

PELUANG DAN TANTANGAN PENGEMBANGAN SENYAWA ASTAXANTHIN DAN BENTUK ESTERNYA UNTUK Mendukung KETAHANAN PANGAN NASIONAL

OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN DEVELOPING ASTAXANTHIN AND THEIR ESTERIFIED COMPOUNDS TO SUPPORT NATIONAL FOOD SECURITY

Agus Takariyawati¹, Fatimah Azzahra^{2*}, Zaenab³, M. Yusuf Samad⁴

¹DINAS KETAHANAN PANGAN PROVINSI SULAWESI SELATAN

²UNIVERSITAS INDONESIA

³LEMBAGA KETAHANAN NASIONAL REPUBLIK INDONESIA

⁴UNIVERSITAS HASANUDDIN

(agustakariyawati65@gmail.com, fatimah.azzahra23@ui.ac.id, zaenab.pkt@gmail.com, ahmadyusad@gmail.com)

*Corresponding Author

Abstrak—Ketahanan pangan merupakan isu multidimensi kompleks yang berperan dalam kesehatan masyarakat. Pilar yang mendukung ketahanan pangan nasional meliputi ketersediaan, aksesibilitas, dan pemanfaatan pangan, termasuk mengembangkan kualitas pangan untuk kesehatan masyarakat/sumber daya manusia. Astaxanthin, senyawa bioaktif yang ditemukan pada krustasea, ikan, dan mikroalga serta bentuk esternya, memiliki manfaat kesehatan signifikan dan berpotensi meningkatkan kualitas pangan masyarakat melalui fortifikasi. Namun, hingga kini, kajian komprehensif mengenai peluang dan tantangan pengembangan astaxanthin dalam konteks ketahanan pangan masih terbatas. Riset ini bertujuan mengulas aplikasi senyawa astaxanthin dan bentuk esternya dengan menjabarkan hal-hal yang berkaitan dengan sumber bahan, aplikasi dalam formulasi pangan fungsional, peluang, dan tantangan sebagai senyawa fortifikasi pangan untuk meningkatkan ketahanan pangan. Penelitian ini merupakan *literature review* dengan menggunakan studi pustaka yang relevan berdasarkan pencarian kata kunci yang sesuai dengan topik pembahasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa senyawa astaxanthin dan bentuk esternya telah diformulasi sebagai pangan fungsional untuk menunjang kesehatan serta dapat dimanfaatkan sebagai antioksidan alami dalam produk dan meningkatkan nutrisi pada pangan hewani. Tantangan utama pengembangan astaxanthin meliputi tingginya biaya produksi, stabilitas senyawa, serta bioavailabilitasnya dalam formulasi. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan astaxanthin dalam konteks ketahanan pangan yang memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat dan mendukung ketahanan pangan nasional.

Kata Kunci: Astaxanthin, ketahanan pangan, pangan, peluang, tantangan

Abstract—Food security is a complex multidimensional issue that plays a role in public health. The pillars that support national food security include the availability, accessibility, and utilization of food, including developing food quality for public health/human resources. Astaxanthin, a bioactive compound found in crustaceans, fish, and microalgae, and its ester form, has significant health benefits and the potential to improve the quality of community food through fortification. However, until now, comprehensive studies on the opportunities and challenges of astaxanthin development in the context of food security are still limited. This research aims to review the application of astaxanthin compounds and their ester forms by describing the source of materials, applications in functional food formulations, opportunities, and challenges as food fortification compounds to improve food security. This literature review was based on relevant studies related to the discussion topic. The study results

indicate that astaxanthin compounds and their ester forms have been formulated as functional foods to support health. They can be used as natural antioxidants in products and increase nutrition in animal foods. The main challenges in astaxanthin development include high production costs, compound stability, and bioavailability in formulations. This research contributes to the development of astaxanthin in the context of food security, which has great potential to improve the community's quality of life and support national food security.

Keywords: Astaxanthin, Food Security, Food, Opportunities, Challenges.

Pendahuluan

Ketahanan pangan merupakan isu multiaspek yang komprehensif (Suryana, 2023). Sebagai salah satu isu global, *Food and Agriculture Organization* (FAO) mendukung pengembangan kapasitas pemerintah dan masyarakat dalam menghadapi tantangan ketahanan pangan dan gizi (Berek, 2018). Ketahanan pangan adalah salah satu tujuan prioritas sekaligus berfungsi sebagai komponen pembangunan (Simatupang, 2007).

Ketahanan pangan bukan sekadar masalah ketersediaan pangan, melainkan juga menyangkut akses dan pemanfaatannya, yang dikenal sebagai pilar ketahanan pangan (Badan Pangan Nasional, 2023; Suryana, 2023). Sedangkan faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan pangan ada empat, yaitu faktor ketersediaan pangan, faktor sosial-ekonomi, faktor dampak kesehatan, dan faktor fisik alam (Hapsari & Rudiarto, 2017).

Sejumlah senyawa tertentu digunakan untuk mendukung ketahanan

pangan (Saleh & Widodo, 2008), salah satunya adalah astaxanthin (AX). Astaxanthin, yang juga dikenal sebagai 'king of carotenoids' (raja karotenoid) umumnya diperoleh dari mikroorganisme dan hewan laut (*marine animals*), dan memiliki manfaat kesehatan yang beragam (Ambati et al., 2014). Di antara pemanfaatan astaxanthin adalah sebagai pangan fungsional, suplemen makanan, hingga obat tradisional (Sun et al., 2023).

Informasi tentang potensi kesehatan astaxanthin membuat penelitian terkait astaxanthin semakin meningkat baru-baru ini (Nishida et al., 2023). Selain itu, proyeksi pendapatan menunjukkan bahwa pasar astaxanthin diharapkan mencapai USD 965 juta hingga USD 3200 juta pada tahun 2026. Proyeksi tingkat pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) untuk astaxanthin berkisar antara 8% hingga 16%, menjadikan pengembangan senyawa astaxanthin, beserta turunannya maupun bentuk esternya, menarik untuk dikaji (Nishida et al., 2023).

Oleh sebab itu, riset ini mengulas aplikasi senyawa astaxanthin dan bentuk esternya dengan menjabarkan hal-hal yang berkaitan dengan sumber bahan, aplikasi dalam formulasi pangan fungsional, serta peluang, dan tantangan sebagai senyawa fortifikasi pangan untuk meningkatkan ketahanan pangan nasional.

Metode Penelitian

Studi ini menggunakan metode *literature review* dengan kajian pustaka yang relevan dengan topik pembahasan. *Literature review* ini diawali dengan pembuatan *outline* atau pokok bahasan yang akan ditelusuri menggunakan mesin pencari daring. Pencarian literatur pada mesin pencari seperti *Google Scholar* menggunakan kata kunci yang relevan seperti ‘ketahanan pangan (*food security*)’, ‘penggunaan astaxanthin dalam makanan (*usage/application of astaxanthin in food*)’, ‘sumber astaxanthin (*source of astaxanthin*)’, ‘tantangannya aplikasi astaxanthin sebagai makanan (*challenges of astaxanthin application as food*)’, ‘beberapa formulasi astaxanthin terkini dalam makanan (*current formulation of astaxanthin in food*)’

menggunakan bahasa Indonesia dan bahasa Inggris.

Setelah beberapa artikel yang sesuai diperoleh, dilakukan analisis untuk mengaitkan peluang dan tantangan astaxanthin terhadap ketahanan pangan. Dalam pencarian, tidak dikhususkan penyebutan ‘bentuk ester’ dari astaxanthin karena pencarian dengan tema astaxanthin lebih umum dan mencakup bentuk lainnya, baik turunannya maupun bentuk esternya.

Hasil dan Pembahasan

Sumber Astaxanthin

Astaxanthin dapat dihasilkan oleh beberapa organisme, baik akuatik seperti *Haematococcus pluvialis* dan krustasea maupun nonakuatik seperti *Adonis sp.* dan ragi (Gómez-Estaca et al., 2017). Penghasil astaxanthin antara lain alga *Haematococcus pluvialis*, ragi *Phaffia rhodozyma* *Xanthophyllomyces dendrorhous*, limbah krustasea seperti udang, bakteri *Bacillus circulans*, *Agrobacterium aurantiacum* serta beberapa tanaman seperti *Adonis sp.* Beberapa sumber dan persentase astaxanthin yang dapat diperoleh ditunjukkan pada Tabel 1.

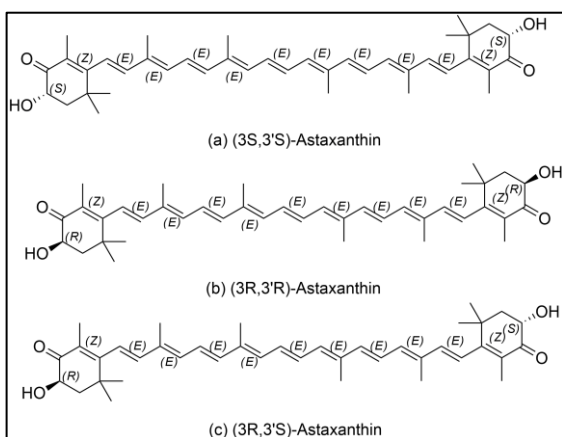
Tabel 1. Sumber astaxanthin dari beberapa spesies potensial di Indonesia dan kandungannya

Sumber	Bentuk astaxanthin	Jumlah Astaxanthin (mg/100 g)
--------	--------------------	-------------------------------

<i>Haematococcus pluvialis</i> (alga)	Teresterifikasi asam lemak	3,800 dalam bobot kering
<i>Chlorella zofingiensis</i> (alga)	Teresterifikasi asam lemak	680
<i>Octopus vulgaris</i> (gurita)	Bentuk bebas dan teresterifikasi asam lemak	3,2 di hati
<i>Pomacea canaliculata</i> (keong Pomacea)	Bentuk bebas	5,0 dalam gonad, 2,31 dalam telur
<i>Penaeus semisulcatus</i> (udang pama)	Bentuk bebas dan teresterifikasi asam lemak	Sekitar 15,6 dinyatakan dalam carapace
<i>Penaeus monodon</i> (udang windu)	Bentuk bebas dan teresterifikasi asam lemak	Sekitar 7,3 dinyatakan dalam carapace
<i>Litopenaeus vannamei</i> (udang vaname)	Bentuk bebas dan teresterifikasi asam lemak	Sekitar 5,8 dinyatakan dalam carapace
<i>Carassius auratus</i> (ikan mas)	Bentuk bebas dan teresterifikasi asam lemak	0,58 seluruh tubuh

Sumber: Ambati et al., 2014; Nishida et al., 2023

Bentuk Ester dan Isomer Astaxanthin



Gambar 1. Perbedaan bentuk isomer optik astaxanthin.

Sumber: Diolah oleh peneliti, 2024

Astaxanthin terdapat secara alami baik dalam bentuk tidak teresterifikasi (misalnya pada ragi) maupun

teresterifikasi (misalnya pada alga). Pada *H. pluvialis*, astaxanthin ditemukan terutama dalam bentuk teresterifikasi sebagai monoester yang terikat pada asam lemak rantai pendek. Sekitar 70% dari kumpulan astaxanthin *H. pluvialis* yang memiliki enzim pembentuk adalah monoester, 25% diester, dan 5% astaxanthin bebas, terutama dalam bentuk 3S,3S' (Todorović et al., 2021). Bentuk bebas astaxanthin relatif jarang, dan sebagian besar astaxanthin diesterifikasi oleh satu atau dua asam lemak.

Tabel 2. Jenis sumber dan bentuk isomer optik astaxanthin yang terkandung

No	Jenis Sumber	Contoh sumber	Bentuk Isomer optik
1.	Bakteri	<i>Paracoccus carotinifaciens</i>	3S, 3'S
2.	Khamir/ragi	<i>Xanthophyllomyces dendrorhous</i>	3R, 3'R
3.	Alga	<i>Haematococcus pluvialis</i>	3S, 3'S
4.	Krustasea	Udang, lobster	3R, 3'R dan 3S, 3'S
5.	Ikan	<i>Salmo salar</i>	3R, 3'R; 3S, 3'S; dan 3R, 3'RS
6.	Astaxanthin sintetis	-	3R, 3'R; 3S, 3'S; dan 3R, 3'S

Sumber: Ambati et al., 2014; Sun et al., 2023

Saat ini, hanya sejumlah kecil spesies, seperti *Phaffia rhodozyma*, beberapa ikan laut, dan *Paracoccus carotinifaciens*, yang menghasilkan astaxanthin bebas. Dalam mikroalga, isomer teresterifikasi (3S, 3'S) adalah bentuk dominan astaxanthin yang diekstraksi dari *Haematococcus pluvialis*. Di bawah kondisi stres nitrogen atau fosfat, *H. pluvialis* memiliki kemampuan yang kuat untuk mengakumulasi astaxanthin teresterifikasi yang dianggap sebagai sumber astaxanthin terbaik. *Chlorella zofingiensis*, *Chlorococcum*, dan *Chlamydomonas nivalis* juga dapat menghasilkan ester astaxanthin (Sun et al., 2023).

Berdasarkan peran multifungsi astaxanthin, bentuk ester dilaporkan menunjukkan aktivitas antioksidan yang lebih tinggi daripada bentuk non-esterifikasi dalam percobaan in vitro. Sebuah

studi yang membandingkan efek anti-tumor dari bentuk esterifikasi dan non-esterifikasi dalam model kanker kulit pada tikus melaporkan aktivitas bentuk esterifikasi yang lebih tinggi (Aoi et al., 2018).

Berdasarkan studi, secara umum, penyerapan karotenoid in vivo diketahui lebih baik dalam bentuk esterifikasi daripada dalam bentuk non-esterifikasi. Misalnya, 3R,3'R-zeaxanthin dipalmitat memiliki bioavailabilitas yang lebih tinggi daripada bentuk non-esterifikasi. Selain itu, astaxanthin yang diaplikasikan dengan teknologi penghantaran molekuler, seperti enkapsulasi, juga dapat memiliki efek penangkal yang kuat terhadap berbagai ROS. Kerusakan kulit yang disebabkan oleh sinar ultraviolet dapat dicegah dengan lebih efektif melalui pemberian astaxanthin liposomal transdermal daripada astaxanthin non-liposomal (Aoi et al., 2018).

Tabel 3. Perbedaan stereoisomer astaxanthin terhadap efeknya

Stereoisomer	Lokalisasi	Bioavailabilitas	Bioaktivitas
3S, 3'S	Mitokondria, dalam membran	tinggi	<ul style="list-style-type: none"> – Anti-oksidan – Anti-inflamasi – Memfasilitasi fungsi mitokondria – Memperkuat imun – Untuk fertilitas – Proteksi UV – Pewarna untuk makanan ikan/hewan
3R, 3'S	Mengambang bebas pada sel	rendah	<ul style="list-style-type: none"> – Anti-oksidan – Pewarna untuk makanan ikan/hewan
3R, 3'R	Mengambang bebas pada sel	rendah	<ul style="list-style-type: none"> – Anti-oksidan – Pewarna untuk makanan ikan/hewan

Sumber: Buesen et al., 2015; Snell & Carberry, 2022

Stereoisomer yang berbeda juga ditunjukkan antara astaxanthin alami dan sintetis. Perbedaan keduanya terletak pada orientasi stereokimianya. Astaxanthin sintetis adalah campuran dari tiga bentuk isomer dengan 50% bentuk 3S, 3'R dengan perbandingan 3R, 3'R; 3S, 3'R; 3S, 3'S yaitu 1:2:1, sedangkan yang alami perbandingannya 1:2:22, sehingga astaxanthin alami dari mikroalga mayoritas dalam bentuk 3S, 3'S. Bentuk astaxanthin 3S, 3'S dilaporkan memberikan pigmentasi yang lebih kuat pada *rainbow trout* daripada bentuk lain, dan karena itu lebih disukai sebagai aditif pakan untuk budidaya ikan (Liu et al., 2014; Villaró et al., 2021).

Studi lain menunjukkan bahwa astaxanthin sintetis umumnya tidak

dalam bentuk ester, sedangkan astaxanthin alami 95% dalam bentuk teresterifikasi (Villaró et al., 2021).

Pemerintah Uni Eropa dalam *EU Regulation* (EC) No. 1925/2006 tentang penambahan vitamin, mineral dan zat lain pada makanan tidak mengizinkan penggunaan astaxanthin sintetis pada makanan (Stachowiak & Szulc, 2021). Astaxanthin sintetis di AS juga tidak memiliki status *General Regarded as Safe* (GRAS) atau telah diakui aman secara umum. Komposisinya berbeda dengan komposisi astaxanthin alami. Namun, tidak ada penelitian yang menunjukkan bahwa astaxanthin sintetis mungkin berbahaya bagi manusia atau hewan.

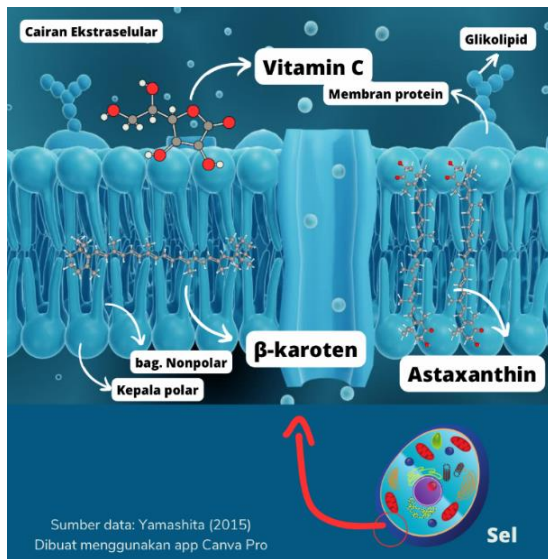
Keunggulan Astaxanthin

Astaxanthin dan turunannya merupakan antioksidan yang unik karena memiliki tiga karakter unik (Yamashita, 2013), yaitu:

1. Aktivitas astaxanthin kira-kira 10 kali lebih kuat daripada karotenoid lain yang diuji, yaitu zeaxanthin, lutein, tunaxanthin, canthaxanthin, dan β -karoten, dan 100 kali lebih besar daripada tokoferol (Nishida et al., 2007). Fungsi penting dari karotenoid adalah untuk mencegah keadaan triplet klorofil, untuk mencegah pembentukan oksigen singlet, atau untuk *scavenging* molekul singlet oksigen $^1\text{O}_2$ secara langsung (Martin et al., 1999). Di antara dua puluh tujuh antioksidan hidrofilik dan lipofilik umum seperti polifenol, tokoferol, karotenoid, asam askorbat, koenzim Q10 dan asam α -lipoat, astaxanthin menunjukkan aktivitas singlet oxygen *quenching* ($^1\text{O}_2$) terkuat di bawah kondisi uji yang sama (Nishida et al., 2007). Kemampuan *scavenging* radikal hidroksil dari astaxanthin yang dienkapsulasi dalam liposom lebih kuat daripada α -tocopherol (Fukuzawa et al., 1998).
2. Astaxanthin diklasifikasikan sebagai “antioksidan murni” yang tidak

memiliki sifat pro-oksidatif seperti β -karoten dan likopen (Martin et al., 1999). Karotenoid non-polar seperti likopen dan β -karoten berada di dalam atau luar membran bilayer yang diperkaya dengan asam lemak tak jenuh ganda dan menunjukkan efek pro-oksidan yang kuat ($> 85\%$ peningkatan kadar lipid hidroperoksida (LOOH)) sementara astaxanthin mempertahankan struktur membran dan menunjukkan aktivitas antioksidan yang signifikan (40% penurunan tingkat LOOH) (McNulty et al., 2007) seperti ditunjukkan Gambar 2.

3. Aktivitas antioksidan astaxanthin yang efisien diperkirakan disebabkan oleh struktur unik dari bagian cincin terminal (Goto et al., 2001). Gambar 2 menunjukkan kemampuan unik astaxanthin untuk menembus membran sel bilayer. β -karoten dan vitamin C masing-masing hanya berada di dalam dan di luar membran lipid bilayer, sedangkan molekul astaxanthin terpapar baik di dalam maupun di luar sel, memberikan sifat perlindungan yang menyeluruh.



Gambar 3. Kemampuan astaxanthin (3S,3'S) untuk menjangkau membran sel bilayer.
 Sumber: Diolah kembali dari Yamashita, 2015

Vitamin C dan β -karoten masing-masing hanya berada di dalam dan di luar membran lipid bilayer. Karena molekul astaxanthin berada baik di dalam maupun di luar sel, hal ini memberikan perlindungan keseluruhan yang lebih baik.

Aplikasi Astaxanthin Pada Formulasi Pangan Fungsional

Sejak awal 1950-an, mikroalga telah digunakan oleh manusia sebagai salah satu bahan tambahan makanan (Kusmayadi et al., 2021). Strain mikroalga yang sering digunakan untuk konsumsi manusia, yaitu *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Schizochytrium*, dan *Spirulina* dikategorikan sebagai GRAS oleh *US Food and Drug Administration*.

Mikroalga ini disukai sebagai bahan tambahan dalam makanan karena kaya nutrisi dan mengandung bioaktif lainnya yang diharapkan dapat meningkatkan kesehatan.

Bukan hanya itu, makanan atau suplemen makanan juga difortifikasi dengan beberapa mikroalga untuk meningkatkan kualitas makanan tersebut, seperti roti, biskuit, permen, minuman, dan lainnya, yang ditujukan untuk mengatasi masalah kurang gizi, terutama di negara berkembang (Kusmayadi et al., 2021). Produk paling umum yang mengandung mikroalga yang dikomersialkan adalah makanan ringan, makanan yang dipanggang, dan minuman. Namun, sebagian besar biomassa mikroalga yang saat ini dikomersialkan dijual sebagai suplemen makanan dalam bentuk kapsul atau bubuk kering (Villaró et al., 2021). Salah satu contoh pemanfaatan astaxanthin yang berasal dari *Haematococcus pluvialis* adalah dalam bentuk kue kering, yang hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi astaxanthin dengan tepung gandum secara signifikan meningkatkan sifat antioksidan kue kering (Hossain et al., 2017).

Dang et al. (2024) telah mengulas pula aplikasi astaxanthin sebagai antioksidan alami dalam makanan, seperti pada formula kue kering yang ditambahkan 10-20% astaxanthin, yang dapat menstabilkan oksidasi lipid dalam kue. Pada produk surimi udang siap saji, penambahan 30 g/kg astaxanthin memberikan efek antioksidan dalam formula yang meningkat, begitupula dari sisi estetika berupa warna yang cerah. Bubuk astaxanthin 0,5-1 % b/b dapat meningkatkan stabilitas oksidatif lipid dan warna bakso.

Selain pada pangan, aplikasi astaxanthin pada pakan hewan dapat meningkatkan kualitas pangan hewani yang diperoleh. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, misalnya pada *rainbow trout*, suplementasi astaxanthin sebagai pakan dapat meningkatkan kualitas warna dan dagingnya. Begitu pula pada udang, broiler, telur, atau ikan yang disuplementasi atau ditambahkan astaxanthin meningkatkan kualitas daging atau nutrisi, menambah masa simpan, serta memiliki aktivitas antioksidan yang lebih baik (Dang et al., 2024)

Dalam formulasi pangan fungsional, formulasi astaxanthin dalam sistem nanoemulsi dapat meningkatkan

bioavailabilitas astaxanthin, sehingga memaksimalkan manfaat kesehatan. Selain itu, para peneliti mencoba berbagai cara untuk membuat nanoemulsi astaxanthin yang stabil dan efektif, seperti menggunakan bahan alami sebagai penstabil dan mengoptimalkan kondisi pembuatan. Umumnya, pembuatan nanoemulsi ini adalah untuk meningkatkan stabilitas atau bioavailabilitas astaxanthin sebab bentuk nanoemulsi umumnya lebih stabil daripada emulsi konvensional (Huang et al., 2021; Shu et al., 2018).

Selain sistem nanoemulsi, enkapsulasi astaxanthin meningkatkan stabilitas penyimpanan produk, terutama stabilitas terhadap sinar ultraviolet. Karena manfaat kesehatan dari mengonsumsi astaxanthin, pigmen ini dapat digunakan untuk formulasi pangan fungsional yang dijual dengan harga lebih tinggi namun tetap meningkatkan minat konsumen, terutama makanan yang mengandung bahan laut (Villaró et al., 2021).

Tantangan dan Peluang Pengembangan Astaxanthin dan Bentuk Esternya dalam Ketahanan Pangan Nasional

Salah satu tantangan terkait astaxanthin alami, yang memiliki begitu

banyak potensi kesehatan, adalah terkait panen biomassanya dalam skala besar. Tingginya biaya produksi astaxanthin alami serta beberapa masalah teknologi, yang umum terjadi pada semua produk turunan mikroalga, saat ini membatasi produksi massal bahan ini. Misalnya, biaya produksi astaxanthin alami menggunakan mikroalga *H. pluvialis* di Uni Eropa adalah sekitar 1.500 €·kg⁻¹ atau sekitar Rp 24.308.488,68 di Yunani dan 6.400 €·kg⁻¹ atau sekitar Rp 103.716.218,37 di Belanda, sedangkan biaya produksi astaxanthin sintetis sekitar 880 €·kg⁻¹ atau sekitar Rp 14.260.980,03. Oleh karena itu, astaxanthin alami tidak dapat bersaing dalam hal biaya untuk aplikasi makanan. Namun, astaxanthin sintetis tidak dapat digunakan sebagai makanan di Uni Eropa dan Amerika Serikat. Akhirnya

astaxanthin alami yang diproduksi di Uni Eropa dan Amerika Serikat menjadi satu-satunya bahan yang diizinkan untuk makanan serta pilihan yang lebih disukai untuk konsumen kelas atas (Villaró et al., 2021).

Namun, studi terbaru di China memperkirakan biaya produksi astaxanthin alami bisa ditekan hingga 610 €·kg⁻¹ atau Rp 9.885.452,06. Hal ini menggembirakan karena nilai tersebut memungkinkan proses mikroalga bersaing dengan alternatif sintetis. Studi lain juga menyebutkan bahwa proses disinfeksi dari fotobioreaktor dapat menekan kontaminasi, sehingga memaksimalkan kultivasi skala besar di luar ruangan (Li et al., 2011). Belakangan, para peneliti juga mulai mengembangkan metode rekayasa genetik untuk produksi astaxanthin (Xie et al., 2024).

Tabel 4. Perbandingan harga produksi astaxanthin di berbagai negara

Sumber astaxanthin	Negara	Estimasi biaya (€·kg ⁻¹ / Rp kg ⁻¹)
Alami	Yunani	(1.500 / 24.308.488,68)
Alami	Belanda	6.400 / 103.716.218,37
Alami	China	610 / 9.885.452,06
Sintetis	-	880 / 14.260.980,03

Sumber: Villaró et al., 2021

Mikroalga *C. zofingiensis* juga dapat digunakan sebagai bahan baku produksi

astaxanthin dan memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan *H.*

pluvialis (Villaró et al., 2021). Sebagai contoh, pertumbuhan *C. zofingiensis* lebih cepat dan dapat mencapai konsentrasi biomassa yang lebih tinggi serta dapat diproduksi secara fototrofik, heterotrofik, dan mixotropik (Liu et al., 2014). Produksi heterotrofik *C. zofingiensis* memungkinkan mencapai konsentrasi biomassa yang lebih tinggi. Namun, kandungan astaxanthin yang dicapai saat memproduksi biomassa secara heterotrof umumnya sekitar 1 mg·g⁻¹ (Y. Wang & Peng, 2008).

Salah satu keunggulan *C. zofingiensis* adalah strain ini dapat diproduksi dalam satu tahapan saja, meskipun proses dua tahap juga telah dikembangkan. Dalam hal ini, prosesnya terdiri dari tahap fermentasi awal yang memungkinkan tercapainya kepadatan sel yang sangat tinggi, mendekati 100 g·L⁻¹, dan tahap kedua, di mana kandungan astaxanthin sel ditingkatkan dengan menggunakan reaktor luar ruangan (Zhang et al., 2017).

Xanthophyllomyces dendrorhous dapat mengakumulasi astaxanthin dalam jumlah yang lebih rendah dibandingkan dengan strain yang disebutkan di atas. Umumnya, kandungan astaxanthin *X. dendrorhous* di bawah 0,1% dari berat kering (Liu et al., 2014). Namun, beberapa

mutan *X. dendrorhous* mampu mencapai konsentrasi yang lebih tinggi, dan penggunaan fitohormon selama produksi biomassa memungkinkan peningkatan 24% kandungan astaxanthin dari mikroalga ini (Pan et al., 2020). Selain itu, penelitian terbaru menyimpulkan bahwa konsumsi *X. dendrorhous* dapat memiliki efek yang sama dengan astaxanthin dalam mencegah obesitas akibat diet tinggi lemak (J. Wang et al., 2019).

Beberapa merk dari berbagai perusahaan telah memproduksi astaxanthin sebagai makanan atau suplemen dalam bentuk kapsul dan softgel, dengan kandungan astaxanthin per kapsul atau softgel berkisar dari 4-12 mg. Di antara merk tersebut adalah *Better Food Astaxanthin* dari perusahaan Better Foods GmbH, Göttingen, Jerman, yang membuat suplemen makanan kaya astaxanthin yang diekstraksi dari *H. pluvialis* berisi 80 kapsul, dan asupan harian yang disarankan adalah dua kapsul (masing-masing kapsul mengandung 4 mg astaxanthin). *Ox Nature Natural Hawaiian Astaxanthin* dari Portugal dan *Vivanaturals Astaxanthin* dari Kanada juga memproduksi astaxanthin dengan kandungan 4 mg namun dalam bentuk softgel.

Softgel dari kedua negara ini menambahkan kelebihan yaitu Bebas Organisme yang Dimodifikasi Secara Genetik atau *Genetically Modified Organism* (GMO), bebas gluten, ada yang bebas gandum dan ada yang bebas susu sehingga aman digunakan untuk konsumen yang rentan terhadap reaksi alergi. Produk yang memiliki kadar astaxanthin paling rendah dari studi tersebut adalah Natural Astaxanthin dari perusahaan Nutravita di U.K yang mengandung 0,9 mg astaxanthin dan dikomersialkan bebas dari pewarna dan perasa buatan, bebas GMO, dan mudah ditelan sebagai softgel (Villaró et al., 2021). Dosis yang dinyatakan aman untuk konsumsi jangka panjang dari astaxanthin adalah 8mg per hari (Turck et al., 2020).

Selain pertimbangan harga, penggunaan astaxanthin, terutama pada isomer trans-nya pada industri makanan terbatas oleh 2 faktor, yaitu stabilitas selama isolasi, pembuatan, dan penyimpanan; serta rendahnya kelarutan astaxanthin dalam air (83 mg/L), yang merupakan masalah kedua yang sangat membatasi penggunaannya dalam industri (Stachowiak & Szulc, 2021).

Astaxanthin memiliki stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan

ekstraknya, di mana biomassa kering lebih stabil daripada bentuk ekstrak. Dalam matriks makanan, penting untuk dipertimbangkan metode yang dapat mengawetkan atau menjaga stabilitas dan bioavailabilitas astaxanthin (Martínez-Delgado et al., 2017)

Karotenoid mudah berinteraksi dengan radikal bebas yang terdapat dalam sistem, dan kecenderungan ini bergantung pada jenis karotenoid serta sifat radikal bebas tersebut. Beberapa reaksi yang terjadi atau berpengaruh terhadap stabilitas astaxanthin adalah oksidasi, isomerisasi, efek termal dan cahaya, efek asam dan pH, serta efek yang mungkin terjadi saat proses industri, seperti memasak (*cooking*), penggilingan (*milling*), pengeringan beku (*freeze-drying*), ekstrusi (*extrusion*), pembentukan pelet (*pelleting*), dan pengeringan (*drying*). Selain itu, dibutuhkan metode preservasi, seperti enkapsulasi, untuk menjaga agar astaxanthin tidak terdegradasi (Martínez-Delgado et al., 2017).

Hal yang menarik sekaligus menjadi tantangan bagi negara-negara yang kaya akan sumber biota laut, seperti Indonesia, adalah potensi untuk mulai mengembangkan produksi mikroalga

penghasil astaxanthin. Indonesia merupakan salah satu penghasil udang terbesar di dunia (Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia, 2023). Pengetahuan tentang sumber dan proses astaxanthin dari hasil laut akan meningkatkan ketahanan dan kesejahteraan nasional.

Berdasarkan data tahun 2023, Provinsi Jawa Barat menghasilkan 128.778 ton, sedangkan Nusa Tenggara Barat, sebagai sentra produksi udang terbesar, menghasilkan 186.386 ton. Selain dagingnya yang terdistribusi sebagai pangan hewani, limbah dari hasil tambak ini juga menarik untuk dikembangkan. Terlebih lagi, salah satu sumber astaxanthin yang telah diteliti adalah limbah udang, yang potensi ekstraksinya telah diulas oleh Šimat et al. (2022) dan Panagiotakopoulos et al. (2023). Dalam ulasan tersebut disebutkan bahwa China sendiri menghasilkan 500.000 ton produk sampingan udang dan membuang 97 ton astaxanthin alami (senilai 650 juta dolar) setiap tahun. Hal ini tentu menjadi penting untuk dikembangkan, mengingat limbah perikanan lain dari Indonesia, seperti kitin, dapat dikembangkan di negara lain dan dijual kembali di Indonesia dengan harga yang lebih tinggi.

Berbagai jenis ekstraksi dapat dilakukan pada limbah, seperti limbah udang, kepiting, lobster, dan lainnya, untuk menghasilkan astaxanthin. Selain ekstraksi, Indonesia, yang merupakan negara kepulauan dengan rasio luas lautan dua kali lebih besar dari luas daratan, membuka kesempatan besar untuk melakukan budidaya dan pencarian sumber daya yang luas. Bahkan, bukan hanya laut, tetapi juga di darat, potensi pencarian senyawa ini masih dapat dieksplorasi.

Nishida et al. (2023) lebih banyak mengulas tentang sumber-sumber astaxanthin yang telah dikenal, mulai dari mikroalga hingga tanaman tingkat tinggi, bahkan hewan darat dan laut. Hal ini jauh berbeda dari penelitian Ambati et al. (2014) yang menunjukkan pesatnya eksplorasi senyawa ini dan potensi pemanfaatannya. Oleh sebab itu, pengembangan ekstraksi dan eksplorasi astaxanthin (dari hulu) hingga aplikasi formulasinya dalam produk-produk pangan fungsional (ke hilir) masih sangat potensial untuk dilakukan dalam rangka mendukung ketahanan nasional.

Kesimpulan, Pembatasan, dan Rekomendasi

Dari studi ini, diperoleh kesimpulan bahwa senyawa astaxanthin dan bentuk esternya memiliki potensi untuk meningkatkan ketahanan pangan. Potensi ini terutama karena sumber bahan baku yang melimpah di Indonesia, salah satunya adalah udang dan limbahnya. Selain itu, aplikasi astaxanthin yang dapat difortifikasi ke dalam pakan ternak dan makanan memiliki nilai tambah, yaitu mampu meningkatkan nilai gizi dan memberikan manfaat kesehatan, yang sejalan dengan tujuan ketahanan pangan, yakni menghasilkan sumber daya manusia yang sehat, aktif, dan produktif. Namun, tantangan utama dalam pengembangan astaxanthin terletak pada tahap produksi, yaitu tingginya biaya dan resiko budidaya, serta masalah stabilitas dan bioavailabilitasnya. Untuk mengatasi masalah stabilitas dan bioavailabilitasnya, astaxanthin terus dikembangkan melalui formulasi terbaru, seperti metode enkapsulasi dan sistem nanoemulsi.

Penelitian ini hanya dilakukan berdasarkan kajian literatur yang mengumpulkan data dari Google Scholar. Pengembangan penelitian ini dapat dilakukan dengan lebih sistematis

menggunakan metode tinjauan sistematis (*systematic review*).

Pengembangan astaxanthin dalam konteks ketahanan pangan memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat dan mendukung ketahanan pangan nasional. Melalui penelitian yang terarah dan kolaboratif, tantangan yang ada dapat diatasi, sehingga visi ketahanan pangan yang berkelanjutan dapat diwujudkan. Oleh karena itu, rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah meningkatkan pengembangan ekstraksi dan eksplorasi astaxanthin, mulai dari tahap awal (hulu) hingga aplikasi formulasi dalam produk pangan fungsional (hilir), mengingat besarnya potensi nasional untuk mendukung ketahanan pangan.

Daftar Pustaka

- Ambati, R. R., Moi, P. S., Ravi, S., & Aswathanarayana, R. G. (2014). Astaxanthin: Sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications—A review. *Marine Drugs*, 12(1), 128–152. <https://doi.org/10.3390/md12010128>
- Aoi, W., Maoka, T., Abe, R., Fujishita, M., & Tominaga, K. (2018). Comparison of the effect of non-esterified and esterified astaxanthins on endurance performance in mice. *Journal of Clinical Biochemistry and*

- Nutrition*, 62(2), 161–166. <https://doi.org/10.3164/jcbrn.17-89>
- Badan Pangan Nasional. (2023). *Indeks Ketahanan Pangan Nasional 2023*. Deputi Bidang Kerawanan Pangan dan Gizi.
- Berek, R. B. (2018). Peran Food and Agriculture Organization (Fao) Dalam Meningkatkan Ketahanan Pangan Di Provinsi Nusa Tenggara Timur Melalui Program Pertanian Konservasi. *Global Political Studies Journal*, 2(2), 161–176. <https://doi.org/10.34010/gpsjournal.v2i2.2029>
- Buesen, R., Schulte, S., Strauss, V., Treumann, S., Becker, M., Gröters, S., Carvalho, S., & Ravenzwaay, B. van. (2015). Safety assessment of [3S, 3'S]-astaxanthin – Subchronic toxicity study in rats. *Food and Chemical Toxicology*, 81, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.04.017>
- Dang, Y., Li, Z., & Yu, F. (2024). Recent Advances in Astaxanthin as an Antioxidant in Food Applications. *Antioxidants*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/antiox13070879>
- Fukuzawa, K., Inokami, Y., Tokumura, A., Terao, J., & Suzuki, A. (1998). Rate constants for quenching singlet oxygen and activities for inhibiting lipid peroxidation of carotenoids and α -tocopherol in liposomes. *Lipids*, 33(8), 751–756. <https://doi.org/10.1007/s11745-998-0266-y>
- Gómez-Estaca, J., Calvo, M. M., Álvarez-Acero, I., Montero, P., & Gómez-Guillén, M. C. (2017). Characterization and storage stability of astaxanthin esters, fatty acid profile and α -tocopherol of lipid extract from shrimp (*L. vannamei*) waste with potential applications as food ingredient. *Food Chemistry*, 216, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.016>
- Goto, S., Kogure, K., Abe, K., Kimata, Y., Kitahama, K., Yamashita, E., & Terada, H. (2001). Efficient radical trapping at the surface and inside the phospholipid membrane is responsible for highly potent antiperoxidative activity of the carotenoid astaxanthin. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1512(2), 251–258. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(01\)00326-1](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(01)00326-1)
- Hapsari, N. I., & Rudiarto, I. (2017). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kerawanan dan Ketahanan Pangan dan Implikasi Kebijakannya di Kabupaten Rembang. *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 5(2), 125. <https://doi.org/10.14710/jwl.5.2.125-140>
- Hossain, A. K. M., Brennan, M. A., Mason, S. L., Guo, X., Zeng, X. A., & Brennan, C. S. (2017). The effect of astaxanthin-rich microalgae “*haematococcus pluvialis*” and wholemeal flours incorporation in improving the physical and functional properties of cookies. *Foods*, 6(8), 1–10. <https://doi.org/10.3390/foods6080057>
- Huang, L., Zhang, L., Li, R., & Liang, P. (2021). Formulation and optimization of astaxanthin nanoemulsions with marine phospholipids derived from large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) roe. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v33i3.2029>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. (2023). *Profil*

Pasar Udang. Direktur Jenderal Penguatan Daya Saing Produk Kelautan dan Perikanan.

- Kusmayadi, A., Leong, Y. K., Yen, H. W., Huang, C. Y., & Chang, J. S. (2021). Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans – Biotechnological and environmental aspects. *Chemosphere*, 271, 129800. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129800>
- Li, J., Zhu, D., Niu, J., Shen, S., & Wang, G. (2011). An economic assessment of astaxanthin production by large scale cultivation of *Haematococcus pluvialis*. *Biotechnology Advances*, 29(6), 568–574. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.04.001>
- Liu, J., Sun, Z., Gerken, H., Liu, Z., Jiang, Y., & Chen, F. (2014). *Chlorella zofingiensis* as an alternative microalgal producer of astaxanthin: Biology and industrial potential. *Marine Drugs*, 12(6), 3487–3515. <https://doi.org/10.3390/md12063487>
- Martin, H. D., Ruck, C., Schmidt, M., Sell, S., Beutner, S., Mayer, B., & Walsh, R. (1999). Chemistry of carotenoid oxidation and free radical reactions. *Pure and Applied Chemistry*, 71(12), 2253–2262. <https://doi.org/10.1351/PAC199971122253/MACHINEREADEABLECITATION/RIS>
- Martínez-Delgado, A. A., Khandual, S., & Villanueva-Rodríguez, S. J. (2017). Chemical stability of astaxanthin integrated into a food matrix: Effects of food processing and methods for preservation. *Food Chemistry*, 225, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.092>
- McNulty, H. P., Byun, J., Lockwood, S. F., Jacob, R. F., & Mason, R. P. (2007). Differential effects of carotenoids on lipid peroxidation due to membrane interactions: X-ray diffraction analysis. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1768(1), 167–174. <https://doi.org/10.1016/J.BBAMEM.2006.09.010>
- Nishida, Y., Berg, P. C., Shakersain, B., Hecht, K., Takikawa, A., Tao, R., Kakuta, Y., Uragami, C., Hashimoto, H., Misawa, N., & Maoka, T. (2023). Astaxanthin: Past, Present, and Future. *Marine Drugs*, 21(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/md21100514>
- Nishida, Y., Yamashita, E., & Miki, W. (2007). Quenching activities of common hydrophilic and lipophilic antioxidants against singlet oxygen using chemiluminescence detection system. *Carotenoid Sci*, 11, 16–20.
- Pan, X., Wang, B., Duan, R., Jia, J., Li, J., Xiong, W., Ling, X., Chen, C., Huang, X., Zhang, G., & Lu, Y. (2020). Enhancing astaxanthin accumulation in *Xanthophyllomyces dendrorhous* by a phytohormone: Metabolomic and gene expression profiles. *Microbial Biotechnology*, 13(5), 1446–1460. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13567>
- Panagiotakopoulos, I., Karantonis, H. C., Kartelias, I. G., & Nasopoulou, C. (2023). Ultrasonic-Assisted Extraction of Astaxanthin from Shrimp By-Products Using Vegetable Oils. *Marine Drugs*, 21(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/md21090467>

- Saleh, N., & Widodo, Y. (2008). Profil Dan Peluang Pengembangan Ubi Jalar Untuk Mendukung Ketahanan Pangan dan Agroindustri. *Buletin Palawija*, 15, 21–30.
- Shu, G., Khalid, N., Chen, Z., Neves, M. A., Barrow, C. J., & Nakajima, M. (2018). Formulation and characterization of astaxanthin-enriched nanoemulsions stabilized using ginseng saponins as natural emulsifiers. In *Food Chemistry* (Vol. 255, pp. 67–74). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.062>
- Šimat, V., Rathod, N. B., 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. <https://doi.org/10.3390/md20030206>
- Simatupang, P. (2007). A Critical Review on Paradigm and Framework of National Food Security Policy. *Forum Penelitian AGRO EKONOMI*, 25(1), 1–18.
- Snell, T. W., & Carberry, J. (2022). Astaxanthin Bioactivity Is Determined by Stereoisomer Composition and Extraction Method. *Nutrients*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/nu14071522>
- Stachowiak, B., & Szulc, P. (2021). Astaxanthin for the Food Industry. *Molecules*, 26(9). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26092666>
- Sun, J., Yan, J., Dong, H., Gao, K., Yu, K., He, C., & Mao, X. (2023). Astaxanthin with different configurations: Sources, activity, post modification, and application in foods. *Current Opinion in Food Science*, 49, 100955. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100955>
- Suryana, A. (2023). Menuju Ketahanan Pangan Indonesia Berkelanjutan 2025: Tantangan dan Penanganannya. *Forum Penelitian AGRO EKONOMI*, 32(2).
- Todorović, B., Grujić, V. J., Krajnc, A. U., Kranvogel, R., & Ambrožič-Dolinšek, J. (2021). Identification and Content of Astaxanthin and Its Esters from Microalgae *Haematococcus pluvialis* by HPLC-DAD and LC-QTOF-MS after Extraction with Various Solvents. *Plants (Basel, Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/plants10112413>
- Turck, D., Castenmiller, J., de Henauw, S., Hirsch-Ernst, K. I., Kearney, J., Maciuk, A., Mangelsdorf, I., McArdle, H. J., Naska, A., Pelaez, C., Pentieva, K., Siani, A., Thies, F., Tsabouri, S., Vinceti, M., Cubadda, F., Engel, K. H., Frenzel, T., Heinonen, M., ... Knutsen, H. K. (2020). Safety of astaxanthin for its use as a novel food in food supplements. *EFSA Journal*, 18(2), e05993. <https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2020.5993>
- Villaró, S., Ciardi, M., Morillas-españa, A., Sánchez-zurano, A., Acién-fernández, G., & Lafarga, T. (2021). Microalgae Derived Astaxanthin: Research and Consumer Trends and Industrial Use as Food. *Foods 2021, Vol. 10, Page 2303*, 10(10), 2303. <https://doi.org/10.3390/FOODS10102303>
- Wang, J., Liu, S., Wang, H., Xiao, S., Li, C., Li, Y., & Liu, B. (2019). Xanthophyllomyces dendrorhous-derived astaxanthin regulates lipid metabolism and gut microbiota in obese

mice induced by a high-fat diet. *Marine Drugs*, 17(6), 1–10. <https://doi.org/10.3390/md17060337>

Wang, Y., & Peng, J. (2008). Growth-associated biosynthesis of astaxanthin in heterotrophic *Chlorella zofingiensis* (Chlorophyta). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(9), 1915–1922. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9692-8>

Xie, X., Zhong, M., Huang, X., Yuan, X., Mahna, N., Mussagy, C. U., & Ren, M. (2024). Astaxanthin biosynthesis for functional food development and space missions. *Critical Reviews in Biotechnology*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2410364>

Yamashita, E. (2013). Astaxanthin as a medical food. *Functional Foods in Health and Disease*, 3(7), 254–258. <https://doi.org/10.31989/ffhd.v3i7.49>

Yamashita, E. (2015). Let astaxanthin be thy medicine. *PharmaNutrition*, 3(4), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.phanu.2015.09.001>

Zhang, Z., Huang, J. J., Sun, D., Lee, Y., & Chen, F. (2017). Two-step cultivation for production of astaxanthin in *Chlorella zofingiensis* using a patented energy-free rotating floating photobioreactor (RFP). *Bioresource Technology*, 224, 515–522. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.081>