



HARNESSING THE POTENTIAL OF ASTAXANTHIN FROM *Haematococcus pluvialis* IN BIOMEDICAL SCIENCE: A NARRATIVE REVIEW

MEMANFAATKAN POTENSI ASTAXANTHIN DARI *Haematococcus pluvialis* DALAM ILMU BIOMEDIS: TINJAUAN NARATIF

Fitra Adi Prayogo¹, Mellyaning Oktavia Sonya Kirana Sari^{2*}, Ni Nyoman Maryaningtyas Adinatha¹

¹Program Studi Ilmu Biomedis, Fakultas Ilmu Keperawatan dan Kesehatan, Universitas Karya Husada

²Pendidikan Profesi Guru, Sekolah Pasca Sarjana, Universitas Negeri Semarang

ARTICLE INFO

Article history:

Received : 17 Februari 2025

Revised : 20 Februari 2025

Accepted : 20 Februari 2025

*Corresponding author : Mellyaning Oktavia Sonya Kirana S, Pendidikan Profesi Guru

*Email : mellyaning16@student.undip.ac.id

ABSTRACT

Astaxanthin merupakan karotenoid bernilai tinggi dengan berbagai aplikasi, salah satunya dalam bidang ilmu biomedis. *Haematococcus pluvialis* dianggap sebagai sumber astaxanthin alami yang paling menjanjikan karena dapat mengakumulasi hingga 5% dari berat keringnya dalam kondisi yang penuh tekanan. Potensi aplikasi astaxanthin dalam biomedis sangat luas. Dari efek neuroprotektif hingga sifat antikanker dan manfaat kardiovaskularnya, astaxanthin telah menunjukkan janji dalam mengatasi beberapa tantangan kesehatan yang paling mendesak. Selain itu, sifat antiinflamasi dan kemampuannya untuk memodulasi berbagai jalur pensinyalan semakin menggarisbawahi potensinya sebagai agen terapeutik. Tinjauan naratif ini memberikan sintesis komprehensif dari penelitian terkini tentang astaxanthin, merinci sifat biologisnya, tantangan budidaya, dan aplikasi terapeutik yang luas. Wawasan utama meliputi efek neuroprotektif, antiinflamasi, antikanker, dan kardioprotektifnya, yang didukung oleh struktur molekulnya yang unik dan sifat amfifiliknya. Dengan mengevaluasi secara kritis kemajuan terkini dalam teknik budidaya, ekstraksi, dan formulasi, tinjauan ini mengidentifikasi keterbatasan saat ini dan menguraikan berbagai kemungkinan untuk penelitian di masa mendatang. Secara keseluruhan, astaxanthin merupakan agen multifaset dengan potensi klinis yang signifikan, yang memerlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan bioavailabilitas dan kemanjuran terapeutiknya..

Kata kunci: Astaxanthin; *Haematococcus pluvialis*; Antioksidan; Aplikasi biomedis

ABSTRACT

Astaxanthin is a high-value carotenoid with various applications, one of which is in biomedical science. *Haematococcus pluvialis* is considered the most promising source of natural astaxanthin as it can accumulate up to 5% of its dry weight under stressful conditions. The potential applications of astaxanthin in biomedicine are vast. From its neuroprotective effects to its anticancer properties and cardiovascular benefits, astaxanthin has shown promise in addressing some of the most pressing health challenges. Moreover, its anti-inflammatory properties and ability to modulate various signaling pathways further underscore its potential as a therapeutic agent. This narrative review provides a comprehensive synthesis of current research on astaxanthin, detailing its biological properties, cultivation challenges, and wide-ranging therapeutic applications. Key insights include its neuroprotective, anti-inflammatory, anti-cancer, and cardioprotective effects, underpinned by its unique molecular structure and amphiphilic nature. By critically evaluating recent advancements in cultivation, extraction, and formulation techniques, this review identifies current limitations and outlines potential avenues for future research. Overall, astaxanthin represents a multifaceted agent with significant clinical potential, warranting further studies to optimize its bioavailability and therapeutic efficacy.

Keywords: Astaxanthin; *Haematococcus pluvialis*; Antioxidant; Biomedical applications



PENDAHULUAN

Dalam lanskap ilmu biomedis yang terus berkembang, para peneliti terus mencari senyawa inovatif yang dapat merevolusi manajemen kesehatan dan penyakit. Salah satu senyawa yang telah menarik perhatian yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir adalah astaxanthin, karotenoid kuat yang terutama bersumber dari mikroalga air tawar *Haematococcus pluvialis*. Ulasan naratif ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang pengetahuan, aplikasi, dan prospek astaxanthin saat ini yang berasal dari *H. pluvialis* di bidang biomedis.

Eksplorasi mikroalga sebagai sumber astaxanthin telah mendapatkan daya tarik yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir, didorong oleh meningkatnya permintaan global akan antioksidan alami. Astaxanthin, karotenoid bernilai tinggi dengan beragam aplikasi dalam industri makanan, pakan, nutraceutical, dan farmasi, telah muncul sebagai subjek yang semakin diminati oleh komunitas ilmiah dan masyarakat (Jannel et al., 2020). Mikroalga hijau *Haematococcus pluvialis* dianggap sebagai sumber alami astaxanthin yang paling menjanjikan. Di antara sumber-sumber alami, mikroalga *Haematococcus pluvialis* menonjol sebagai penghasil astaxanthin yang paling produktif, yang mampu mengakumulasi hingga 5% dari berat keringnya dalam kondisi stres (Kumar et al., 2022).

Haematococcus pluvialis telah muncul sebagai sumber alami astaxanthin terkaya, yang mampu mengakumulasi konsentrasi tinggi senyawa berharga ini dalam kondisi stres (Azli et al., 2021). Kemampuan unik *H. pluvialis* untuk menghasilkan astaxanthin telah memicu penelitian ekstensif untuk mengoptimalkan metode budidaya dan ekstraksi, didorong oleh meningkatnya permintaan astaxanthin alami di berbagai industri, termasuk akuakultur, kosmetik, dan nutraceuticals (Ren et al., 2021).

Sifat antioksidan astaxanthin yang luar biasa, melebihi banyak karotenoid lainnya, telah memposisikannya sebagai senyawa yang sangat diminati dalam penelitian biomedis. Kemampuannya untuk menetralkan radikal bebas dan spesies oksigen reaktif (ROS) secara efektif melindungi komponen seluler dari kerusakan oksidatif, faktor kunci dalam berbagai kondisi patologis. Selain itu, sifat amfifilik astaxanthin, yang diberikan oleh struktur molekulnya yang unik, memungkinkannya untuk berinteraksi dengan lipid dan lingkungan seluler berair, meningkatkan kemanjuran biologisnya (Ren et al., 2021).

Aplikasi potensial astaxanthin dalam biomedis sangat luas dan beragam. Dari efek pelindung saraf pada penyakit neurodegeneratif hingga sifat anti-kanker dan manfaat kardiovaskularnya, astaxanthin telah menunjukkan harapan dalam mengatasi beberapa tantangan kesehatan yang paling mendesak. Selain itu, sifat anti-inflamasi dan kemampuannya untuk memodulasi berbagai jalur pensinyalan semakin menggarisbawahi potensinya sebagai agen terapeutik (Si & Zhu, 2022).

Namun, memanfaatkan potensi penuh astaxanthin dari *H. pluvialis* bukannya tanpa tantangan. Laju pertumbuhan yang lambat, proses budidaya yang boros energi, dan kesulitan ekstraksi menjadi rintangan yang signifikan untuk produksi dan komersialisasi skala besar. Mengatasi keterbatasan ini melalui pendekatan bioteknologi inovatif dan teknik budidaya yang lebih baik sangat penting untuk mewujudkan potensi penuh dari senyawa yang luar biasa ini (Ren et al., 2021). Ulasan naratif ini menyelidiki sifat kimia dan fungsi biologis astaxanthin, mengeksplorasi aplikasinya saat ini dalam ilmu biomedis, dan memeriksa tantangan dan prospek pemanfaatan astaxanthin dari *H. pluvialis*. Dengan mensintesis penelitian terbaru dan mengidentifikasi bidang-bidang utama untuk penyelidikan di masa depan, tinjauan ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif tentang potensi astaxanthin untuk memajukan ilmu biomedis dan meningkatkan kesehatan manusia.

1. Biologi dan Ekologi *Haematococcus pluvialis*

H. pluvialis diklasifikasikan didivisi Chlorophyta, kelas Chlorophyceae, dan ordo Chlamydomonadales. *H. pluvialis* biasanya berbentuk bulat hingga bulat telur dan mengalami perubahan morfologi yang signifikan sebagai respons terhadap kondisi lingkungan. Siklus hidup mikroalga ini meliputi tahap hijau motil dan tahap merah non motil, masing-masing ditandai dengan ciri fisiologis dan morfologis yang berbeda (Gambar 1) (Nur et al., 2021).

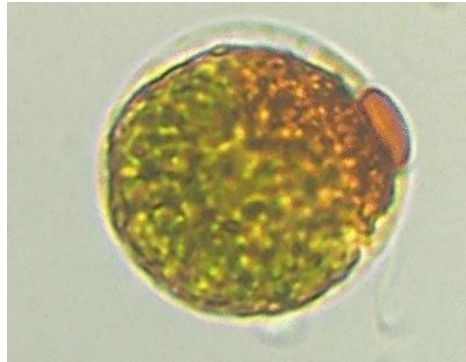


Figure 1. *Haematococcus pluvialis* cell (Hu et al., 2021)

Haematococcus pluvialis merupakan mikroalga air tawar. Selama musim panas, pertumbuhan *H. pluvialis* sering terlihat di air permukaan di daerah kering yang masuk ke instalasi pengolahan air minum. Mikroalga air tawar berukuran kecil ini memiliki siklus hidup yang sangat kompleks dalam kondisi lingkungan tertentu dan pola pertumbuhan yang berubah-ubah. Oleh karena itu, siklus hidupnya mungkin disebabkan oleh perubahan cuaca musiman dalam suhu dan intensitas cahaya, yang mempengaruhi fase reproduksinya. Siklus hidup *H. pluvialis* dapat dibagi menjadi beberapa tahap yang berbeda (Octarya et al., 2022):

- Tahap Vegetatif Motil: Dalam kondisi yang mendukung, *H. pluvialis* ada sebagai sel hijau biflagellata yang motil. Sel-sel ini secara aktif tumbuh dan membelah, ditandai dengan kloroplas tunggal yang mengandung pirenoid
- Tahap Palmella Non-Motil: Ketika kondisi lingkungan menjadi kurang mendukung, sel-sel kehilangan flagela dan beralih ke tahap palmella non-motil. Selama tahap ini, sel-sel mulai mengakumulasi astaxanthin
- Tahap Kista Merah: Tahap akhir ditandai dengan pembentukan kista berdinding tebal dengan akumulasi astaxanthin yang signifikan, memberikan warna merah yang khas pada sel. Kista ini sangat tahan terhadap tekanan lingkungan. Transisi dari tahap vegetatif hijau ke tahap kista merah melibatkan perubahan morfologi yang signifikan, termasuk degenerasi kloroplas dan peningkatan volume tetesan minyak yang mengandung astaxanthin.

H. pluvialis umumnya ditemukan di perairan kecil yang tergenang seperti kolam dan kolam batu. Kemampuannya untuk bertahan hidup di lingkungan yang beragam disebabkan oleh kemampuan adaptasinya yang luar biasa terhadap berbagai faktor lingkungan. Berikut adalah factor-faktor yang memengaruhi kehidupan *H. pluvialis* (Mularczyk et al., 2020; Nur et al., 2021):

- Intensitas cahaya: Cahaya sedang diperlukan untuk pembelahan sel yang optimal selama tahap hijau, sementara intensitas cahaya tinggi memicu produksi astaxanthin pada tahap merah

- b. Suhu: Kisaran suhu optimal untuk pertumbuhan adalah antara 25°C dan 30°C, dengan suhu ekstrem yang menyebabkan stres dan akumulasi astaxanthin
- c. Ketersediaan Nutrisi: Sumber nitrogen sangat penting untuk pertumbuhan sel, sementara kekurangan nitrogen sering digunakan untuk menginduksi produksi astaxanthin
- d. Salinitas: *H. pluvialis* dapat mentolerir berbagai tingkat salinitas, yang juga dapat bertindak sebagai pemicu stres untuk menginduksi produksi astaxanthin.
- e. Tingkat pH: pH yang stabil diperlukan untuk menjaga stabilitas metabolisme dan kondisi pertumbuhan yang optimal

3. Teknik Budidaya *Haematococcus pluvialis*

Budidaya *H. pluvialis* dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai teknik, termasuk sistem kolam terbuka, fotobioreaktor, dan sistem hibrida yang menggabungkan kedua pendekatan tersebut. Sistem kolam terbuka menawarkan pendekatan yang hemat biaya tetapi rentan terhadap kontaminasi dan fluktuasi lingkungan. Sebaliknya, fotobioreaktor menyediakan lingkungan yang lebih terkendali, memungkinkan produktivitas biomassa dan astaxanthin yang lebih tinggi, tetapi dengan biaya modal dan operasional yang lebih tinggi.

Haematococcus pluvialis adalah mikroalga hijau uniseluler air tawar dan sumber alami astaxanthin yang paling terkenal, pigmen merah-merah muda yang termasuk dalam keluarga xantofil. Dengan mengumpulkan energi dari cahaya, astaxanthin bertindak sebagai agen antioksidan yang kuat, melindungi sel dari sinar matahari berintensitas tinggi dan kerusakan oksidatif (Mascia et al., 2017) Pigmen ini dan teknologi untuk membudidayakan mikroalga telah menarik minat komersial di berbagai bidang, mulai dari aplikasi estetika hingga sektor nutraceutical, kosmetik, dan pakan, dari bidang biomedis hingga kemungkinan aplikasi bioremediasi dan pengolahan air. Signifikansi intensitas cahaya untuk produksi energi akan dipertimbangkan terlebih dahulu, dengan melihat pigmen yang bertanggung jawab untuk menangkap cahaya. Kemudian, jalur biokimia di mana energi cahaya yang ditangkap dikonversi akan disajikan. Bagaimana kondisi lingkungan fotosintesis memodulasi efisiensi kemudian akan dianalisis, dengan fokus pada dampak kualitas cahaya dan pengeringan dan, jika memungkinkan, mengaitkan diskusi dengan detail yang secara eksplisit terkait dengan kasus mikroalga *Haematococcus pluvialis*.

Di antara banyak faktor intrinsik yang secara substansial dapat meningkatkan kemampuan beradaptasi *H. pluvialis* efisiensi fotosintesis di lingkungan yang berbeda, distribusi berbagai pigmen yang terlibat dalam proses penangkapan cahaya disorot. Mikroalga memiliki rentang pigmen yang lebih luas daripada tanaman, satu set aksesoris yang memperluas panjang gelombang cahaya yang diserap dan dapat menjembatani puncak penyerapan klorofil utama. Ketika cahaya yang diserap oleh antena menyisakan terlalu banyak energi dalam pigmen yang terikat pada pusat reaksi, cahaya tersebut ditransfer di antara pigmen ke klorofil di pusat reaksi, yang memicu fiksasi CO₂. Kalsium dan molekul lain yang disintesis atau diambil dapat bertindak sebagai pemadam, menghilangkan daya tarik pigmen aksesoris dan melindungi organisme dari kerusakan akibat cahaya (Nur et al., 2021). Pemanenan cahaya yang efisien melibatkan pengurangan kerusakan yang disebabkan oleh cahaya dan peningkatan hasil tangkapan foton.

Para peneliti telah mengeksplorasi berbagai strategi untuk mengatasi tantangan yang terkait dengan budidaya *H. pluvialis*, seperti menggunakan sistem budidaya dua tahap, mengoptimalkan kondisi pertumbuhan, dan menerapkan teknologi pemanenan dan pemrosesan hilir yang canggih. Berbagai metode budidaya digunakan untuk *H. pluvialis*, termasuk kolam terbuka dan fotobioreaktor (PBR), Fotobioreaktor gelembung mikro, Proses



budidaya dua tahap, Budidaya semi-kontinyu, Strategi budidaya dinamis, dan Reaktor biofilm berputar (Gencer & Turan, 2025; Rizzo et al., 2022).

4. Astaxanthin Production and Harvesting from *Haematococcus pluvialis*

Haematococcus pluvialis adalah mikroalga penghasil astaxanthin alami yang paling banyak dipelajari dan diakui. Mikroalga ini dapat mengakumulasi astaxanthin pada tahap aplanospora (non-motil), yang dipicu oleh tekanan lingkungan seperti intensitas cahaya yang tinggi, kekurangan nutrisi, dan tekanan osmotik. *Chlorella zofingiensis*, di sisi lain, juga dapat memproduksi astaxanthin, tetapi kapasitas produksinya terhalang oleh kepadatan sel yang rendah yang dapat dicapai dalam kultur fotoautotrofik. Meskipun *H. pluvialis* memiliki kandungan astaxanthin intraseluler tertinggi, kekurangan intrinsiknya meliputi tingkat pertumbuhan yang lambat, hasil biomassa yang rendah, dan kebutuhan cahaya yang tinggi (Dong et al., 2014; Ip et al., 2004).

Beberapa strategi telah dieksplorasi untuk meningkatkan ekstraksi astaxanthin dari *H. pluvialis*, termasuk metode gangguan sel yang berbeda dan pelarut ekstraksi. Homogenisasi tekanan tinggi, penggilingan manik-manik, dan ultrasonikasi telah meningkatkan hasil ekstraksi astaxanthin dari sel *H. pluvialis*. Selain itu, pilihan pelarut ekstraksi, seperti pelarut organik, cairan superkritis, dan perawatan enzimatis, dapat secara signifikan memengaruhi efisiensi pemulihan astaxanthin.

Pemanenan biomassa *H. pluvialis* yang efisien sangat penting untuk memaksimalkan hasil astaxanthin dan mengurangi biaya produksi. Beberapa teknik digunakan untuk tujuan ini (Gherabli et al., 2023; Putri et al., 2020):

- Flokulasi: Metode yang banyak digunakan ini melibatkan agregasi sel mikroalga menjadi gumpalan yang lebih besar, yang dapat dengan mudah dipisahkan dari media kultur. Aluminium sulfat (tawas) sangat efektif, dengan konsentrasi optimal 1 g / L, mencapai efisiensi flokulasi 94,5%.
- Filtrasi: Sering digunakan bersama dengan flokulasi, filtrasi memisahkan biomassa yang diflokulasi dari media cair. Metode ini menguntungkan untuk menangani volume besar dan dapat diskalakan.
- Sentrifugasi: Meskipun efektif, sentrifugasi dapat menjadi boros energi dan mahal, sehingga kurang cocok untuk operasi skala besar kecuali jika dikombinasikan dengan metode lain untuk mengurangi biaya.
- Autoflokulasi: Proses ini melibatkan agregasi alami mikroalga tanpa flokulan eksternal, yang disebabkan oleh perubahan kondisi lingkungan seperti pH atau kekuatan ion.
- Elektroteknologi: Kemajuan terbaru telah mengeksplorasi penggunaan medan listrik berdenyut untuk membantu gangguan sel dan meningkatkan pemulihan astaxanthin. Namun, dinding sel yang tebal dari *H. pluvialis* dapat membatasi efisiensi metode ini, sehingga memerlukan pengoptimalan yang cermat.

Teknik pemanenan dan pengeringan yang efektif, seperti flokulasi, sentrifugasi, dan penyaringan membran, sangat penting untuk memekatkan biomassa mikroalga dan memfasilitasi pemrosesan lebih lanjut. Pasca panen dan pengolahan hilir biomassa *H. pluvialis* juga merupakan langkah penting dalam mengkomersialkan astaxanthin.

5. Potensi Astaxanthin dibidang Biomedis

Astaxanthin, pigmen karotenoid yang terjadi secara alami, telah muncul sebagai senyawa yang sangat diminati dalam ilmu biomedis karena sifatnya yang luar biasa dan potensi manfaat kesehatannya. Xantofil ini, yang terutama bersumber dari mikroalga *Haematococcus pluvialis*, telah menarik perhatian karena efek antioksidan, antiinflamasi, dan neuroprotektifnya yang kuat. Seiring dengan penelitian yang terus mengungkap

aktivitas biologisnya yang beragam, astaxanthin menunjukkan harapan dalam mengatasi berbagai masalah kesehatan, mulai dari penyakit kardiovaskular hingga gangguan neurodegeneratif dan kanker.

Struktur kimia astaxanthin adalah kunci kemampuan antioksidannya yang luar biasa. Dengan rumus molekul $C_{40}H_{52}O_4$, astaxanthin mengandung ikatan rangkap terkonjugasi, gugus hidroksil, dan keto yang berkontribusi pada stabilitas kimia dan aktivitas biologisnya (Rajasekar et al., 2019). Struktur unik ini memungkinkan astaxanthin untuk menetralkan radikal bebas dan spesies oksigen reaktif (ROS) secara efektif, melampaui potensi antioksidan antioksidan terkenal lainnya seperti vitamin C, vitamin E, dan β -karoten (Bjørklund et al., 2022). Kemampuan astaxanthin untuk memadamkan oksigen tunggal dan mencegah toksisitas sel yang disebabkan oleh ROS menjadikannya alat yang ampuh dalam memerangi stres oksidatif, kontributor utama berbagai penyakit kronis dan proses penuaan (Fakhri et al., 2019).

Astaxanthin telah menunjukkan potensi yang signifikan dalam kesehatan kardiovaskular. Penelitian telah menunjukkan bahwa ia dapat memengaruhi profil lipid secara positif dengan menurunkan kadar kolesterol total dan LDL sekaligus meningkatkan kadar HDL (Choi et al., 2011). Efek modulasi lipid ini, dikombinasikan dengan kemampuannya untuk mengurangi peradangan dan meningkatkan fungsi endotel, memposisikan astaxanthin sebagai agen yang menjanjikan dalam mencegah dan mengelola penyakit kardiovaskular. Lebih jauh lagi, kapasitasnya untuk mengurangi remodeling kardiovaskular dan mengatur tekanan darah menambah manfaatnya, yang berpotensi menawarkan pendekatan alami untuk menjaga kesehatan jantung.

Sifat neuroprotektif astaxanthin juga telah menjadi subjek penelitian intensif. Kemampuannya untuk melewati sawar darah-otak memungkinkannya untuk memberikan efek perlindungan langsung pada jaringan saraf. Astaxanthin telah menunjukkan janji dalam mengurangi perkembangan penyakit neurodegeneratif seperti Alzheimer, Parkinson, dan sklerosis lateral amiotrofik (ALS) (Si & Zhu, 2022). Dengan mengurangi stres oksidatif dan neuroinflamasi serta mencegah apoptosis neuronal, astaxanthin membantu menjaga fungsi kognitif dan dapat meningkatkan daya ingat dan kesehatan otak secara keseluruhan. Efek neuroprotektif ini meluas ke cedera neurologis akut dan kondisi neurodegeneratif kronis, yang menyoroti keserbagunaannya dalam mengatasi berbagai tantangan neurologis.

Dalam penelitian kanker, astaxanthin telah muncul sebagai sekutu potensial dalam strategi pencegahan dan pengobatan. Sifat antioksidannya membantu melindungi sel dari kerusakan DNA, langkah penting dalam inisiasi kanker. Selain itu, astaxanthin telah menunjukkan kemampuan untuk menginduksi apoptosis pada sel kanker dan menghambat pertumbuhan tumor. Dengan memodulasi jalur pensinyalan utama yang terlibat dalam proliferasi dan kelangsungan hidup sel, astaxanthin menunjukkan harapan dalam meningkatkan kemanjuran terapi kanker konvensional sekaligus berpotensi mengurangi efek sampingnya. Kemampuannya untuk membuat sel kanker peka terhadap agen kemoterapi membuka kemungkinan untuk terapi kombinasi yang dapat meningkatkan hasil pengobatan (Faraone et al., 2020).

Sifat anti-inflamasi astaxanthin semakin berkontribusi pada potensi biomedisnya. Dengan menghambat aktivasi faktor nuklir kappa B (NF- κ B) dan memodulasi jalur inflamasi lainnya, astaxanthin membantu mengurangi produksi sitokin pro-inflamasi (Si & Zhu, 2022). Tindakan anti-inflamasi ini bermanfaat dalam mengelola berbagai kondisi, mulai dari gangguan kulit hingga penyakit radang usus. Sinergi antara efek antioksidan dan anti-inflamasinya menjadikan astaxanthin sebagai senyawa serbaguna dalam mengatasi penyebab mendasar dari banyak penyakit kronis.

Meskipun potensinya menjanjikan, penerapan astaxanthin dalam ilmu biomedis menghadapi beberapa tantangan. Salah satu kendala utamanya adalah bioavailabilitasnya yang rendah karena sifatnya yang lipofilik.



Berbagai upaya tengah dilakukan untuk mengembangkan sistem penghantaran yang canggih, seperti nanoemulsi dan teknik enkapsulasi, untuk meningkatkan penyerapan dan khasiatnya dalam tubuh manusia (Mccall et al., 2018). Selain itu, meskipun banyak penelitian telah menunjukkan manfaat astaxanthin secara in vitro dan pada model hewan, uji klinis yang lebih ekstensif diperlukan untuk menetapkan khasiat dan keamanannya pada populasi manusia sepenuhnya. Tingginya biaya produksi astaxanthin alami juga menghadirkan tantangan, yang mendorong penelitian ke metode budidaya dan ekstraksi yang lebih efisien.

Melihat ke masa depan, potensi astaxanthin dalam ilmu biomedis masih sangat besar dan belum banyak dimanfaatkan. Aplikasi baru kemungkinan akan muncul seiring dengan kemajuan penelitian dalam pemahaman kita tentang mekanismenya

5. Tantangan dan Peluang Produksi Astaxanthin

Astaxanthin, karotenoid antioksidan yang ampuh, baru-baru ini menarik perhatian karena beragam aplikasinya dalam berbagai industri seperti nutraceutical, akuakultur, dan kosmetik. Namun, produksi senyawa berharga ini menghadapi berbagai tantangan yang menghambat aplikasi komersialnya yang meluas. Pada saat yang sama, tantangan ini menghadirkan peluang untuk inovasi dan kemajuan dalam teknik produksi, yang berpotensi merevolusi pasar astaxanthin.

Salah satu tantangan utama dalam produksi astaxanthin adalah tingginya biaya yang terkait dengan budidaya dan ekstraksinya, terutama dari sumber alami seperti mikroalga *Haematococcus pluvialis*. Laju pertumbuhan organisme ini yang lambat dan kebutuhan akan kondisi budidaya tertentu, seperti intensitas cahaya tinggi dan stres nutrisi, membuat proses produksi menjadi tantangan ekonomi (Abdelazim et al., 2023). Selain itu, pemrosesan hilir yang kompleks yang diperlukan untuk mengekstrak astaxanthin dari dinding sel kista kaku *H. pluvialis* semakin menambah biaya produksi (Bauer & Minceva, 2021). Kendala ekonomi ini telah menyebabkan ketergantungan pada alternatif sintesis, yang lebih hemat biaya tetapi kurang disukai oleh konsumen yang mencari bahan alami (Abdelazim et al., 2023).

Tantangan teknis dan biologis juga mengganggu produksi astaxanthin. Proses budidaya rentan terhadap kontaminasi dan memerlukan kontrol kondisi lingkungan yang tepat, sehingga mempersulit produksi skala besar. Selain itu, inefisiensi enzim heterolog dan kompleksitas jalur biosintesis pada produsen non-asli menimbulkan kendala signifikan untuk meningkatkan hasil. Keberlanjutan lingkungan menjadi perhatian lain, karena budidaya mikroalga membutuhkan sumber daya air dan energi yang besar, yang berpotensi menyebabkan dampak lingkungan yang signifikan dalam produksi skala besar (Kumar et al., 2022).

Meskipun ada tantangan ini, ada banyak peluang untuk inovasi dan peningkatan produksi astaxanthin. Kemajuan dalam rekayasa genetika dan biologi sintesis menawarkan solusi potensial dengan meningkatkan hasil dan efisiensi biosintesis astaxanthin pada organisme asli dan non-asli (Abdelazim et al., 2023). Inovasi dalam desain fotobioreaktor dan teknik budidaya, seperti teknologi nanobubble, dapat meningkatkan skalabilitas dan efektivitas biaya produksi mikroalga (Kumar et al., 2022). Lebih jauh lagi, mengeksplorasi metode ekstraksi baru, seperti kromatografi cair-cair, dapat mengurangi kebutuhan energi dan biaya dari proses hilir (Bauer & Minceva, 2021).

Potensi pasar astaxanthin sangat besar, dengan proyeksi yang menunjukkan pertumbuhan dari USD 927,21 juta pada tahun 2023 menjadi USD 5.329,18 juta pada tahun 2033 dengan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) sebesar 19,11%. Pertumbuhan ini didorong oleh meningkatnya kesadaran konsumen akan manfaat kesehatan astaxanthin dan perluasan aplikasi di berbagai industri. Penelitian dan pengembangan yang

berkelanjutan sangat penting untuk memanfaatkan peluang ini guna mengatasi tantangan produksi saat ini. Dengan berfokus pada metode produksi yang berkelanjutan dan efisien, seperti menggunakan foto-bioreaktor dan mengintegrasikan produksi astaxanthin ke dalam model bioekonomi sirkular, industri ini dapat memenuhi permintaan global yang terus meningkat akan senyawa berharga ini. Seiring kemajuan teknologi yang terus mengatasi tantangan dalam produksi astaxanthin alami, potensi masa depan yang lebih berkelanjutan dan sadar kesehatan di pasar ini menjadi semakin dapat dicapai (Mussagy et al., 2023).

KESIMPULAN

Sebagai kesimpulan, astaxanthin dari *Haematococcus pluvialis* berada di garis depan terapi alami, menawarkan spektrum manfaat biomedis yang luas. Ulasan ini menggarisbawahi potensi senyawa tersebut dalam mengobati gangguan neurodegeneratif, kondisi inflamasi, kanker, dan penyakit kardiovaskular. Meskipun ada tantangan dalam produksi massal dan bioavailabilitas, kemajuan dalam proses bioteknologi menjanjikan untuk mengatasi rintangan ini. Penelitian di masa mendatang harus difokuskan pada pengembangan metode budidaya dan ekstraksi yang lebih efisien dan sistem pengiriman baru yang meningkatkan utilitas klinis. Merangkul tantangan ini akan menjadi penting dalam memanfaatkan potensi penuh astaxanthin dan menerjemahkan sifat-sifatnya yang luar biasa menjadi solusi terapeutik yang efektif.

REFERENSI

- Abdelazim, K., Ghit, A., Assal, D., Dorra, N., Noby, N., & Khattab, S. N. (2023). Production and therapeutic use of astaxanthin in the nanotechnology era. *Pharmacological Reports*, 75(4), 771–790. <https://doi.org/10.1007/s43440-023-00488-y>
- Azli, R., Mokhtar, M., Shapawi, R., & Huda, N. (2021). *Haematococcus pluvialis* as a Potential Source of Astaxanthin with Diverse Applications in Industrial Sectors: Current Research and Future Directions. *Molecules*, 26(21), 6470. <https://doi.org/doi:10.3390/molecules26216470>
- Bauer, A., & Minceva, M. (2021). Techno - economic analysis of a new downstream process for the production of astaxanthin from the microalgae *Haematococcus pluvialis*. *Bioresources and Bioprocessing*, 8, 111. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00463-6>
- Bjørklund, G., Gasmi, A., Lenchyk, L., Shanaida, M., Zafar, S., Mujawdiya, P. K., Lysiuk, R., Antonyak, H., Noor, S., & Akram, M. (2022). The Role of Astaxanthin as a Nutraceutical in Health and Age-Related Conditions. *Molecules*, 27, 7167. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules27217167>
- Choi, H. D., Youn, Y. K., & Shin, W. G. (2011). Positive Effects of Astaxanthin on Lipid Profiles and Oxidative Stress in Overweight Subjects. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(4), 363–369. <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0258-9>
- Dong, S., Huang, Y., Zhang, R., Wang, S., & Liu, Y. (2014). Four Different Methods Comparison for Extraction of Astaxanthin from Green Alga *Haematococcus pluvialis*. *The Scientific World Journal*, 2014(694305). <https://doi.org/10.1155/2014/694305>
- Fakhri, S., Aneva, I. Y., & Farzaei, M. H. (2019). The Neuroprotective Effects of Astaxanthin: Therapeutic Targets and Clinical Perspective. *Molecules*, 24, 2640. <https://doi.org/doi:10.3390/molecules24142640>
- Faraone, I., Sinisgalli, C., Ostuni, A., Francesca, M., Carosino, M., Milella, L., Russo, D., Labanca, F., & Khan, H. (2020). Astaxanthin anticancer effects are mediated through multiple molecular mechanisms: A systematic review. *Pharmacological Research*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.104689>
- Gencer, Ö., & Turan, G. (2025). Enhancing biomass and lipid productivities of *Haematococcus pluvialis* for industrial raw materials products. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 18(8). <https://doi.org/10.1186/s13068-025-02604-x>
- Gherabli, A., Grimi, N., Lemaire, J., & Lebovka, N. (2023). Extraction of Valuable Biomolecules from the



- Microalga. *Molecules*, 28, 2089. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules28052089>
- Hu, Q., Huang, D., Li, A., Hu, Z., Gao, Z., Yang, Y., & Wang, C. (2021). Transcriptome-based analysis of the effects of salicylic acid and high light on lipid and astaxanthin accumulation in *Haematococcus pluvialis*. *Biotechnology for Biofuels*, 14(82), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01933-x>
- Ip, P., Wong, K., & Chen, F. (2004). Enhanced production of astaxanthin by the green microalga *Chlorella zofingiensis* in mixotrophic culture. *Process Biochemistry*, 39, 1761–1766. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.08.003>
- Jannel, S., Caro, Y., Bermudes, M., & Petit, T. (2020). Novel Insights into the Biotechnological Production of *Haematococcus pluvialis* -Derived Astaxanthin : Advances and Key Challenges to Allow Its Industrial Use as Novel Food Ingredient. *Journal of Marine Science and Engineering Review*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/jmse8100789>
- Kumar, A., Sunil, V., Chen, C., Singh, A., Kumar, P., Pralhad, A., Huang, C., Dong, C., & Rani, R. (2022). Recent advancements in astaxanthin production from microalgae : A review. *Bioresource Technology*, 364(2022), 128030. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128030>
- Mascia, F., Girolomoni, L., Alcocer, M. J. P., Bargigia, I., Cazzaniga, S., Cerullo, G., Andrea, C. D., & Ballottari, M. (2017). Functional analysis of photosynthetic pigment binding complexes in the green alga *Haematococcus pluvialis* reveals distribution of astaxanthin in Photosystems. *Scientific Reports*, 7, 16319. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16641-6>
- Mccall, B., Mcpartland, C. K., Moore, R., Frank-kamenetskii, A., & Booth, B. W. (2018). Effects of Astaxanthin on the Proliferation and Migration of Breast Cancer Cells In Vitro. *Antioxidants*, 7(135), 1–8. <https://doi.org/10.3390/antiox7100135>
- Mularczyk, M., Michalak, I., & Marycz, K. (2020). Astaxanthin and other Nutrients from *Haematococcus pluvialis*—Multifunctional Applications. *Marine Drugs*, 18(9), 459.
- Mussagy, C. U., Kot, A., Dufossé, L., Gonçalves, C. N. D. P., Pereira, J. F. B., Santos, V. C., Vijaya, E., Adalberto, R., & Jr, P. (2023). Microbial astaxanthin : from bioprocessing to the market recognition. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(13), 4199–4215. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12586-1>
- Nur, S., Oslan, H., Shoparwe, N. F., Yusoff, A. H., Rahim, A. A., Chang, C. S., Tan, J. S., Oslan, S. N., Arumugam, K., Ariff, A. Bin, Sulaiman, A. Z., & Mohamed, M. S. (2021). A Review on *Haematococcus pluvialis* Bioprocess Optimization of Green and Red Stage Culture Conditions for the Production of Natural Astaxanthin. *Biomolecules*, 11(2), 256. <https://doi.org/10.3390/biom11020256>
- Octarya, Z., Nugroho, T. T., Nurulita, Y., & Saryono. (2022). Molecular Identification, GC-MS Analysis of Bioactive Compounds and Antimicrobial Activity of Thermophilic Bacteria Derived from West Sumatra Hot-Spring Indonesia. *HAYATI Journal of Biosciences*, 29(4), 549–561. <https://doi.org/10.4308/hjb.29.4.549-561>
- Putri, D. S., Sari, D. A., & Zuhdia, L. D. (2020). Flocculants Optimization In Harvesting Freshwater Microalgae *Haematococcus pluvialis*. *Jurnal Kimia Riset*, 5(1), 49–54.
- Rajasekar, J., Kumar, M., & Vallikannan, B. (2019). A critical review on anti-angiogenic property of phytochemicals. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 71, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2019.04.006>
- Ren, Y., Deng, J., Huang, J., Wu, Z., & Yi, L. (2021). Using green alga *Haematococcus pluvialis* for astaxanthin and lipid co-production : Advances and outlook. *Bioresource Technology*, 340, 125736. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125736>
- Rizzo, A., Ross, M. E., Norici, A., & Jesus, B. (2022). A Two-Step Process for Improved Biomass Production and Non-Destructive Astaxanthin and Carotenoids Accumulation in *Haematococcus pluvialis*. *Applied Sciences*, 12(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app12031261>
- Si, P., & Zhu, C. (2022). Biological and neurological activities of astaxanthin (Review). *Molecular Medicine Reports*, 26(300). <https://doi.org/10.3892/mmr.2022.12816>