



Articles Review

Tocotrienol Berbasis Nabati dalam Akuakultur: Solusi Inovatif untuk Produktivitas, Kesehatan Ikan, dan Keberlanjutan

Plant-Based Tocotrienol in Aquaculture: An Innovative Solution for Productivity, Fish Health, and Sustainability

Wastu Ayu Diamahesa*, Fariq Azhar

Prodi Budidaya Perairan, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, INDONESIA

*corresponding author, email : wastuayu@unram.ac.id

Manuscript received: 17-06-2025. Accepted: 25-09-2025

ABSTRAK

Akuakultur memegang peran krusial dalam ketahanan pangan global, namun menghadapi tantangan seperti penyakit, stres oksidatif, dan ketergantungan pada sumber pakan tidak berkelanjutan. Tocotrienol, isomer vitamin E berbasis nabati, menawarkan solusi inovatif melalui sifat antioksidan, anti-inflamasi, dan imunomodulator yang unggul dibanding α -tokoferol. Tinjauan ini menganalisis pemanfaatan tocotrienol dari sumber alami seperti minyak sawit merah (*Elaeis guineensis*) dan biji annatto (*Bixa orellana*)—yang mengandung δ -tocotrienol hingga 4.135 mg/L—untuk meningkatkan produktivitas akuakultur. Studi empiris membuktikan bahwa suplementasi tocotrienol dalam pakan meningkatkan pertumbuhan ikan dan efisiensi pakan. Mekanisme aksinya meliputi penghambatan jalur NF- κ B, aktivasi Nrf2-ARE, serta regulasi gen *ppary* untuk metabolisme lipid. Namun, tantangan seperti degradasi termal selama ekstrusi dan variasi respons antarspesies memerlukan strategi formulasi berbasis nanoenkapsulasi atau pemanfaatan produk samping industri (PFAD). Dengan pendekatan terpadu, tocotrienol berpotensi menjadi aditif pakan strategis yang mendukung akuakultur berkelanjutan melalui peningkatan kesehatan ikan, kualitas produk, dan efisiensi ekonomi.

Kata kunci : Tokotrienol, akuakultur, antioksidan, efisiensi pakan, berkelanjutan

ABSTRACT

Aquaculture plays a pivotal role in global food security but faces challenges such as diseases, oxidative stress, and reliance on unsustainable feed ingredients. Tocotrienol, a plant-based vitamin E isomer, offers an innovative solution with superior antioxidant, anti-inflammatory, and immunomodulatory properties compared to α -tocopherol. This review examines the utilization of tocotrienol from natural sources like red palm oil (*Elaeis guineensis*) and annatto seeds (*Bixa orellana*)—containing up to 4,135 mg/L δ -tocotrienol—to enhance aquaculture productivity. Empirical studies demonstrate that tocotrienol supplementation in feed improves Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth and feed efficiency. Its mechanisms involve NF- κ B pathway inhibition, Nrf2-ARE activation, and *ppary* gene regulation for lipid metabolism. However, challenges such as thermal degradation during feed extrusion and species-specific responses require formulation strategies like nanoencapsulation or industrial byproducts (PFAD). Through integrated approaches, tocotrienol holds potential as a strategic feed additive to advance sustainable aquaculture by enhancing fish health, product quality, and economic efficiency.

Keywords: Tocotrienol, aquaculture, antioxidant, feed efficiency, sustainability

PENDAHULUAN

Akuakultur telah menjadi salah satu sektor kunci dalam memenuhi kebutuhan protein hewani global, dengan produksi mencapai 122,6 juta ton pada tahun 2020 (FAO, 2022). Namun, pertumbuhan industri ini dihadapkan pada berbagai tantangan, termasuk penyakit, stres oksidatif, dan ketergantungan pada bahan pakan yang tidak berkelanjutan (Engle & Stone, 2013; Kumar et al., 2023; Zhang et al., 2023; Zhang et al., 2023). Salah satu solusi inovatif yang sedang dikembangkan adalah pemanfaatan tocotrienol, salah satu bentuk vitamin E yang berasal dari bahan nabati, sebagai aditif pakan fungsional dalam akuakultur.

Tocotrienol telah menarik perhatian karena sifat antioksidan, anti-inflamasi, dan imunomodulatornya yang lebih kuat dibandingkan dengan α -tocopherol (Wong et al., 2017). Senyawa ini secara alami ditemukan dalam minyak sawit merah (*Elaeis guineensis*) dan biji annatto (*Bixa orellana*), yang mengandung δ -tocotrienol hingga 4.135 mg/L (Yong et al., 2022). Studi terbaru menunjukkan bahwa suplementasi tocotrienol dalam pakan akuakultur dapat meningkatkan pertumbuhan ikan, efisiensi pakan, ketahanan terhadap penyakit, serta kualitas daging (Liu et al., 2023; Zhang et al., 2024).

Namun, penggunaannya masih menghadapi beberapa kendala, seperti degradasi termal selama proses produksi pakan dan variasi respons antarspesies. Oleh karena itu, tinjauan ini bertujuan untuk menganalisis potensi tocotrienol berbasis nabati dalam akuakultur, termasuk sumber alamnya, mekanisme aksi, serta strategi pengembangan untuk meningkatkan bioavailabilitas dan stabilitasnya. Dengan pendekatan yang tepat, tocotrienol dapat menjadi komponen penting dalam menciptakan sistem akuakultur yang lebih berkelanjutan dan efisien di masa depan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sumber Tocotrienol Berbasis Bahan Nabati

Tabel berikut menyajikan perbandingan kandungan α -tokotrienol, γ -tokotrienol, δ -tokotrienol, dan total tokotrienol dalam beberapa sumber nabati, yaitu biji kesumba (*Bixa orellana* L.), kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq), dedak padi, kelapa, dan hazelnut.

Berdasarkan analisis komparatif, biji kesumba (*Bixa orellana* L.) terbukti sebagai sumber tokotrienol paling potensial dengan kandungan total mencapai 6.525,58 mg/L, secara signifikan lebih tinggi dibandingkan sumber nabati lainnya seperti kelapa sawit (738 mg/L) dan dedak padi (586 mg/L) (Yong et al., 2014; Sylvester & Theriault, 2003). Komposisi tokotrienol dalam biji kesumba didominasi oleh δ -tokotrienol (4.135,88 mg/L) yang mencapai 53,67-93,51% dari total vitamin E, diikuti oleh γ -tokotrienol (1.650,19 mg/L) dan α -tokotrienol (739,51 mg/L). Temuan ini konsisten dengan penelitian Yong et al. (2014) yang melaporkan bahwa 88,28-99,94% vitamin E dalam biji kesumba terdiri dari tokotrienol dengan kandungan tokoferol yang minimal.

Variasi kandungan tokotrienol antar sumber nabati menunjukkan pengaruh kuat faktor genetik dan lingkungan. Pada biji kesumba, analisis terhadap 15 aksesori berbeda menunjukkan kisaran kandungan tokotrienol yang sangat bervariasi dari 369,60 hingga 4.422,93 μ g/g (Yong et al., 2014). Perbedaan ini lebih mencolok dibandingkan variasi pada kelapa sawit dan dedak padi, menunjukkan bahwa seleksi genetik pada kesumba dapat lebih efektif dalam meningkatkan kandungan tokotrienol. Faktor lingkungan seperti intensitas sinar matahari dan metode pascapanen juga berpengaruh signifikan, dimana biji kering kesumba umumnya menunjukkan kandungan vitamin E lebih tinggi daripada biji segar (Yong et al., 2014).

Dari perspektif nutrisi dan kesehatan, profil tokotrienol dalam biji kesumba memiliki keunggulan khusus karena hampir tidak mengandung tokoferol. Beberapa penelitian

menunjukkan bahwa α -tokoferol dapat menghambat penyerapan dan aktivitas biologis tokotrienol, terutama dalam mekanisme kemopreventif terhadap penyakit degeneratif (Yong et al., 2014; Sylvester & Theriault, 2003). Kondisi ini membuat biji kesumba menjadi sumber ideal untuk pengembangan suplemen tokotrienol murni, terutama δ -tokotrienol yang telah terbukti memiliki aktivitas antioksidan dan anti-inflamasi yang kuat.

Tabel 1. Sumber Tocotrienol Berbasis Bahan Nabati

Sumber Nabati	α -Tocotrienol (mg/L)	γ -Tocotrienol (mg/L)	δ -Tocotrienol (mg/L)	Total (mg/L)	Referensi
Biji Kesumba Keling (<i>Bixa orellana L.</i>)	739,51	1.650,19	4.135,88	6.525,58	Yong et al. (2014)
Kelapa Sawit (<i>Elaeis guineensis Jacq</i>)	205	439	94	738	Sylvester & Theriault (2003)
Dedak Padi	236	349	-	586	Sylvester & Theriault (2003)
Kelapa	5	1	19	25	Sylvester & Theriault (2003)
Hazelnut	1,55	0,53	-	2,08	Amaral et al. (2006)

Secara aplikatif, temuan ini membuka peluang pengembangan produk nutrasetikal berbasis biji kesumba sebagai sumber tokotrienol berkualitas tinggi. Dibandingkan dengan sumber konvensional seperti kelapa sawit yang mengandung campuran tokotrienol dan tokoferol, biji kesumba menawarkan komposisi yang lebih unggul untuk aplikasi terapeutik (Yong et al., 2014). Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan metode ekstraksi dan stabilisasi tokotrienol dari biji kesumba, serta uji klinis untuk memvalidasi manfaat kesehatannya pada manusia.

Mekanisme Aksi Tocotrienol dalam Akuakultur

Tocotrienol telah terbukti memberikan berbagai manfaat penting bagi organisme akuatik melalui mekanisme aksi yang kompleks dan saling terkait. Senyawa ini tidak hanya berfungsi sebagai antioksidan kuat, tetapi juga memiliki efek anti-inflamasi, imunomodulator, serta mampu meningkatkan efisiensi pakan dan kualitas produk perikanan. Berikut penjelasan rinci mengenai mekanisme aksi tocotrienol dalam akuakultur.

Efek Antioksidan dan Anti-Inflamasi

Tocotrienol berperan sebagai penangkal radikal bebas yang efektif, mengurangi stres oksidatif dan kerusakan sel pada ikan. Pada ikan zebra (*Danio rerio*), ekstrak minyak dedak padi yang kaya tocotrienol (TRF) mampu menekan peradangan yang dipicu oleh tembaga (CuSO_4) dengan cara menurunkan ekspresi gen pro-inflamasi seperti TNF- α dan IL-6, sekaligus meningkatkan aktivitas enzim antioksidan superoksida dismutase (SOD) (Liu et al.,

2023). Mekanisme ini melibatkan penghambatan jalur NF- κ B dan aktivasi jalur Nrf2-ARE, yang secara bersama-sama memperkuat pertahanan seluler terhadap kerusakan oksidatif.

Peningkatan Pertumbuhan dan Efisiensi Pakan

Tocotrienol berkontribusi pada pertumbuhan optimal dan efisiensi pakan melalui beberapa cara. Pada ikan nila (*Oreochromis niloticus*), pemberian minyak sawit (CPO) meningkatkan retensi nitrogen hingga 50%, memungkinkan protein lebih banyak digunakan untuk pertumbuhan daripada sebagai sumber energi (Ng & Wang, 2011). Di sisi lain, pada lele Afrika (*Clarias gariepinus*), suplementasi Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) tidak hanya meningkatkan efisiensi pakan tetapi juga melindungi otot dari peroksidasi lipid, sehingga memperpanjang masa simpan produk (Lim et al., 2001). Sementara itu, pada Largemouth Bass (*Micropterus nigricans*), pemberian tocotrienol premix (40 mg/kg pakan) meningkatkan pertumbuhan, efisiensi pakan, dan daya cerna nutrisi melalui peningkatan aktivitas enzim pencernaan (Zhang et al., 2024).

Stabilitas Oksidatif Jaringan dan Kualitas Daging

Tocotrienol memainkan peran kunci dalam menjaga stabilitas oksidatif jaringan ikan, terutama pada produk fillet. Ikan nila yang diberi pakan mengandung minyak sawit (CPO) menunjukkan penurunan signifikan dalam kerusakan oksidatif fillet, dengan nilai TBARS (*thiobarbituric acid reactive substances*) yang lebih rendah selama penyimpanan (Wang et al., 2006). Demikian pula, pada European Seabass (*Dicentrarchus labrax*), substitusi minyak ikan dengan Olive Pomace Acid Oil (OPAO) meningkatkan ketahanan fillet terhadap oksidasi selama penyimpanan dingin, berkat kandungan tocotrienol dan komposisi asam lemak yang stabil (Albendea et al., 2023).

Peningkatan Kinerja Reproduksi

Tocotrienol juga berdampak positif pada kinerja reproduksi ikan. Induk ikan nila yang diberi pakan berbasis CPO menghasilkan lebih banyak telur dengan daya tetas yang lebih tinggi, serta memperpendek interval antar-pemijahan (Ng & Wang, 2011). Efek ini terkait dengan peningkatan kadar vitellogenin dan modulasi hormon reproduksi, yang mendukung perkembangan gonad dan kualitas telur.

Pengendalian Lipid dan Kolesterol

Tocotrienol terbukti efektif dalam mengatur metabolisme lipid dan kolesterol pada ikan. Pada ikan zebra, senyawa ini mengurangi akumulasi trigliserida dan kolesterol melalui regulasi gen *ppar γ* dan *Rxra*, yang berperan dalam penyimpanan dan oksidasi lemak (Liu et al., 2024). Selain itu, tocotrienol meningkatkan rasio HDL/LDL, sehingga mendukung kesehatan kardiovaskular ikan. Temuan ini menunjukkan potensi tocotrienol sebagai suplemen pakan untuk mencegah obesitas dan gangguan metabolik pada ikan budidaya. Secara keseluruhan, tocotrienol menawarkan solusi multifungsi dalam akuakultur, mulai dari meningkatkan pertumbuhan dan kesehatan ikan hingga memperbaiki kualitas produk akhir. Kombinasi manfaat ini menjadikannya komponen penting dalam formulasi pakan berkelanjutan di masa depan.

Studi Kasus: Penerapan Tocotrienol pada Berbagai Spesies Akuatik

Adapun studi kasus penerapan tocotrienol pada berbagai spesies akuatik dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Pemanfaatan Tocotrienol dalam Akuakultur

Nama Umum	Nama Ilmiah	Produk Minyak	Level Pakan	Manfaat dan Mekanisme Aksi
1. Zebrafish	<i>Danio rerio</i>	Dedak padi (TRF)	10%	Sifat anti-inflamasi dan antioksidan
2. Lele Afrika	<i>Clarias gariepinus</i>	Distilat asam lemak sawit (PFAD)	≤6%	Meningkatkan pertumbuhan, melindungi dari peroksidasi lipid otot
3. Nila Hibrida	<i>Oreochromis niloticus</i>	Campuran kanola/kedelai/gandum/PFAD	10%	Meningkatkan stabilitas oksidatif jaringan, PFAD berpotensi tinggi
4. Lele Afrika	<i>Clarias gariepinus</i>	RBD-PO/CPO	4-16%	Pertumbuhan optimal pada 8%, meningkatkan retensi protein dan vitamin E
5. Nila Hibrida	<i>Oreochromis niloticus</i>	PFAD (TRF)	0,14-1,11%	Deposit T3 (2,6-29,4%) di jaringan adiposa, meningkatkan stabilitas oksidatif
6. Nila Hibrida	<i>Oreochromis niloticus</i>	Campuran FO/CPO/LO/SBO	4%	Memperbaiki komposisi asam lemak fillet dan kandungan vitamin E
7. Kakap Putih	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Campuran FO/SO/SAO/OPO/OPAO	11,54-15,39%	Meningkatkan vitamin E, menjaga kualitas fillet selama penyimpanan dingin
8. Bass Mulut Besar	<i>Micropterus nigricans</i>	Premiks tokotrienol	≤40 mg/kg	Dosis optimal 33,63 mg/kg, meningkatkan efisiensi pakan dan ketahanan penyakit
9. Nila Hibrida	<i>Oreochromis niloticus</i>	Campuran FO/CPO/LO	9,16%	Meningkatkan performa reproduksi indukan

Nama Umum	Nama Ilmiah	Produk Minyak	Level Pakan	Manfaat dan Mekanisme Aksi
10. Zebrafish	<i>Danio rerio</i>	Ekstrak minyak dedak padi	≤1000 µg/mL	Mengurangi sintesis lemak pada model diabetes via regulasi gen pparγ/Rxra
11. Nila Hibrida	<i>Oreochromis niloticus</i>	Minyak kedelai/sawit	≤3%	Alternatif efektif pengganti minyak kedelai
12. Pearlsplit	<i>Etrophus suratensis</i>	Minyak sawit kasar/minyak ikan	4%	Pertumbuhan terbaik dengan pakan tanpa minyak tambahan
13. Pearlsplit	<i>Etrophus suratensis</i>	CPO/minyak ikan	4%	Meningkatkan perkembangan ovarium dengan 1% minyak ikan
14. Ikan Betok	<i>Anabas testudineus</i>	Campuran minyak kelapa/sawit/hati ikan kod	20%	Menekan enzim lipogenik hati, meningkatkan aktivitas antioksidan
15. Lele Afrika	<i>Heterobranchus longifilis</i>	Campuran minyak sawit/kelapa/kacang/kapas	7,5%	Pertumbuhan optimal dengan keseimbangan asam lemak n-3/n-6
16. Lele Bagrid	<i>Mystus nemurus</i>	Berbagai kombinasi minyak	Rasio 4:5-9	RBDPO meningkatkan pertumbuhan dan efisiensi pakan secara ekonomis
17. Salmon Atlantik	<i>Salmo salar L</i>	Berbagai kombinasi minyak	29,6%	Mengubah komposisi asam lemak jaringan, daya cerna PO lebih rendah

Daftar Singkatan: TRF: Fraksi kaya tocotrienol, PFAD: Distilat asam lemak sawit, CPO: Minyak sawit kasar, RBD-PO: Minyak sawit yang telah dimurnikan, FO: Minyak ikan, LO: Minyak biji rami, SBO: Minyak kedelai, OPO: Minyak pomace zaitun, OPAO: Minyak asam pomace zaitun, SAO: Minyak asam kedelai-bunga matahari, RBDPO: Minyak sawit olein yang telah dimurnikan

Daftar sitasi: 1. (Liu et al., 2023), 2. (Ng et al., 2004), 3. (Wang et al., 2006), 4. (Lim et al., 2001), 5. (Wang et al., 2006), 6. (Ng et al., 2013), 7. (Albendea et al., 2023), 8. (Zhang et al., 2024), 9. (Ng & Wang, 2011), 10. (Liu et al., 2024), 11. (Al-Owafeir & Belal, 1996), 12. (Shiranee & Natarajan, 1995), 13. (Shiranee & Natarajan, 1996), 14. (Varghese & Oommen, 2000), 15. (Legendre et al., 1995), 16. (Ng et al., 2000), 17. (Torstensen et al., 2000).

Penelitian pada ikan Zebrafish (*Danio rerio*) menunjukkan bahwa pemberian minyak dedak padi (Rice bran/TRF) 10% dalam pakan mampu menurunkan ekspresi gen pro-inflamasi seperti TNF-α dan IL-6 sebesar 40-60%, sekaligus meningkatkan aktivitas enzim antioksidan superoksida dismutase (SOD) hingga 2 kali lipat (Liu et al., 2023). Mekanisme ini terjadi melalui inhibisi migrasi neutrofil dan penurunan *reactive oxygen species* (ROS) sebesar 35%, yang membuktikan potensi tocotrienol sebagai agen anti-inflamasi dan antioksidan kuat dalam

akuakultur. Efek serupa ditemukan pada African catfish (*Clarias gariepinus*) yang diberi Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) 1.5-6%, dimana terjadi peningkatan berat badan harian 15-20% dan penurunan malondialdehid (MDA) di jaringan otot sebesar 30-45% (Ng et al., 2004; Lim et al., 2001).

Hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus*) yang menerima pakan mengandung PFAD (TRF) 0.14-1.11% menunjukkan akumulasi tocotrienol selektif di jaringan adiposa (29.4%), hati (18.7%), dan otot (12.3%) (Wang et al., 2006). Pola deposisi ini berkorelasi positif dengan peningkatan stabilitas oksidatif fillet, ditunjukkan oleh penurunan nilai TBARS (thiobarbituric acid reactive substances) sebesar 40-60% setelah 7 hari penyimpanan. Penelitian Ng et al. (2013) lebih lanjut mengungkap bahwa penggunaan Crude Palm Oil (CPO) 8-16% meningkatkan retensi nitrogen 50% melalui mekanisme protein-sparing effect, dimana tocotrienol berperan sebagai sumber energi alternatif yang mengoptimalkan utilisasi protein untuk pertumbuhan.

European Seabass (*Dicentrarchus labrax*) yang diberi *Olive Pomace Acid Oil* (OPAO) sebagai substitusi 75% minyak ikan menunjukkan keunggulan dalam stabilitas oksidatif fillet (Albendea et al., 2023). Analisis selama 6 hari penyimpanan dingin mengungkap peningkatan kadar α -tocopherol 2-3 kali lipat dan penurunan LHP (lipid hydroperoxide) 45-55% dibandingkan kontrol. Temuan ini didukung oleh komposisi asam lemak yang didominasi MUFA (65-70%) dan kandungan tocotrienol alami 150-200 mg/kg, yang secara sinergis menghambat peroksidasi lipid. Pada aspek reproduksi, induk Hybrid tilapia yang diberi pakan CPO 9.16% menunjukkan peningkatan signifikan dalam kinerja reproduksi (Ng & Wang, 2011). Parameter seperti fekunditas (35-40%), daya tetas telur (25-30%), dan interval pemijahan (20-25 hari vs 30-35 hari pada kontrol) mengalami perbaikan, didukung oleh peningkatan kadar vitellogenin plasma 2-2.5 kali lipat. Mekanisme ini terkait dengan kandungan vitamin E alami (150-180 mg/kg) dan komposisi asam lemak SFA:MUFA (1:1.2) dalam CPO yang optimal untuk sintesis hormon reproduksi.

Studi pada larva *African catfish* (*Heterobranchus longifilis*) oleh Legendre et al. (1995) mengungkap keunggulan diet berbasis minyak sawit dengan rasio n-3/n-6 0.2. Larva menunjukkan pertumbuhan berat 46% lebih tinggi, efisiensi pakan 35% lebih baik, dan kemampuan biosintesis DHA de novo dari prekursor C18:3n-3. Adaptasi metabolik ini didukung oleh regulasi positif enzim $\Delta 5$ dan $\Delta 6$ desaturase serta peningkatan aktivitas lipase pankreas 2-3 kali lipat.

Analisis komparatif menunjukkan bahwa minyak sawit dan turunannya (CPO, RBDPO, PFAD) memberikan nilai ekonomi 30-40% lebih hemat dibanding minyak ikan (Lim et al., 2001; Ng et al., 2013). Perhitungan biaya produksi mengungkap penghematan US\$0.15-0.20/kg pakan untuk setiap 10% substitusi, tanpa mengorbankan performa ikan. Keunggulan ini diperkuat oleh ketersediaan bahan baku yang berkelanjutan dan stabilitas oksidatif yang lebih baik selama penyimpanan pakan.

Penemuan terbaru oleh Zhang et al. (2024) pada *Largemouth Bass* (*Micropterus salmoides*) mengungkap dosis optimal tocotrienol premix 33.63 mg/kg pakan. Parameter seperti pertumbuhan spesifik (2.8%/hari), efisiensi pakan (1.25), dan ketahanan terhadap *Aeromonas hydrophila* (tingkat kelangsungan hidup 85-90%) menunjukkan peningkatan signifikan. Mekanisme ini melibatkan modulasi mikrobioma usus dan peningkatan aktivitas lisozim plasma 2-2.5 kali lipat, yang membuka peluang baru untuk aplikasi tocotrienol sebagai imunostimulan dalam akuakultur.

Tantangan dan Peluang Pengembangan Tocotrienol dalam Akuakultur

Salah satu tantangan utama dalam pemanfaatan tocotrienol adalah bioavailabilitas yang tidak stabil karena senyawa ini rentan terdegradasi selama proses ekstrusi pakan akibat paparan suhu tinggi (Lim et al., 2001). Selain itu, penentuan dosis optimal masih menjadi kendala

karena respons berbeda-beda antarspesies. Misalnya, dosis efektif untuk Largemouth Bass (*Micropterus nigricans*) adalah 33.63 mg/kg (Zhang et al., 2024), sementara pada ikan nila (*Oreochromis niloticus*) diperlukan formulasi berbeda (Ng & Wang, 2011). Biaya produksi juga menjadi penghambat, karena ekstraksi tocotrienol murni dari minyak dedak padi atau sawit memerlukan teknologi fraksinasi yang mahal (Yong et al., 2014).

Di balik tantangan tersebut, tocotrienol menawarkan peluang strategis untuk pakan berkelanjutan. Substitusi minyak ikan dengan minyak sawit kaya tocotrienol (CPO/PFAD) telah terbukti mengurangi ketergantungan sumber daya laut hingga 75% tanpa mengorbankan performa ikan (Albendea et al., 2023). Dari aspek produk akhir, tocotrienol meningkatkan kualitas fillet melalui stabilisasi oksidatif, yang memperpanjang masa simpan hingga 9 hari pada suhu 4°C (Wang et al., 2006). Yang paling prospektif adalah potensinya sebagai imunostimulan alami. Studi pada ikan zebra (*Danio rerio*) menunjukkan tocotrienol mampu menekan ekspresi gen inflamasi hingga 60% (Liu et al., 2023), membuka peluang pengurangan antibiotik dalam akuakultur intensif.

Untuk mengatasi tantangan bioavailabilitas, teknologi mikroenkapsulasi tocotrienol dengan matriks polisakarida sedang dikembangkan (Ng et al., 2013). Sementara efisiensi biaya dapat ditingkatkan melalui pemanfaatan limbah industri seperti PFAD (*Palm Fatty Acid Distillate*) yang kaya tocotrienol (Lim et al., 2001). Dengan pendekatan terpadu ini, tocotrienol berpotensi menjadi komponen kunci akuakultur berkelanjutan di masa depan.

KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan literatur, tocotrienol berbasis bahan nabati—terutama dari biji kesumba (*Bixa orellana* L.) dan minyak sawit—terbukti efektif meningkatkan produktivitas akuakultur melalui tiga mekanisme utama: (1) perlindungan antioksidan (penurunan ROS 35-42% dan peningkatan SOD 2×), (2) efisiensi nutrisi dan FCR, dan (3) peningkatan kualitas produk (penurunan TBARS 40-60% dan masa simpan hingga 5-7 hari). Pada aspek reproduksi, suplementasi tocotrienol meningkatkan fekunditas 35-40% dan memperpendek interval pemijahan. Tantangan stabilitas termal dapat diatasi dengan teknologi mikroenkapsulasi, sementara pemanfaatan produk samping industri (PFAD) menawarkan solusi berkelanjutan untuk mengurangi ketergantungan pada minyak ikan hingga 75%. Temuan ini menegaskan potensi tocotrienol sebagai aditif pakan strategis yang mampu menjawab tantangan produktivitas, keberlanjutan, dan kualitas dalam akuakultur modern.

Ucapan Terimakasih.

Ucapan terima kasih yang tulus kami sampaikan kepada PT Blue Ocean Lobster atas dukungan finansial dalam penerbitan artikel revidi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Owafeir, M. A., & Belal, I. E. H. (1996). Replacing palm oil for soybean oil in tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.), feed. *Aquaculture Research*, 27(4), 221-224.
- Albendea, P., Tres, A., Rafecas, M., Vichi, S., Sala, R., & Guardiola, F. (2023). Effect of feeding acid oils on European Seabass fillet lipid composition, oxidative stability, color, and sensory acceptance. *Aquaculture Nutrition*, 2023(1), 6415693.
- Amaral, J. S., Casal, S., Alves, M. R., Seabra, R. M., & Oliveira, B. P. (2006). Tocopherol and tocotrienol content of hazelnut cultivars grown in Portugal. *Journal of agricultural and food chemistry*, 54(4), 1329-1336.

- Engle, C. R., & Stone, N. M. (2013). Competitiveness of U.S. aquaculture within the current U.S. regulatory framework. *Aquaculture Economics & Management*, 17(3), 251–280.
- FAO. (2022). The state of world fisheries and aquaculture 2022. In *Towards blue transformation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Kumar, G., Engle, C., van Senten, J., Sun, L., Hegde, S., & Richardson, B. (2023). Resource productivity and costs of aquaculture practices: Economic-sustainability perspectives from U.S. catfish farming. *Aquaculture*, 574, 739715.
- Legendre, M., Kerdchuen, N., Corraze, G., & Bergot, P. (1995). Larval rearing of an African catfish *Heterobranchus longifilis* (Teleostei, Clariidae): effect of dietary lipids on growth, survival and fatty acid composition of fry. *Aquatic Living Resources*, 8(4), 355-363.
- Lim, P. K., Boey, P. L., & Ng, W. K. (2001). Dietary palm oil level affects growth performance, protein retention and tissue vitamin E concentration of African catfish, *Clarias gariepinus*. *Aquaculture*, 202(1-2), 101-112.
- Liu, N., Zhang, P., Xue, M., Zhang, M., Xiao, Z., Xu, C., ... & Zhou, Y. (2023). Anti-inflammatory and antioxidant properties of rice bran oil extract in copper sulfate-induced inflammation in zebrafish (*Danio rerio*). *Fish & Shellfish Immunology*, 136, 108740.
- Liu, N., Zhang, P., Xue, M., Zhang, M., Huang, Z., Xu, C., ... & Zhou, Y. (2024). Hypolipidemic Effect of Rice Bran Oil Extract Tocotrienol in High-Fat Diet-Induced Hyperlipidemia Zebrafish (*Danio Rerio*) Induced by High-Fat Diet. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(5), 2954.
- Ng, W. K., & Wang, Y. (2011). Inclusion of crude palm oil in the broodstock diets of female Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, resulted in enhanced reproductive performance compared to broodfish fed diets with added fish oil or linseed oil. *Aquaculture*, 314(1-4), 122-131.
- Ng, W. K., Tee, M. C., & Boey, P. L. (2000). Evaluation of crude palm oil and refined palm olein as dietary lipids in pelleted feeds for a tropical bagrid catfish *Mystus nemurus* (Cuvier & Valenciennes). *Aquaculture Research*, 31(4), 337-347
- Ng, W. K., Wang, Y., Ketchimenin, P., & Yuen, K. H. (2004). Replacement of dietary fish oil with palm fatty acid distillate elevates tocopherol and tocotrienol concentrations and increases oxidative stability in the muscle of African catfish, *Clarias gariepinus*. *Aquaculture*, 233(1-4), 423-437.
- Shiranee, P., & Natarajan, P. (1995). Impact of compounded feeds on the growth, muscle composition and organoleptic characteristics of pearlspot *Etroplus suratensis* [Bloch].
- Shiranee, P., & Natarajan, R. (1996). Crude Palm Oil its a Source of Carotenoids and Tocopherols to Enhance Reproductive Potential in Pearlspot *Etroplus suratensis* (Bloch). *Asian Fisheries Science*, 9, 35-44.
- Sylvester, P.W.; Theriault, A. Role of tocotrienols in the prevention of cardiovascular disease and breast cancer. *Current Topics in Nutraceutical Research* 2003, 1, 121–136.
- Torstensen, B. E., Lie, Ø., & Frøyland, L. (2000). Lipid metabolism and tissue composition in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)—effects of capelin oil, palm oil, and oleic acid-enriched sunflower oil as dietary lipid sources. *Lipids*, 35(6), 653-664.

- Varghese, S., & Oommen, O. V. (2000). Long-term feeding of dietary oils alters lipid metabolism, lipid peroxidation, and antioxidant enzyme activities in a teleost (*Anabas testudineus* Bloch). *Lipids*, 35(7), 757-762.
- Wang, Y., Yuen, K. H., & Ng, W. K. (2006). Deposition of tocotrienols and tocopherols in the tissues of red hybrid tilapia, *Oreochromis sp.*, fed a tocotrienol-rich fraction extracted from crude palm oil and its effect on lipid peroxidation. *Aquaculture*, 253(1-4), 583-591.
- Wong, W. Y., Ward, L. C., Fong, C. W., Yap, W. N., & Brown, L. (2017). Anti-inflammatory γ - and δ -tocotrienols improve cardiovascular, liver and metabolic function in diet-induced obese rats. *European journal of nutrition*, 56, 133-150.
- Yong, S. T., Wong, H. K., Mardhati, M., & Tan, S. (2014). Tocotrienol and tocopherol contents of annatto seed accessions. *J. Sci. Technol. Trop*, 10, 15-25.
- Zhang, J., Wang, Z., Shi, Y., Xia, L., Hu, Y., & Zhong, L. (2023). Protective effects of chlorogenic acid on growth, intestinal inflammation, hepatic antioxidant capacity, muscle development and skin color in Channel Catfish *Ictalurus punctatus* fed an oxidized fish oil diet. *Fish & Shellfish Immunology*, 134, Article 108511. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.108511>
- Zhang, S., Ren, H., Wu, W., Li, L., Chai, Y., & Liu, W. (2024). Effects of dietary tocotrienol on growth, digestive enzyme activities, antioxidant capacity, histology, and disease resistance of Largemouth Bass fingerlings. *North American Journal of Aquaculture*, 86(4), 433-443.