrsti, mikroalge obiluju visoko vrijednim i bioaktivnim spojevima kao što su lipidi, proteini, ugljikohidrati, pigmenti, minerali i vitamini. Ovi spojevi važni su za zdravu i uravnoteženu prehranu te zdravlje čovjeka. Mikroalge sadrže puno esencijalnih masnih kiselina i spojeva koje ljudsko tijelo ne može samo sintetizirati te ih je potrebno unositi prehranom. Zbog jednostavne stanične strukture i uzgoja u vodenom mediju, mikroalge imaju sposobnost brže konverzije sunčeve energije u biomasu u odnosu na kopnene biljake (Chacon-Lee i González-Marino, 2010). Osim prehrambene industrije, kozmetička i farmaceutska industrija koriste bioaktivne tvari i

kemijske spojeve u razvoju novih proizvoda a također je poznata i mogućnost korištenja mikoalgalnih lipida u proizvodnji biodizela (Bosak, 2017).

Alge se u prehrani koriste od davnih vremena, pogotovo u azijskim zemljama. Istraživanja o primjeni mikroalgi u prehrambenoj industriji znatno su porasla posljednjih pedesetih godina prošlog stoljeća kad je počela intenzivna potraga za novim sirovinama kako bi se zadovoljile potrebe sve brojnijeg stanovništva. Od uzgojenih mikroorganizama dobiva se sušena ili dehidrirana biomasa koja se može koristiti u proizvodnji gotovih proizvoda ili za obogaćivanje prehrambenih proizvoda niske prehrambene vrijednosti (Benavente-Valdés i sur., 2021). Posebno se izdvajaju visoko vrijedni spojevi kao što su pigmenti i visokovrijedne omega-3 i omega-6 nezasićene masne kiseline za proizvodnju nutraceutika (Kratzer i Murkovic, 2021). Nutraceutici se definiraju kao hrana ili dio hrane koji uz nutritivnu vrijednost predstavlja izvor molekula ili tvari koji pružaju brojne zdravstvene dobrobiti. Koristite se za obogaćivanje hrane visoko vrijednim spojevima te kao lijekovi ili dodaci prehrani (Šimat, 2021). Dodaci prehrani na tržište se plasiraju u obliku paste, praha, tableta i kapsula (Kratzer i Murkovic, 2021). Pigmenti se koriste kao bojila za hranu poput fikocijanina dobivenog iz modrozelenih algi, koji sekoristi za bojanje plavih slatkiša kao što su M&M plavi bombon (Bosak, 2017).

U ovom radu opisani su različiti uzgojni sustavi i najčešći tehnološki problemi u komecijalnoj proizvodnji mikroalgi. Također, dan je pregled najzastupljenijih skupina visoko vrijednih spojeva koji pronalaze primjenu u prehrambenoj industriji i proizvodnji nutraceutika.

2. RAZRADA TEME

2.1. Uzgojni sustavi

2.1.1. Otvoreni sustavi

Popularni sustavi za uzgoj mikroalgi su bioreaktori otvorenog tipa (Slika 1.), tzv. „raceway ponds“. To su betonski ili plastični bazeni dubine do 30 cm kojima cirkulira vodeni medij s mikroalgama koji se cijelo vrijeme miješa sa automatiziranim lopaticama (Enzing i sur., 2014). Prednost otvorenog sustava je niska potražnja za energijom, mali operativni troškovi i mali početni kapital (Kratzer i Murkovic, 2021). Međutim, otvoreni sustav ima i svoje mane poput nemogućnosti kontrole uzgojnih parametra. Zbog direktnog kontakta s atmosferom, uzgojni medij je izložen kontaminaciji i zagađenju, isušivanju ili prekomjernom razrjeđenju zbog padalina (Bosak, 2017). Kako je uzgoj podređen vanjskim vremenskim uvjetima, prirast biomase je poprilično nizak, otprilike 0,1 do 25 g/m² na dan (Kratzer i Murkovic, 2021). Nekoliko vrsta ipak uspješno raste u otvorenim bioreaktorima jer se uzgajaju u selektivnim uvjetima. Takvi uvjeti dovode do odabranog ekstrema koji je pogodan za rast samo određene vrste dok se inihira rast ostalih sojeva i potencijalnih patogena. Tako se za uzgoj vrste *Dunalliella salina* koristi medij velikog saliniteta, a za uzgoj *Spirulina platensis* bazični medij (Enzing i sur., 2014).



Slika 1. Različiti tipovi bioreaktora otvorenog tipa za uzgoj mikroalgi: „raceway pond“ (A), kružni bazen (B) i bazen bez miješalice (C) (izvor: Shen i sur., 2009).

2.1.2. Zatvoreni sustavi

Zatvoreni bioreaktori ili fotobioreaktori sastoje se od prozirnih plastičnih cijevi ili vreća postavljenih horizontalno ili vertikalno (Slika 2.) u kojima se nalaze mikroalge suspendirane u vodenom mediju (Bosak, 2017). Zatvoreni sustav omogućava kontrolu svih parametara čime se optimizira rast mikroalgi što rezultira većim prirastom biomase (Kratzer i Murkovic, 2021). Prednosti fotobioreaktora u odnosu na otvoreni sustava uzgoja su mogućnost uzgoja vrsta koje ne uspijevaju u otvorenom sustavu, prevencija ili minimalizacija kontaminacije i zagađenja, kontrola uzgojnih parametara (temperatura, pH, nutrijenti, količina kisika i CO₂), prevencija evaporacije i veća gustoća stanica po m². Unatoč navedenim prednostima, glavna mana ovih sustava je zahtijev za velikim početnim kapitalom te visoke cijene održavanja sustava (Enzing i sur., 2014). Tablica 1. prikazuje usporedbu nekih karakteristika otvorenog i zatvorenog uzgojnog sustava.



Slika 2. Tubularni fotobioreaktor korišten u komercionalnoj proizvodnji mikroalge *Nannochloropsis sp.* (izvor: www.allmicroalgae.com).

Tablica 1. Usporedni prikaz otvorenog i zatvorenog uzgojnog sustava (izvor: Kratzer i Murkovic, 2021.).

| Parametar | Otvoreni | Zatvoreni |
|-------------------------------|----------|-----------|
| Miješanje | Loše | Dobro |
| Osvjetljenje | Loše | Dobro |
| Sterilnost | Ne | Da |
| Kapital i operativni troškovi | Nizak | Visoki |

2.2. Uvjeti rasta mikroalgi

Parametri uzgoja mikroalgi ovise o vrsti koja se uzgaja. Za uspješno povećanje biomase nužno je osigurati optimalne uvjete rasta (Tablica 2.). Fotoautotrofnim vrstama potrebno je osigurati dovoljnu količinu svjetla i otopljene nutrijente u vodenom mediju kako bi mogli provoditi fotosintezu. Parametri osvjetljenja su fotoperiod, spektar svjetla i intenzitet svjetla. Svaka vrsta ima svoje potrebe po pitanju osvjetljenja te pretjerano izlaganje svjetlu može dovesti do oštećenja fotoreceptora i smrti stanice. Povećanje sinteze pigmenata za sakupljanje svjetla kao što su klorofil, određeni karoteni i fikobilin moguće je inicirati izlaganjem slabijem osvjetljenju. S druge strane, za povećanu sintezu zaštitnih pigmenata astaksantina, β -karotena i drugih karotenoida, mikroalge se izlažu u stresnom okruženju (preveliko zasićenje svjetlom, visoke koncentracije soli ili ograničenost dušikom) (Kratzer i Murkovic, 2021).

Tablica 2. Opći parametri za uzgoj algi (izvor: FAO, 2013.).

| Parametar | Raspon | Optimum |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|
| Temperatura (°C) | 16-27 | 18-24 |
| Salinitet (g/L) | 12-40 | 20-24 |
| Intenzitet svjetla (mmol/m ² /s) | 15-135 (ovisi o volumenu i gustoći) | 40-70 |
| Fotoperiod (svjetlo:tama, sati) | | 16:8 (minimum), 24:0 (maksimum) |
| pH | 7-9 | 8,2-8,7 |

Uzgojni medij sadrži makronutrijente i mikronutrijente. Pod makronutrijente se ubrajaju ugljik, dušik, fosfor i silicij. Silicij je potreban isključivo dijatomejama za izgradnju frustule (Sunda i sur., 2005). Ugljik dolazi u obliku CO₂ i HCO₃⁻, ovisno o količini otopljenog ugljika u vodenom mediju mijenja se i njezin pH. Dušik se nalazi u obliku nitrata (NO₃⁻) i amonijaka (NH₄⁺). Kada je dušik ograničavajući čimbenik zabilježena je diskoloracija mikroalgi te veća biosinteza i nakupljanje lipida u stanicama mikroalgi. Nedostatak fosfora u uzgojnim mediju uzrokuje degradaciju klorofila *a* ključnog za fotosintezu i povećano nakupljanje ugljikohidrata u stanicama (Hu, 2004). Za pravilan razvoj kulture mikroalgi, u vodenom mediju mora biti dovoljna količina otopljenih iona Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Cl⁻ i SO₄⁻ (Sunda i sur., 2005).

U mikronutrijente spadaju vitamini i elementi u tragovima. Vitamini nisu od esencijalne važnosti za rast mikroalgi, ali uzgojni mediji se svejedno obogaćuju vitaminima B12, B1 i

biotinom (B7). Elementi u tragovima su bakar, cink, kobalt, željezo, mangan, kadmij i nikal. Elementi u tragovima najčešće djeluju kao limitirajući čimbenik, a u velikim koncentracijama mogu biti toksični (Sunda i sur., 2005). Najvažniji element u tragovima je željezo jer sudjeluje u procesima fotosinteze, respiracije, fiksacije dušika i sinteze deoksiribonukleinske kiseline (DNK) (Hu, 2004).

Heterotrofne mikroalge nemaju potrebu za izvorom svjetla, ali im se mora osigurati dovoljna količina organskog ugljika. Kod uzgoja heterotrofnih vrsta moraju se osigurati sterilni uvjeti, u suprotnom dolazi do kompeticije drugih mikroorganizma s mikroalgama za izvor ugljika. Miksotrofne alge mogu rasti i u autotrofnim i u heterotrofnim uvjetima, a najviši prinos biomase imaju upravo u miksotrofnim uvjetima (Kratzer i Murkovic, 2021).

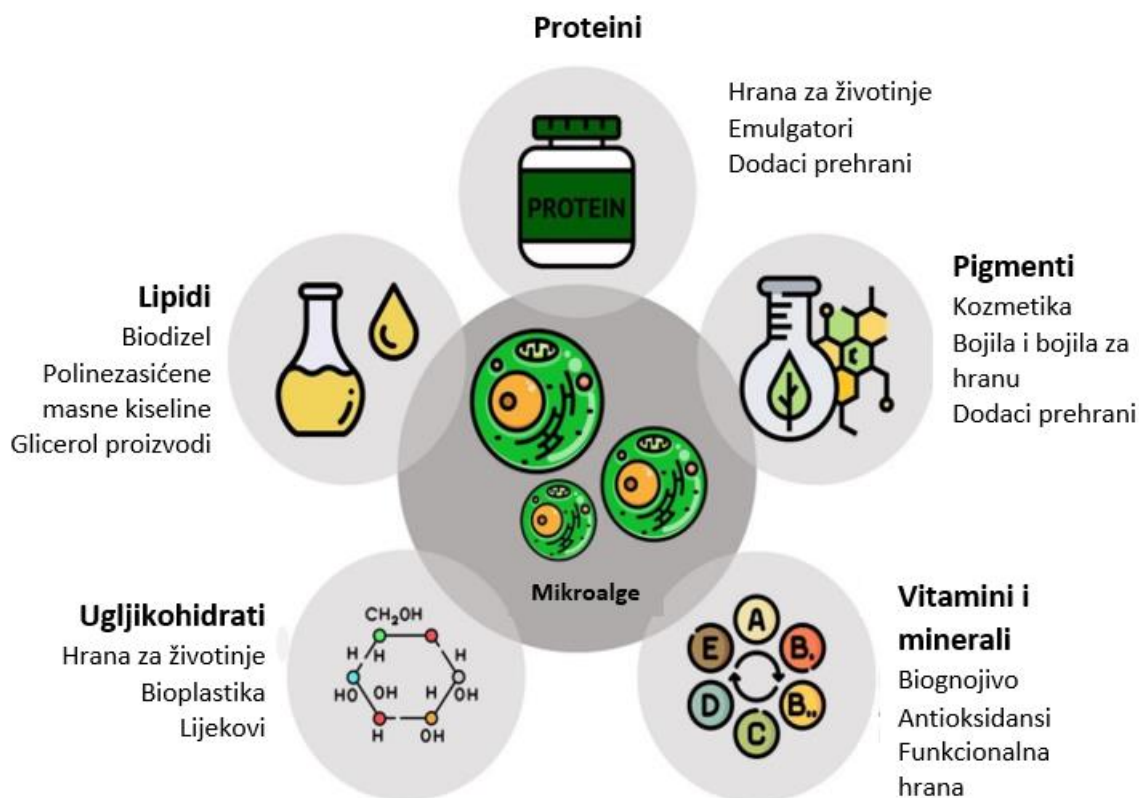
Radnja koja se mora konstantno provoditi za uspješni rast organizama je miješanje uzgojnog medija. Miješanje sprječava taloženje stanica, osigurava isti pH te jednoliku dostupnost nutrijenata, svjetlosti te CO₂ svim stanicama. Također, mješanjem se sprječava prezasićenost kisikom koji bi, ako pređe određenu granicu, mogao inhibirati fotosintezu. S druge strane, pretjerano ili prebrzo miješanje može oštetiti stanice te dovesti do njihove smrti (Enzing i sur., 2014).

Neželjena pojava u uzgoju mikroalgi je kontaminacija različitim organizmima koji se hrane mikroalgama ili pojava neželjene vrste alge koja može potisnuti uzgajanu vrstu u kompeticiji za nutrijente. Kontaminacija vodi uništenju uzgajane kulture, mogućoj pojavi toksina i gubitku željenog proizvoda. Najčešći organizmi koji napadaju kulture mikroalgi su larve insekata, protozoe, virusi, bakterije, gljivice i druge vrste algi. Fotobioreaktori su zaštićeni od kontaminacije, ali je kod otvorenih sustava ona neizbježna. Kako bi se kontaminacija suzbila, mikroalge se uzgajaju u selektivnim i ekstremnim uvjetima. Tako se *Arthrospira platensis* uzgaja u lužnatom mediju gdje vrijednosti pH dostižu vrijednosti i do 10,2, dok se *Dunaliella salina* uzgaja u izrazito slanom mediju. Ako mjere selektivnog okoliša nisu zaustavile kontaminaciju mora se pribjeći korištenju kemijskih sredstava, pesticida i herbicida (Kratzer i Murkovic, 2021).

2.3. Visoko vrijedni spojevi

Mikroalge sadrže obilje hranjivih tvari među kojima su proteini, lipidi, različiti pigmenti, ugljikohidrati, vitamini (A, B1, B2, C i E) i minerali (Fe, Mg, Ca ...) koje se mogu koristiti za različite primjene (Slika 3.). Među njima su biološki aktivne komponente pigmenti i omega-3 masne kiseline. Biološki aktivne komponente imaju antioksidativno, protuupalno,

antimikrobno i antitumorsko djelovanje. Navedeni spojevi važani su za uravnoteženu i zdravu prehranu te pridonose boljem općem zdravlju i pomaže u prevenciji brojnih bolesti (Benavente-Valdés i sur., 2021). Tablica 3. prikazuje usporedbu nutritivnih vrijednosti komercijalno važnih vrsta mikroalgi s konvencionalnim vrstama hrane.



Slika 3. Prikaz spojeva iz mikroalgi i njihova primjena (izvor: Machado i sur., 2022)

Tablica 3. Usporedba nutritivne vrijednosti hrane obogaćene mikroalgama i konvencionalne hrane (izraženo u % suhe tvari) (izvor: Chacon-Lee i González-Marino, 2010.).

| Vrsta | Proteini | Ugljikohidrati | Lipidi |
|--------------------------------|----------|----------------|--------|
| <i>Spirulina platensis</i> | 63 | 15 | 11 |
| <i>Arthrospira maxima</i> | 60-71 | 13-16 | 6-7 |
| <i>Chlorella vulgaris</i> | 51-58 | 12-17 | 14-22 |
| <i>Dunaliella salina</i> | 57 | 32 | 6 |
| <i>Haematococcus pluvialis</i> | 48 | 27 | 15 |

Konvencionalna hrana

| | | | |
|---------|----|----|----|
| Meso | 43 | 1 | 34 |
| Jaja | 47 | 4 | 41 |
| Mlijeko | 26 | 38 | 28 |
| Riža | 8 | 77 | 2 |
| Soja | 37 | 30 | 20 |

2.3.1. Proteini

Proteini su makromolekule važne za normalno funkcioniranje svake stanice. U organizmu sudjeluju u gotovo svim biokemijskim procesima te predstavljaju najvažniji gradivni materijali u organizmu, poglavito u izgradnji mišićnog tkiva (Anonimus 2015). Ljudski organizam ne može sintetizirati određene esencijalne aminokiseline stoga ih u organizam mora unositi putem hrane biljnog ili životinjskog porijekla (Hrvatska enciklopedija, 2021).

Mikroalge obiluju proteinima te bilježe veće udjele u odnosu na kopnene biljke kao što su kukuruz, soja ili pšenica (Kratzer i Murkovic, 2021). U usporedbi sastava aminokiselina i njihove nutritivne vrijednosti, proteini mikroalgi imaju znatno bolji aminokiselinski sastav u odnosu na proteine dobivene iz jaja ili ribe. Modifikacijom uzgojnih parametara i stvaranjem stresnih uvjeta može se povećati akumulacija proteina i do 45%. Ne smije se zanemariti ni činjenica da je za proizvodnju proteina mikroalgi (<2,5 m²/kg proteina) potrebno znatno manje zemlje nego što je potrebno za dobivanje proteina životinjskog porijekla (250 m²/kg proteina) (Benavente-Valdés i sur., 2021).

Arthrospira platensis sadrži između 50% do 70% proteina u suhoj biomasi, *H. pluvialis* između 45% do 50%, a *C. vulgaris* između 38% do 58% (Benavente-Valdés i sur., 2021). One su važan izvor proteina koji se mogu koristiti za proizvodnju bioaktivnih proteina koji svoju primjenu pronalaze i u kozmetičkoj industriji. Bioaktivni peptidi su sekvence između 2 i 30 aminokiselina neaktivnih u matičnom proteinu, a djeluju antihipertenzivno i antitirozinazno (Deniz i sur., 2017).

2.3.2. Masne kiseline

Masne kiseline spadaju u skupinu prirodnih lipida. Dijelev se na zasićene i nezasićene. Ovisno o broju dvostrukih veza nezasićene masne kiseline mogu biti jednostruko nezasićene ili višestruko nezasićene. Važan su izvor energije, sudjeluju u izgradnji i funkciji stanične membrane. Esencijalne masne kiseline spadaju u grupu višestruko nezasićenih masnih kiselina, a organizam ih ne može sam sintetizirati stoga ih je potrebno unositi hranom. Omega-3 i omega-6 masne kiseline imaju važne ulogu u sintezi hormona i izgradnja stanične membrane (Anonimus, 2023a).

Omega-3 masne kiseline, imaju niz pozitivnih učinaka na zdravlje poput smanjenja rizika od nastanka kardiovaskularnih bolesti. Nadalje, imaju protuupalno djelovanje što pomaže osobama oboljelim od Chronove bolesti, ekcema, artitisa pa čak i raka. Smatra se da imaju antikarcinogeno djelovanje jer se pravilnom prehranom i zdravim načinom života može spriječiti razvoj malignih tumora. Omega-3 masne kiseline pomažu u obnovi živčanog sustava a dokosaheksaenoična kiselina osobito je važna za pravilan razvoj živčanog sustava fetusa. Ove masne kiseline također doprinose normalnom funkcioniranju gastrointestinalnog i imunološkog sustava (Anonimus, 2023a).

Lipidi čine 1% do 40% staničnog sadržaja mikroalgi (Tablica 4.), a ovisno o uzgojnom procesu može se popeti i do 85% (Chacon-Lee i González-Marino, 2010). Najznačajnije kiseline u mikroalgama su višestruko nezasićene masne kiseline: eikosapentaenoična kiselina (EPA, ω -3), dokosaheksaenoična kiselina (DHA, ω -3), α -linolenska (ALA, ω -3), γ -linolenska kiselina (GLA, ω -6), arahidonska kiselina (ARA, ω -6), linolna kiselina (LA) i dokozapentaenoinska kiselina (DPA, ω -3) (Kratzer i Murkovic, 2021). Masne kiseline dobivene iz mikroalgi imaju veću koncentraciju nego masne kiseline dobivene iz ribljeg ulja, manju prisutnost kemijskih zagađivača kao i veću čistoću nakon ekstrakcije (Chacon-Lee i González-Marino, 2010).

Tablica 4. Postotni udio (%) polinezasićenih masnih kiselina u mikroalgama (izvor: Kratzer i Murkovic, 2021.).

| Vrsta | LA | ALA | GLA | ARA | EPA | DPA | DHA |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|
| <i>Chlorella vulgaris</i> | 3-10 | 2-21 | 15-24 | u tragovima | 3 | 3 | 21 |
| <i>Arthrospira platensis</i> | 10-21 | 1 | 1-25 | 0,3-0,4 | 2-3 | / | 3 |
| <i>Isochrysis galbana</i> | 1 | 0,5 | 0,5 | 1 | 2 | u tragovima | 19 |
| <i>Scenedesmus obliquus</i> | 1-2 | 4-22 | 0,1-4 | 0,1-0,2 | / | / | / |
| <i>Haematococcus pluvialis</i> | 4 | 15 | 0,1 | / | / | / | / |
| <i>Porphyridium cruentum</i> | 0,4-25 | / | / | 1-35 | 1-27 | / | 6,1 |
| <i>Nannochloropsis oceanica</i> | 0,6-0,8 | / | / | 1,4-1,9 | 8,4-11 | / | / |

LA: linolna kiselina, ALA: α -linolenska, GLA: γ -linolenska kiselina, ARA: arahidonska kiselina, EPA: eikosapentaenoična kiselina, DPA: dokozapentaenoinska kiselina, DHA: dokosaheksaenoična kiselina

2.3.3. Pigmenti

Najzastupljeniji pigmenti u mikroalgama su klofofil, karotenoidi i fikobilini te imaju značajnu ulogu u procesu fotosinteze, rastu mikroalgi i njihovom obojenju (Tablica 5.) (Benavente-Valdés i sur., 2021). Klorofil je pigment zelene boje koji se nalazi u kloroplastu te je nužan za proces fotosinteze (Hrvatska enciklopedija, 2021). Najčešće se primjenjuje kao bojilo za hranu (Benavente-Valdés i sur., 2021). Fikobilini su pigmenti prisutni u cijanobakterijama i crvenim algama. Određeni fikobilini imaju sposobnost fluorescencije pa se koriste u istraživanjima tumora za markiranje tumorskih stanica (Anonimus, 2023b).

Karotenoidi su pigmenti žute, narančaste ili crvene boje. Zbog dvostruke veze u polienskom lancu uspješno „hvataju“ slobodne radikale kisika (Mekek, 2023). Slobodni radikali nastali oksidativnim stresom mogu potaknuti ili pogoršati oboljenja od karcinoma, naurodegenerativnih bolesti, kardiovaskularnih bolesti te dijabetesa. Aktivnost karotenoida

smanjuje djelovanje slobodnih radikala čime se potiče imunوسي sustav i obnovu stanica (Deniz i sur., 2017). Zbog antikancerogenog i protuupalnog djelovanja sve više se koriste u proizvodnji nutraceutika (Benavente-Valdés i sur., 2021).

Astaksantin je najčešće proizvedeni pigment, koristi se kao dodatak prehrani (Enzing i sur., 2014). Pokazalo se da ima puno jača antioksidativna svojstva u odnosu na druge karotenoide zbog svoje specifične molekularne strukture. Pomaže u zaštiti kože od UV zračenja, smanjuje znakove starenja i potiče imunوسي sustav povećanjem proizvodnje imunoglobulina A, M i G te T-stanica (Deniz i sur., 2017).

Tablica 5. Pigmenti i njihova primjena (izvor: Enzing i sur., 2014.)

| Pigment | Vrsta mikroalge | Primjena |
|------------------|---------------------------------|--|
| β -karoten | <i>Dunaliella salina</i> | bojilo za hranu, dodatak prehrani (protuupalno djelovanje, fotoprotektivni učinak) |
| Astaksantin | <i>Haematococcus pluvialis</i> | hrana u uzgoju ribe (za dobivanje crvene boje mesa), dodatak prehrani (antioksidans, fotoprotektivni učinak) |
| Fikobilin | <i>Arthrospira porphyridium</i> | bojilo za hranu, fluorescentni markeri |

2.4. Komercionalno važne vrste

Svjetska zdravstvena organizacija proglasila je *Spirulinu* (*A. platensis* i *A. maxima*) najboljom super hranom na svijetu zbog njezinog bogatog prehrambenog sastava. Male količine *Spiruline* sadrže široki raspon nutrijenata zbog čega je NASA koristi kao hranu u svemirskim putovanjima. Sadrži velike količine γ -linolenske esencijalne masne kiseline (GLA). GLA pomaže u smanjivanju kolesterola i predmenstrualnog sindroma te dermatitisa. Također, selektivno uništava tumorske stanice bez oštećivanja normalnih stanica te pomaže u borbi protiv multiple skleroze, šizofrenije, dijabetesa i reumatskog artritisa. *Spirulina* je izvor fikobiliproteina koji je dobar antioksidans i koristi su u terapiji protiv tumora. Obiluje B1 vitaminom i potiče zdrav rad gastrointestinalnog sustava. Nutrijenti *Spiruline* su lako iskoristivi

zbog čega se njezina konzumacija posebno preporuča trudnicama, dojiljama i neuhranjenoj djeci. *Spirulina* se primjenjuje u proizvodnji tjestenine, keksa, proteinskih pločica i drugih gotovih proizvoda (Chacon-Lee i González-Marino, 2010).

Chlorella vulgaris bogata je proteinima i esencijalnim kiselinama, vitaminima B kompleksa i C vitaminom, mineralima (magnezij, željezo, kalcij, kalij, natrij), β -karotenom i klorofilom. Sadrži makromolekule koje potiču imunosti sustav, djeluju kao antioksidansi te smanjuju kolesterol u krvi (Chacon-Lee i González-Marino, 2010).

Dunaliella salina poznata je po proizvodnji velike koncentracije karotena, β -karotena, dok je *H. pluvialis* važan izvor astaksantina, a oba pigmenta pokazala su snažno antioksidativno djelovanje. *Porphyridium cruentum* je mikroalga koja sadrži masne kiseline ARA i EPA, obje su važne u ljudskoj prehrani (Chacon-Lee i González-Marino, 2010).

2.5. Primjena mikroalgi u prehrambenoj industriji

Mikroalge se u ljudskoj prehrani koriste stoljećima. Zemlje Afrike, Azije i indijanska plemena Amerike otkrili su blagodati mikroalgi davnih dana. Danas se u zapadnim zemljama mikroalge i hrana obogaćena mikroalgama poglavito plasira na tržište zdrave hrane (Tablica 6.) (Chacon-Lee i González-Marino, 2010). Unatoč potencijalu brojnih vrsta mikroalgi za primjenu u prehrambenoj industriji, za sada je samo sedam vrsta (*Spirulina*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*, *Schizochytrium*, *Porphyridium cruentum* i *Cryptocodinium cohnii*) priznato za sigurnu ljudsku konzumaciju od strane Američke agencije za hranu i lijekove (FDA) i Europske agencije za sigurnost hrane (EFSA). Također, 19 vrsta mikroalgi klasificirano je kao netoksične te je odobrena njihova primjena za proizvodnju hrane za sektor akvakulture (Benavente-Valdés i sur., 2021).

Tržištem dominira *Spirulina* čija produkcija iznosi 12 000 t godišnje i procjenjuje se da će njezina vrijednost na tržištu ostvariti 2 milijarde američkih dolara do 2026. godine. Godišnja produkcija *Chlorelle* je oko 5 000 t, *D. salinea* oko 3 000 t godišnje, a *H. pluvialis* oko 700 t godišnje te se procjenjuje da će njihova vrijednost na tržištu doseći 44,6 milijardi američkih dolara do 2023. godine (Benavente-Valdés i sur., 2021).

Tablica 6. Pregled literature za namirnice obogaćene mikroalgama (izvor: Benavente-Valdés i sur., 2021.)

| Prehrambeni proizvod | Vrsta mikroalgi | Nutritivna svojstva | Dobrobit |
|-----------------------------|---|---|---|
| Kruh | <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Arthrospira sp.</i> , <i>Dunaliella spp.</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> | proteini, vlakna, minerali | antioksidativno, antikancerogeno i protuupalno djelovanje, prevencija Parkinsonove bolesti |
| Keksi | <i>Haematococcus pluvialis</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> | proteini, pigmenti | antioksidativno i antikancerogeno djelovanje |
| Tjestenina | <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Dunaliella salina</i> , <i>Chlorella sorokiniana</i> | proteini, EPA, DHA, antioksidansi | antikancerogeno djelovanje, djeluje protiv starenja i noćne sljepoće |
| Jogurt | <i>Arthrospira sp.</i> , <i>Chlorella sp.</i> | proteini, polinezasićene masne kiseline, antioksidansi | obogaćeno proteinima i nezasićenim masnim kiselinama |

Korištenje mikroalgi u pripremi hrane mijenja njezina organoleptička svojstva. Mikroalge hrani daju zelenkastu boju i okus i miris mora, što mnoge ljude podsjeća na okus ribe (Kratzer i Murkovic, 2021). Ovo svojstvo se različito percipira, dok u Kini smatraju da mikroalge poboljšavaju okus hrane, u zapadnim zemljama to smatraju nepoželjnim (Chacon-Lee i González-Marino, 2010). Na primjer, u proizvodnji keksa korištena je sušena biomasa *A. maxima* kako bi se obogatila njihova nutritivna vrijednost. Keksi su sadržavali veću koncentraciju željeza, proteina i masnih kiselina, pogotovo γ -linolenske masne kiseline (GLA). Organoleptička svojstva su zadovoljavala zahtjeve potrošača ako se koristilo do 20% sušene biomase. *A. platensis* se nije pokazala kao dobar sastojak za smjesu. Samo 3% dodane biomase keksima je promijenilo konzistenciju keksa učinivši ih pretvrdima. Boja keksa se drastično promijenila u tamno zelenu sa dodatkom od samo 1% biomase algi u smjesi (Kratzer i

Murkovic, 2021). Također, u proizvodnji rezanaca korišteno je pšenično brašno s dodatkom *C. vulgaris*, *A. platensis* i *Eucheuma cottonii*. Nutritivni sastav rezanaca proizvedenih s takvom mješavinom brašna pokazao je bolji sastav proteina, masti i vlakana te smanjene količine ugljikohidrata, zadržavajući svoja kulinarska svojstva kao što su tekstura, boja, aroma i okus. Kako je tjestenina namjernica koja se koristi u cijelom svijetu, smatra se da je ovo odličan način obogaćivanja tradicionalnih namirnica visoko vrijednim spojevima (Kratzer i Murkovic, 2021).

Mikroalge se pokušavaju ukomponirati i u proizvodnju suhomesnatih proizvoda. Njemački znanstvenici su uljem dobivenim iz mikroalge *Schizochytrium spp.* obogaćivali mast namijenjenu za proizvodnju kobasica. Zamjena od 25% nije bila prihvatljiva za potrošače, ali dodatak od 15% nije znatno mijenjao okus no znatno je povećao udio DHA masne kiseline u krajnjem proizvodu (Chacon-Lee i González-Marino, 2010).

2.6. Mikroalge kao dodaci prehrani i nutraceutici

Preko 75% produkcije godišnje biomase mikroalgi koristi se za proizvodnju nutraceutika u obliku sirupa, prahova, tableta i kapsula. Nutraceutici su prirodni izvori molekula ili tvari koji imaju fiziološku korist i sposobnost zaštite ljudskog zdravlja i dobiti te sprečavaju kronične bolesti (Šimat, 2021).

Zbog stresnog i ubrzanog načina života ljudi sve više obolijevaju od kroničnih bolesti a smatra se da su one uzrok smrti čak 71% svjetske populacije. Glave kronične bolesti su kardiovaskularne bolesti, moždani udar, karcinomi, kronične respiratorne bolesti, dijabetes, neurodegenerativne i mentalne bolesti. Oksidativni stres i upale smatraju se glavnim uzrocima pojave istih. Slobodni radikali oštećuju stanične membrane, lipide, proteine i DNK što uzrokuje pojavu upale koja dovodi do kroničnog oboljenja. Mnogi lijekovi koji se trenutno koriste u liječenju kroničnih bolesti često imaju ozbiljne nuspojave i nisku selektivnost, što dovodi do oštećenja zdravih stanica. Zbog ovoga se sve više naginje korištenju bioaktivnih tvari u obliku nutraceutika (Silva i sur., 2022).

Mikroalge obiluju visoko vrijednim spojevima koje se može koristiti u proizvodnji nutraceutika. Bioaktivne tvari imaju antimikrobno, protuupalno, antioksidativno, antikarcinogeno i antivirusno djelovanje, poboljšavaju imunost sustav te smanjuju znakove starenja. Manipulacijom uzgojnog medija može povećavati koncentracija željenog visoko vrijednog spoja. Primjerice, *H. pluvialis* proizvodi više astaksantina kad je izložen jačoj svjetlosti (Silva i sur., 2022).

Neke mikroalge sadrže više od 50% proteina u suhoj masi. Peptidi imaju antihipertenzivno djelovanje čime povoljno djeluju na kardiovaskularni sustav, također ih karakterizira antitumorsko, antimutageno te antikoagulacijsko djelovanje. *Chlorella vulgaris* sadrži peptide koji štite DNK djelujući antioksidativno. Mikroalge su bogat izvor nezasićenih masnih kiselina, najpoznatije su omega-3 masne kiseline EPA i DHA. Navedene esencijalne masne kiseline djeluju protuupalno te poboljšavaju zdravlje kardiovaskularnog sustava. Omega-3 masne kiseline pomažu u razvoju mozga i kognitivnih sposobnosti zbog čega se preporučuju trudnicama za zdrav razvoj fetusa. Pigmenti su velika skupina biološki aktivnih molekula najpoznatijih po svojim antioksidativnim svojstvima i zaštiti od UV zračenja. Određeni pigmenti također djeluju i protuupalno, hepatoprotektivno, neuroprotektivno i ateroprotektivno. Karotenoidi, lutein i zeaksantin su fotoprotektivni pigmenti koji štite zdravlje očiju i poboljšavaju vid (Gallaso i sur., 2019).

Ljudi postaju sve svjesniji važnosti zdrave prehrane za zdravlje i prevenciju razvoja kroničnih bolesti te sve više primjenjuju mikroalge u svojoj prehrani. Stanovnici zapadnih zemalja nisu navikli na njihov okus te preferiraju mikroalge u obliku dodatka prehrani (kapsule, tablete, prahovi) s obzirom da mikroalge nisu dio tradicionalne prehrane (Chacon-Lee i González-Marino, 2010).

3. ZAKLJUČCI

Popularnost mikroalgi sve više raste zbog njihove raznolike primjene u različitim industrijama. U prehrambenoj industriji izrazito se cijene zbog svog bogatog nutritivnog sastava i velikih koncentracija visoko vrijednih spojeva. Najčešće se konzumiraju u obliku prehrambenih dodataka jer potrošači još nisu navikli na okus mikroalgi.

Zbog svog sastava, mikroalge pomažu u prevenciji i liječenju kroničnih bolesti kao što su kardiovaskularne bolesti, moždani udar, karcinomi, kronične respiratorne bolesti, dijabetes, neurodegenerativne i mentalne bolesti. Proizvodnja nutraceutika dobivenih iz mikroalgi u kontinuiranom je porastu budući da i manje varijacije uzgojnih parametara značajno utječu na povećanu proizvodnju željenih bioaktivih spojeva.

Za sada glavnu prepreku u većoj komercijanoj primjeni mikroalgi predstavlja njihov uzgoj. Mikroalge se mogu uzgajati u otvorenom i zatvorenom sustavu. Otvoreni bioreaktor su podložni vanjskim utjecajima i ovise o atmosferskim prilikama, podložni su kontaminaciji, također imaju male prinose biomase. Zatvoreni bioreaktori postižu povoljne uzgojne uvjete, ali zahtijevaju veliki početni kapital a cijene održavanje dodatno smanjuju isplativost proizvodnog procesa. Daljnji razvoj tehnologije nužan je za efikasniju proizvodnju koja će financijski opravdati početna kapitalna ulaganja.

Znanstvenici diljem svijeta istražuju nove bioaktivne spojeve, mogućnost daljnje primjene te ulažu velike napore u optimizaciju uzgoja mikroalgi u svrhu daljnje primjene u prehrambenoj industriji i proizvodnji nutraceutika.

4. LITERATURA

- Anonimus 2015. Internetska nutricionistička enciklopedija: bjelančevine, Dostupno sa: <https://definicijahrane.hr/definicija/hranjive-tvari/bjelancevine/>, pristupljeno: lipanj, 2023.
- Anonimus 2023a. O masnim kiselinama, Dostupno sa: <https://poliklinika-analiza.hr/o-masnim-kiselinama/>, pristupljeno: srpanj 2023
- Anonimus 2023b. Značajke fotosintetskih pigmenata i glavne vrste, Dostupno sa: <https://hr.thpanorama.com/articles/biologa/pigmentos-fotosinticos-caractersticas-y-tipos-principales.html>, pristupljeno: lipanj, 2023
- Benavente-Valdés JR, Méndez-Zavala A, Hernández-López I, Carreón-González BA, Velázquez-Arellano ME, Morales-Oyervides L, Montanez-Saénz JC. 2021. Unconventional microalgae species and potential for their use in the food industry. U: Tomás Lafarga i Gabriel Acién (ur.), Cultured Microalgae for the Food Industry Current and Potential Applications, Academic Press, str. 49-71.
- Bosak S. 2017. Mikroalge „zelena revolucija“ u proizvodnji energije i sirovina? Priroda, 1055: 31-36.
- Chacon-Lee TL, González-Marino GE. 2010. Microalgae for “healthy” foods possibilities and challenges. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 9: 655-675.
- Deniz M, Garcia-Vaquero E, Imamoglu E. 2017. Trends in red biotechnology: Microalgae for pharmaceutical applications. U: Cristina Gonzalez-Fernandez i Raul Munoz (ur.), Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts From Feedstock Cultivation to End-Products, Woodhead Publishing, United Kingdom, str. 429-460.
- Enzing C, Ploeg M, Barbosa M, Sijtsma L, authors Viganì M, Parisi C, Rodriguez Cerezo E. 2014. Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. EUR 26255. Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC85709.
- FAO. 2013. Algal production. Dostupno sa: <https://www.fao.org/3/w3732e/w3732e06.htm>, pristupljeno: rujan, 2023.
- Galasso C, Gentile A, Orefice I, Ianora A, Bruno A, Noonan DM, Sansone C, Albini A, Brunet C. 2019. microalgal derivatives as potential nutraceutical and food supplements for human health: a focus on cancer prevention and interception. Nutrients. 11(6): 1226.
- Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. 2021. Alge. Dostupno sa: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=1687>, pristupljeno: srpanj 2023.

- Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. 2021. Bjelančevine. Dostupno sa: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=7975>, pristupljeno: srpanj 2023.
- Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. 2021. Klorofil. Dostupno sa: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=31988>, pristupljeno: srpanj 2023.
- Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. 2021. Masne kiseline. Dostupno sa: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=39301>, pristupljeno: srpanj 2023.
- Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. 2021. Pigmenti. Dostupno sa: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=48181>, pristupljeno: srpanj 2023.
- Hu Q. 2004. Environmental effects on cell composition. U: Amos Richmond (ur.), Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Publishing, New Jersey, str. 83-95.
- Kratzer R, Murkovic M. 2021. Food ingredients and nutraceuticals from microalgae: main product cladded and biotechnological production. *Foods*, 10, 1626.
- Machado L, Carvalho G, Pereira RN. 2022. Effects of innovative processing methods on microalgae cell wall: prospects towards digestibility of protein-rich biomass. *Biomass*, 2: 80–102.
- Mekek MP. 2023. Fotoprotektivna uloga nutraceutika, Dostupno sa: <http://www.inpharma.hr/index.php/news/2423/18/Fotoprotektivna-uloga-nutraceutika>, pristupljeno: lipanj, 2023
- Muller-Feuga A. 2013. Microalgae for aquaculture: the current global situation and future trends. U: Amos Richmond i Qiang Hu (ur), Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. John Wiley & Sons, New Jersey, str. 613-627.
- Silva M, Kamberovic F, Uota ST, Kovan IM, Viegas CSB, Simes DC, Gangadhar KN, Varela J, Barreira L. 2022. Microalgae as potential sources of bioactive compounds for functional foods and pharmaceuticals. *Applied Sciences* 12, 12: 5877.
- Sunda WG, Price N, Morel FNM. 2005. Trace metal ion buffers and their use in culture studies. U: Robert A. Andersen (ur.), *Algal Culturing Techniques*. Elsevier Academic Press, str. 35-65.
- Shen Y, Yuan W, Pei ZJ, Wu Q, Mao E. 2009. Microalgae mass production method, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 52(4): 1275-1287.
- Šimat V. 2021. Nutraceuticals and Pharmaceuticals from Marine Fish and Invertebrates. *Mar. Drugs* 2021, 19, 401