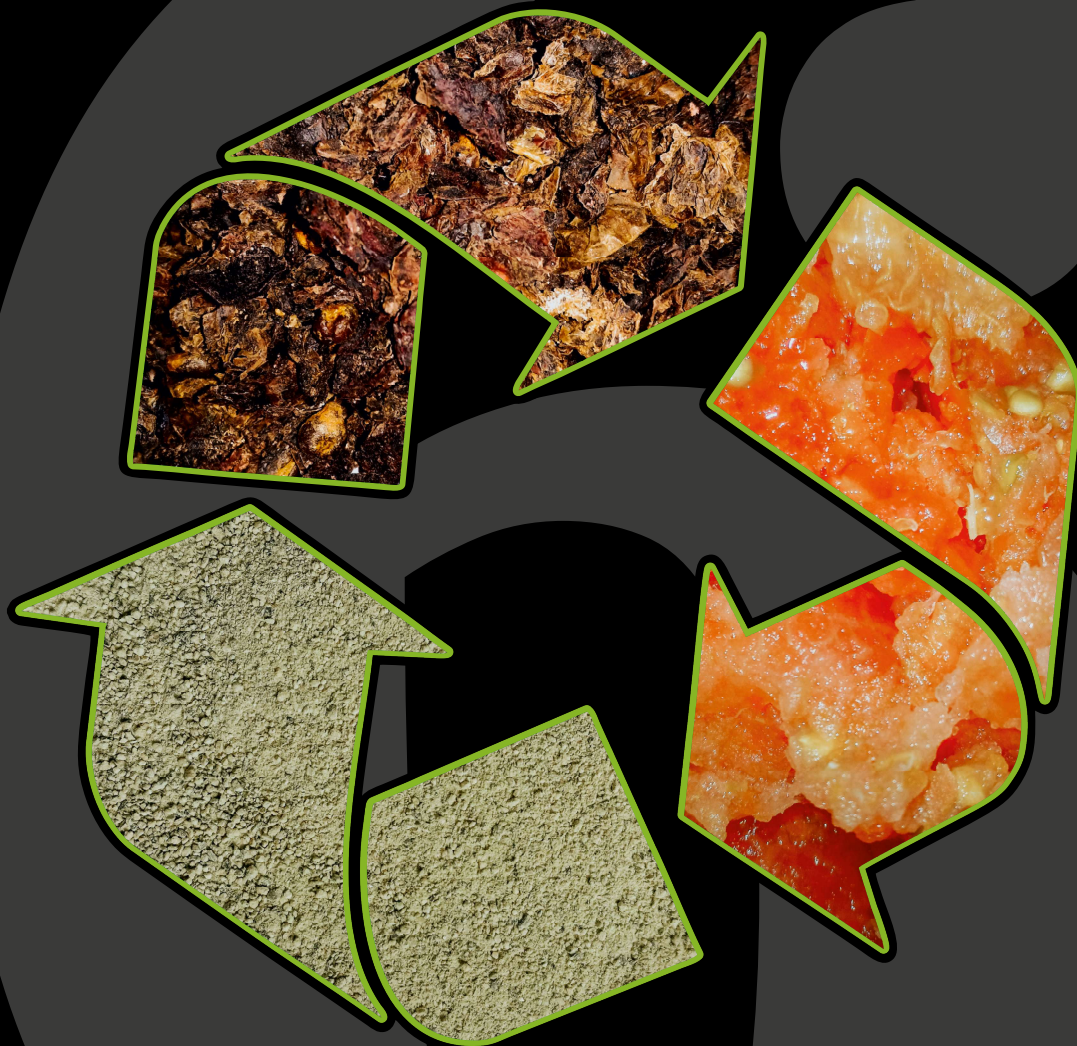




**Neke mogućnosti
iskorišćenja nusproizvoda
prehrambene industrije**

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek

**NEKE MOGUĆNOSTI ISKORIŠTENJA NUSPROIZVODA
PREHRAMBENE INDUSTRIJE
KNJIGA 6.**



PTF

NEKE MOGUĆNOSTI ISKORIŠTENJA NUSPROIZVODA PREHRAMBENE INDUSTRIJE
KNJIGA 6.

Urednici

prof. dr. sc. Drago Šubarić
izv. prof. dr. sc. Dajana Kučić Grgić
prof. dr. sc. Stela Jokić
izv. prof. dr. sc. Antun Jozinović

Izdavači

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek

Recenzenti

prof. dr. sc. Verica Dragović-Uzelac
prof. dr. sc. Igor Jerković
prof. dr. sc. Stanko Ivanković
izv. prof. dr. sc. Sandra Pedisić

Lektor

Dunja Paulik, univ. mag. educ. philol. croat.

Tehnička priprema

izv. prof. dr. sc. Antun Jozinović

Dizajn naslovnice

Tomislav Šilovinac

Tisak i uvez

Studio HS Internet d. o. o.

Autor slika na naslovnici

Antun Jozinović

CIP zapis je dostupan u nacionalnom skupnom katalogu knjižničkog sustava Bukinet pod brojem
991005956848409366.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku



Suglasnost za izdavanje ove sveučilišne monografije donio je Senat Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 8. sjednici održanoj 22. svibnja 2026. godine pod brojem 14/26.

Knjiga je pripremljena i tiskana uz pomoć Zaklade Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti.



ISBN: 978-953-8543-11-1

Osijek, 2026.

**NEKE MOGUĆNOSTI ISKORIŠTENJA
NUSPROIZVODA PREHRAMBENE
INDUSTRIJE
KNJIGA 6.**

prof. dr. sc. Drago Šubarić
izv. prof. dr. sc. Dajana Kučić Grgić
prof. dr. sc. Stela Jokić
izv. prof. dr. sc. Antun Jozinović
Urednici

Osijek, 2026.

Poglavlje 31

ISKORIŠTENJE NUSPROIZVODA PRERADE KOZICA ZA EKSTRAKCIJU ASTAKSANTINA

Martina Čagalj*, Toni Jurić Šolto

*Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za studije mora, Ruđera Boškovića 37, 21 000 Split,
Hrvatska, *mcagalj@unist.hr*

SAŽETAK

Astaksantin lipofilni je karotenoid iz skupine ksantofila, poznat po snažnoj antioksidacijskoj aktivnosti i širokom spektru bioloških učinaka. Prirodno je prisutan u mikroalgama, morskim organizmima i ribama, dok se u organizme viših trofičkih razina prenosi kroz hranidbeni lanac. Zbog svoje kemijske strukture astaksantin učinkovito neutralizira slobodne radikale, pokazuje protuupalno, neuroprotektivno i imunomodulatorno djelovanje te stoga ima značajnu ulogu u očuvanju zdravlja kože, očiju i kardiovaskularnog sustava. Osim zdravstvene važnosti, posjeduje i visoku industrijsku vrijednost za primjenu u akvakulturi te prehrambenoj, farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji. Nusproizvodi prerade kozica predstavljaju vrijedan i održiv izvor astaksantina, čime se pridonosi konceptu kružnog gospodarstva. Za ekstrakciju astaksantina tradicionalno se koriste organska otapala, ali u posljednje vrijeme postoji sve veće zanimanje za ekološki prihvatljivijim ekstrakcijskim metodama, poput superkritične ekstrakcije CO₂, ekstrakcije potpomognute ultrazvukom, mikrovalovima i enzimima te ekstrakcije korištenjem biljnih ulja, koje često omogućuju veće prinose uz manju degradaciju pigmenta. Stabilnost astaksantina ovisi o uvjetima ekstrakcije i skladištenja, pri čemu su temperatura, svjetlost i prisutnost kisika ključni čimbenici za njegovo očuvanje. Unatoč obećavajućim rezultatima dosadašnjih istraživanja, potrebna su i daljnja istraživanja u svrhu optimizacije korištenih održivih tehnologija i poboljšanja učinkovitosti njihove industrijske primjene.

Ključne riječi: astaksantin, zelena ekstrakcija, nusproizvodi kozica

UVOD

Astaksantin lipofilni je karotenoid iz skupine ksantofila, prepoznatljiv po intenzivnoj tamnocrvenoj boji. Najbogatiji prirodni izvor astaksantina su mikroalge, posebice zelena mikroalga *Haematococcus pluvialis* koja ga u velikim količinama, pod utjecajem visokog intenziteta svjetlosti i nedostatka hranjivih tvari, proizvodi kao obrambeni mehanizam (Guerin, 2003). Osim u mikroalgama, astaksantin prisutan je i u kvascima, bakterijama te morskim organizmima, poput kozica, škampa, jastoga i krila. Prisutan je i u mesu riba kao što su losos i pastrva. Ribe i većina morskih životinja nemaju same sposobnost sinteze astaksantina, već ga u organizam unose putem hrane. Plankton i mali rakovi, nakon konzumacije primarnih proizvođača, akumuliraju astaksantin u tkivima, a on se potom prenosi hranidbenim lancem na organizme viših trofičkih razina. Koncentracija astaksantina u tijelu morskih organizama ovisi o uvjetima i njegovoj dostupnosti u okolišu, sposobnosti organizma za njegovu apsorpciju i transportiranje putem metabolizma te o mjestu akumulacije (Chien i sur., 1992, Ambati i sur., 2014, Elbahnaswy i sur., 2024). Njegova uloga ovisi o organizmu u kojem je prisutan. U algama i planktonu on je pigment važan u fotosintezi te pruža zaštitu od fotooksidativnih oštećenja, dok je u ribama i rakovima odgovoran za obojenost mesa i oklopa, gdje ima ulogu u reproduktivnim procesima organizama, ali i u njihovoj komercijalnoj vrijednosti (Bjerkeng, 2000, Chien i sur., 2005).

BIOLOŠKA AKTIVNOST I ZDRAVSTVENE KORISTI ASTAKSANTINA

Molekularnu strukturu astaksantina karakteriziraju dugi konjugirani nizovi dvostrukih i jednostrukih veza između ugljikovih atoma. Karakteristika astaksantina jest i prisutnost keto (CO) i hidroksi (OH) skupina na obama krajevima lanca, što ga svrstava u skupinu ksantofila. Zahvaljujući navedenoj kemijskoj strukturi, astaksantin učinkovito uklanja slobodne radikale i reaktivne vrste kisika. Posebna vrijednost proizlazi upravo iz kombinacije njegovih hidrofilnih i lipofilnih obilježja, što mu omogućuje učinkovitiju zaštitu staničnih struktura u odnosu na većinu drugih karotenoida pa se astaksantin ubraja među najsnažnije prirodne antioksidanse. Njegova je antioksidacijska učinkovitost od 10 do 100 puta veća u usporedbi s karotenoidima poput luteina i β -karotena (Ambati i sur., 2014, Davinelli i sur., 2022, Šimat i sur., 2022). Uz antioksidacijsku aktivnost, zbog koje je izrazito zanimljiv u kontekstu prehrane i ljudskog zdravlja, astaksantin pokazuje i značajan protuupalni potencijal. Modulacijom signalnih putova uključenih u upalne procese smanjuje ekspresiju upalnih medijatora, što može imati važnu ulogu u prevenciji i kontroli kroničnih upalnih bolesti (Fakhri i sur., 2018). Preliminarna istraživanja na životinjama i ljudima upućuju na njegov učinak u smanjenju oksidacije LDL-kolesterola te poboljšanju lipidnog profila, što može biti korisno za kardiovaskularno zdravlje (Bjørklund i sur., 2022). Zbog sposobnosti prolaska kroz krvno-moždanu barijeru, astaksantin se istražuje i kao potencijalni neuroprotektivni agens. Smatra se da ima učinak na smanjenje oksidativnih

oštećenja neurona i poboljšanje mitohondrijske funkcije u modelima neurodegenerativnih bolesti uključujući Alzheimerovu i Parkinsonovu bolest (Hussein i sur., 2006). Nadalje, astaksantin modulira i pojačava imunološki odgovor povećanjem funkcije makrofaga i T-limfocita, smanjuje neuroinflamaciju i oksidativna oštećenja živčanih stanica te pokazuje sposobnost inhibicije proliferacije tumorskih stanica induciranjem apoptoze i snižavanjem metastatskog potencijala (Donoso i sur., 2021). Nekolicina istraživanja sugerira da astaksantin poboljšava pamćenje i kognitivne funkcije, no za konkretnu potvrdu učinkovitosti te određivanje optimalnih doza i formulacija potrebna su dodatna, obuhvatnija i metodološki rigoroznija, istraživanja (Sekikawa i sur., 2019). U kontekstu kožnih bolesti, astaksantin se pokazao kao zaštitni agens protiv oštećenja uzrokovanih ultraljubičastim zračenjem. Smanjuje lipidnu peroksidaciju u stanicama kože te doprinosi očuvanju elastičnosti i hidratacije, uz smanjenje vidljivih bora, što potvrđuje njegova protuupalna i fotoprotektivna svojstva. Uz navedene pozitivne dermatološke učinke, astaksantin ima važnu ulogu i u očnom zdravlju djelujući kao filter protiv svjetlosnog stresa i pomažući u prevenciji bolesti mrežnice (Davinelli i sur., 2022). Preliminarna istraživanja ukazuju i na poboljšanje simptoma suhog oka, djelomično zbog bolje funkcije suznih žlijezda i stabilnijeg suznog filma. Dodatno, postoje naznake da astaksantin može smanjiti rizik od dobno uvjetovanih očnih bolesti, poput makularne degeneracije (Yamashita i sur., 2015). Osim pozitivnih zdravstvenih učinaka, astaksantin ima i značajnu industrijsku vrijednost. Njegova se svojstva koriste u akvakulturi, posebice u proizvodnji hrane za losose, pastrve i rakove, gdje doprinosi kvaliteti proizvoda i zdravlju uzgojenih organizama (Li i sur., 2022). Zbog lipofilnosti i dobre biodostupnosti naširoko se primjenjuje u farmaceutskoj, prehrambenoj i kozmetičkoj industriji (Slika 1). Brojna istraživanja upućuju na njegov potencijal u prevenciji različitih bolesti, a posebno su istaknuti pozitivni učinci suplementacije prirodnim astaksantinom.

VALORIZACIJA NUSPROIZVODA KOZICA ZA PROIZVODNJU ASTAKSANTINA



Slika 1 Iskorištenje nusproizvoda prerade kozica (Izvor: slika generirana pomoću alata ChatGPT, OpenAI)

EKSTRAKCIJA ASTAKSANTINA

Ljuštore kozica, koje su jedan od najznačajnijih nusproizvoda prerade kozica, bogat su prirodni izvor tog pigmenta. Njihova valorizacija pridonosi kružnom gospodarstvu jer nusproizvodi postaju resurs, a ne otpad, čime se povećava održivost proizvodnje i smanjuju troškovi, što poboljšava konkurentnost industrije (Parjikolaei i sur., 2017).

Tradicionalne metode ekstrakcije uključuju korištenje organskih otapala, poput acetona i heksana, ili ekstrakciju u ulju. Te metode često su povezane s visokim troškovima, okolišnim rizicima i mogućom kontaminacijom proizvoda. Iako su jednostavne, često dovode i do degradacije pigmenta zbog primjene povišenih temperatura te rezultiraju relativno niskim prinosima. Stoga se sve više pažnje usmjerava na „zelene” metode ekstrakcije koje omogućuju veće prinose, bolje očuvanje stabilnosti izoliranih spojeva i zahtijevaju smanjeno korištenje štetnih kemikalija. Ekološki prihvatljive metode koriste tzv. „zelena otapala”, poput etanola, metanola i etil acetata. Zelena otapala ne samo da smanjuju negativan utjecaj na okoliš nego i mogu optimizirati ekstrakcijski proces i povećati prinos ciljanih spojeva.

Među navedenim suvremenim metodama posebice se ističe ekstrakcija superkritičnim fluidima (SFE) uz korištenje ugljikovog dioksida (CO_2) kao otapala. U uvjetima iznad kritične točke CO_2 omogućuje selektivnu ekstrakciju astaksantina uz minimalnu degradaciju. Dodaci poput etanola, maslinova ulja ili sojinog ulja poboljšavaju učinkovitost procesa. Suárez i sur. (2007) navode da dodatak 10 % sojinog ulja povećava prinos astaksantina s 25,4 % na 36,36 %, dok maslinovo ulje omogućuje prinos od 51,03 %. Prednosti te ekstrakcijske metode uključuju izostanak toksičnih ostataka klasičnih otapala i visoku čistoću ekstrakta, dok je glavni nedostatak visoka cijena potrebne opreme (Machmudah i sur., 2008).

Ekstrakcija potpomognuta ultrazvukom (UAE) koristi mehanički učinak kavitacije koja razara stanične strukture i tako olakšava oslobađanje pigmenta. Visokotlačne tehnike (do 600 MPa) također mogu povećati prinos, no pretjeran tlak negativno utječe na stabilnost astaksantina. U ekstrakciji potpomognutoj enzimima koriste se celulaze, pektinaze i proteaze za razgradnju staničnih stijenki, čime se astaksantin oslobađa u blagim uvjetima te se smanjuje njegova degradacija (Liau i sur., 2010). Primjerice, tretman neutralnim proteazama doveo je do 3,7 puta višeg sadržaja astaksantina (134,2 $\mu\text{g/g}$) u odnosu na netretirani uzorak. Ipak, primjena enzima u svrhu poboljšanja ekstrakcije često se kombinira s upotrebom organskih otapala ili SFE ekstrakcijom radi povećanja konačnog prinosa. Slično tomu, kombinacija ultrazvuka i pulsno električnog polja dodatno povećava učinkovitost njegove ekstrakcije (De Aguiar Saldanha Pinheiro i sur. 2023, Parjikolaei i sur., 2017). Primjena biljnih ulja predstavlja održivu alternativu. Izravna ekstrakcija uljem omogućuje prijenos astaksantina u uljnu fazu bez sušenja biomase, pri čemu prinos može doseći i do 88 % (Ruen-ngam i sur., 2007). Glavni izazovi visoka su viskoznost ulja i relativno spor prijenos mase.

Postupak klasične ekstrakcije astaksantina iz ljuštura kozica uključuje više koraka: odvajanje nusproizvoda (ljuštenje), sušenje i mljevenje ljuštura, ekstrakciju pigmenta otapalom, filtraciju i koncentriranje dobivenog ekstrakta (Slika 2). Nakon ekstrakcije pigment se određuje analitičkim tehnikama kao što su visokoučinkovita tekućinska kromatografija (HPLC) i spektrofotometrija. Te metode omogućuju precizno određivanje koncentracije astaksantina te procjenu njegove čistoće i kvalitete, što je ključno za daljnju industrijsku primjenu (Parjikolaei i sur., 2017). Najčešće se provodi ekstrakcija organskim otapalima različite polarnosti uključujući heksan, metanol, etanol, petroleter, kloroform i aceton. U istraživanjima aceton se pokazao kao najučinkovitije otapalo dajući najveći prinos astaksantina do 48,64 µg/g suhe mase ljuštura rakova (Dalei i Sahoo, 2015). U istraživanju Hu i sur. (2018) astaksantin je ekstrahirano iz ljuštura škampa *Procambarus clarkii*. Utvrđeno je da svježe ljuštore sadrže najveće koncentracije pigmenta, približno 239,96 µg/g, dok postupci poput ventilacijskog hlađenja, sušenja na suncu ili kuhanja značajno smanjuju njegov sadržaj u uzorcima. Rezultati su pokazali da toplinska obrada, posebice kuhanje, dovodi do najvećih gubitaka pigmenta, što je potvrda osjetljivosti astaksantina na povišene temperature. Najveći prinos postignut je pri omjeru nusproizvoda i etanola od 1 : 7, temperaturi 50 °C i vremenu ekstrakcije od 20 minuta. Nakon dobivanja sirovog ekstrakta, astaksantin je dodatno pročišćen kromatografijom na stupcu sa silikagelom. Tom metodom čistoća pigmenta značajno se povećala s početnih 0,34 % na čak 85,1 %. Slični rezultati objavljeni su i u drugim istraživanjima. Radzali i sur. (2014) naglasili su važnost odabira kootapala u superkritičnoj ekstrakciji, pri čemu se otpad vrste *Penaeus monodon* pokazao dobrim izvorom tog pigmenta. Sun i sur. (2017) uspješno su ekstrahirali astaksantin iz antarktičkog krila i njegovih nusproizvoda, dok su He i sur. (2017) istraživali ekstrakcijske postupke iz škampa ističući važnost optimizacije uvjeta radi očuvanja stabilnosti pigmenta. Punbusayakul i sur. (2025) ekstrahirali su astaksantin iz nusproizvoda kozica bogomoljki koristeći *zelena* otapala. Nakon ekstrakcije pigment su enkapsulirali, čime se poboljšala njegova stabilnost i biodostupnost. Takav integrirani pristup ne samo da omogućuje učinkovitu izolaciju astaksantina nego i poboljšava njegovu stabilnost i produljuje rok trajanja čineći ga pogodnim za daljnju primjenu u prehrambenoj, farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji. U istraživanju Wang i sur. (2021) ispitana je učinkovitost različitih organskih otapala za ekstrakciju ulja iz nusproizvoda škampa, što je relevantno i za ekstrakciju astaksantina s obzirom na to da navedena ulja sadrže karotenoide. Usporedili su korištenje etanola, acetona, *n*-heksana i mješavine otapala te je dokazano da odabir otapala značajno utječe na količinu i kvalitetu ekstrakta. Takva istraživanja otvaraju mogućnosti optimizacije procesa ekstrakcije astaksantina iz nusproizvoda uzimajući u obzir održivost i troškovnu učinkovitost proizvodnje ekstrakata. Unaprijeđenje ekstrakcijskih metoda, odabirom odgovarajućih otapala i kontrolom procesnih parametara, ključno je za razvoj održivih i konkurentnih tehnologija proizvodnje astaksantina.



Slika 2 Koraci u iskorištenju nusproizvoda prerade kozica

Uvjeti ekstrakcije i čuvanja

Astaksantin zbog svoje kemijske strukture pokazuje visoku osjetljivost na vanjske uvjete tijekom procesiranja i skladištenja. Njegova stabilnost određena je nizom čimbenika poput temperature, svjetlosti, prisutnosti kisika, pH vrijednosti medija, vrste otapala i matriksa u kojem se nalazi. Od jediničnih procesa posebice kritičnom smatra se ekstrakcija jer tijekom tog koraka najčešće dolazi do oksidacijske i termičke degradacije spoja. Jedan od ključnih čimbenika koji određuje kvalitetu astaksantinskih ekstrakata jest upravo odabir optimalnih uvjeta ekstrakcije. Trajanje ekstrakcije ima dvojaki učinak: kratka izloženost može rezultirati slabim iskorištenjem, dok produljeno trajanje često uzrokuje degradaciju spoja. Ekstrakcije potpomognute ultrazvukom i mikrovalovima te SFE skraćuju vrijeme ekstrakcije i smanjuju potrošnju energije, dok klasične metode zahtijevaju dulju izloženost otapalima i vrlo često negativne posljedice na kvalitetu ekstrakata (Tseng i sur. 2013, Zgheib i sur., 2018).

Tijekom skladištenja astaksantin je podložan fotooksidaciji, termooksidaciji i autooksidaciji koje dovode do smanjenja koncentracije pigmenta i stvaranja apokarotenoida, koji imaju nižu antioksidacijsku učinkovitost (Dewati i sur., 2022). Primjena nižih temperatura značajno usporava degradaciju; primjerice, skladištenje u uljnim matriksima pri - 20 °C omogućuje očuvanje do 90 % početne količine nakon šest mjeseci čuvanja (Miao i sur., 2013). Suprotno tomu, skladištenje na sobnoj temperaturi (25 °C) može rezultirati gubicima većim od 50 % u istom razdoblju. Korištenje neprozirne ambalaže i atmosfere bez kisika (vakuum, dušik) značajno doprinosi očuvanju stabilnosti astaksantina (Lin i sur., 2016).

Safari i sur. (2022) utvrdili su da promjene pH vrijednosti ne rezultiraju značajnim razlikama u stabilnosti astaksantina, iako su nešto bolji rezultati zabilježeni pri pH vrijednosti 5,5. Anarjane i sur. (2013) dodatno su potvrdili prednost primjene niskih temperatura u očuvanju stabilnosti astaksantina. Skladištenje pri 4 °C pokazalo se učinkovitijim u odnosu na ono pri višim temperaturama koje su ubrzale razgradnju spoja. Nadalje, prisutnost kisika može dodatno narušiti stabilnost astaksantina, dok skladištenje u inertnoj atmosferi, primjerice dušiku, može usporiti njegovu oksidaciju. Zhang i sur. (2020) pokazali su da inkapsulacija astaksantina značajno usporava degradaciju pigmenta tijekom vremena zbog fizičke barijere koja ograničava njegovu izloženost kisikom. Izloženost svjetlu uzrokuje fotodegradaciju astaksantina pa se preporučuje njegovo skladištenje u tami ili u ambalaži koja sprječava prodor svjetlosti.

ZAKLJUČAK

Rastuće tržište funkcionalne hrane i dodataka prehrani pokazuje porast zanimanja za astaksantinom. Potrošači sve više daju prednost prirodnim izvorima zbog percepcije veće sigurnosti i zdravstvene koristi. Iako rezultati brojnih istraživanja potvrđuju visoku učinkovitost pojedinih metoda ekstrakcije astaksantina, industrijska primjena i dalje se suočava s izazovima poput troškova (posebice opreme), dostupnosti sirovine i varijabilnog sadržaja astaksantina u korištenim sirovinama. Svakako, zbog prethodno navedenih razloga, buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na optimizaciju održivih ekstrakcijskih tehnika i njihovu prilagodbu industrijskim razmjerima, čime bi nusproizvodi kozica mogli postati konkurentnim i ekološki prihvatljivim izvorom prirodnog astaksantina.

ZAHVALA

Ovo poglavlje izrađeno je u sklopu projekta InnoSol4Med (ID projekta 1836, CUP J53C22004790006) financiranog iz programa PRIMA. Program PRIMA podržava Europska unija.

LITERATURA

Ambati RR, Phang SM, Ravi S, Aswathanarayana RG (2014) Astaxanthin: Sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications – A review. *Marine Drugs*, **12**(1):128–152.

Anarjan N, Tan CP, Nehdi IA, Ling TC (2013) Effects of storage temperature, atmosphere and light on chemical stability of astaxanthin nanodispersions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **90**(9):1223–1227.

Bjerkeng B (2000) Carotenoids in aquaculture: fish and crustaceans. U: Britton G, Liaaen-Jensen S, Pfander H (ur.), *Carotenoids, Volume 3: Biosynthesis and Metabolism*. Birkhäuser, Basel.

Bjørklund G, Dadar M, Chirumbolo S, Aaseth J (2022) The role of astaxanthin as a nutraceutical in healthy ageing and other health applications. *Antioxidants*, **11**(4):890.

Chien YH, Jeng SC (1992) Pigmentation of kuruma prawn, *Penaeus japonicus* Bate, by various pigment sources and levels and feeding regimes. *Aquaculture*, **102**(3–4):333–346.

Chien YH, Shiau WC (2005) The effects of dietary supplementation of algae and synthetic astaxanthin on body astaxanthin, survival, growth, and low dissolved oxygen stress resistance of kuruma prawn, *Marsupenaeus japonicus* Bate. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **318**(2):201–211.

- Dalei J, Sahoo D (2015) Extraction and characterization of astaxanthin from the crustacean shell waste from shrimp processing industries. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, **6**(6):2532–2537.
- Davinelli S, Nielsen ME, Scapagnini G (2022) Astaxanthin in skin health, repair, and disease: a comprehensive review. *Nutrients*, **14**(3):512.
- De Aguiar Saldanha Pinheiro AC, Martí-Quijal FJ, Barba FJ, Benítez-González AM, Meléndez-Martínez AJ, Castagnini JM, Tappi S, Rocculi P (2023) Pulsed electric fields (PEF) and accelerated solvent extraction (ASE) for valorization of shrimp side streams: antioxidant and HPLC evaluation of astaxanthin recovery. *Antioxidants*, **12**(2):406.
- Dewati R, Rochmadi, Rohman A, Budiman A (2022) Degradation rate of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Food Research*, **6**(4):254–258.
- Donoso A, González-Durán J, Muñoz AA, González PA, Agurto-Muñoz C (2021) Therapeutic uses of natural astaxanthin: an evidence-based review focused on human clinical trials. *Pharmacological Research*, **166**:105479.
- Elbahnaswy S, Elshopakey GE (2024) Recent progress in practical applications of astaxanthin in aquaculture industry: a review. *Fish Physiology and Biochemistry*, **50**(1):97–126.
- Fakhri S, Abbaszadeh F, Dargahi L, Jorjani M (2018) Astaxanthin: a mechanistic review on its biological activities and health benefits. *Life Sciences*, **217**:185–195.
- Guerin M, Huntley ME, Olaizola M (2003) *Haematococcus* astaxanthin: applications for human health and nutrition. *Trends in Biotechnology*, **21**(5):210–216.
- He L, Zhang R, Zhang R (2017) Study on the extraction of astaxanthin from prawn. *Journal of Food Processing and Preservation*, **41**(5):e13002.
- Hu J, Lu W, Lv M, Wang Y, Ding R, Wang L (2018) Extraction and purification of astaxanthin from shrimp shells and the effects of different treatments on its content. *Brazilian Journal of Pharmacognosy*, **28**(6):838–844.
- Hussein G, Sankawa U, Goto H, Matsumoto K, Watanabe H (2006) Astaxanthin, a carotenoid with potential in human health and nutrition. *Journal of Natural Products*, **69**(3):443–449.
- Liau BC, Shen CT, Liang FP, Hong SE, Hsu SL, Jong TT, Shieh CJ (2010) Enzymatic hydrolysis and extraction of astaxanthin from shrimp shells. *Food Chemistry*, **119**(1):62–67.
- Li Y, Li B, Tong S, Chen F, Qin S (2022) Development of astaxanthin production by marine microalgae *Haematococcus pluvialis*: current understanding and future perspectives. *Algal Research*, **61**:102640.

- Lin SF, Chen YC, Chen RN, Chen LC, Ho HO, Tsung YH, Sheu MT, Liu DZ (2016) Improving the stability of astaxanthin by microencapsulation in calcium alginate beads. *PLoS One*, **11**(4):e0153685.
- Machmudah S, Goto M, Sasaki M, Hirose T (2008) Extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* using supercritical CO₂ and ethanol as co-solvent. *Journal of Supercritical Fluids*, **44**(3):301–307.
- Miao F, Lu D, Li Y, Zeng M, Zeng Z, Wang Y (2006) Characterization of astaxanthin esters in *Haematococcus*. *Analytica Chimica Acta*, **567**(2):198–203.
- Parjikolaei BR, Errico M, El-Houri RB, Mantell C, Fretté XC, Christensen KV (2017) Process design and economic evaluation of green extraction methods for recovery of astaxanthin from shrimp waste. *Chemical Engineering Research and Design*, **117**:73–82.
- Punbusayakul N, i sur. (2025) Valorization of mantis shrimp by-product through integrated extraction and encapsulation of astaxanthin. *Food Chemistry*, **380**:132171.
- Radzali SA, Baharin BS, Othman R, Markom M, Rahman RA (2014) Co-solvent selection for supercritical fluid extraction of astaxanthin and other carotenoids from *Penaeus monodon* waste. *Journal of Oleo Science*, **63**(5):475–482.
- Ruen-ngam D, Shotipruk A, Pavasant P, Goto M (2007) Direct extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* with vegetable oils. *Bioresource Technology*, **98**(2):316–320.
- Safari R, Mirbakhsh M, Ghafari H, Reyhanipour S, Rahmati R, Ebrahimzadeh M (2022) Effect of temperature, pH and time on stability and antioxidant activity of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Iranian Scientific Fisheries Journal*, **31**(1):109–120.
- Sekikawa T, Kizaki T, Haga S, Hara T, Izawa T (2019) Astaxanthin supplementation enhances cognitive function in healthy older adults. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, **64**(2):135–144.
- Suaréz S, Gámez ME, Cardoso L (2007) Supercritical carbon dioxide extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* with vegetable oils as co-solvent. *Bioresource Technology*, **99**(1):321–327.
- Sun Z, Hou H, Kong L (2017) Determination of astaxanthin in Antarctic krill and its products by HPLC. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, **26**(1):84–92.
- Šimat V, Rathod NB, Čagalj M, Hamed I, Generalić Mekinić I (2022) Astaxanthin from crustaceans and their byproducts: a bioactive metabolite candidate for therapeutic application. *Marine Drugs*, **20**(3):206.
- Tseng YH, Zhao YY (2013) Microwave-assisted extraction and stability of astaxanthin from microalgae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **61**(34):8320–8328.

Wang JL, Yu ZL, Yin FW, Li DY, Liu HL, Song L, Zhou DY (2021) Comparison of different solvents for extraction of oils from shrimp by-products. *Journal of Food Processing and Preservation*, **45**(7):e15754.

Yamashita E (2015) Let astaxanthin be thy medicine. *Science Progress*, **98**(1):1–8.

Zgheib N, Saade R, Khallouf R, Takache H (2018) Extraction of astaxanthin from microalgae: process design and economic feasibility study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **323**:012011.

Zhang X, Zhang R, Hu M, i sur. (2020) Food-grade Pickering emulsion as a novel astaxanthin oleoresin encapsulation to enhance stability. *Food Research International*, **137**:109367.