

Dampak Ekotoksikologi Filter Ultraviolet Dari Produk Kosmetik Terhadap Ekosistem Terumbu Karang

Ecotoxicological Impact Of Ultraviolet Filters From Cosmetic Products On Coral Reef Ecosystems

Nisa Ulmafihgrah¹, Hilya Saputri², Firdus^{3*}, Muhammad Nasir⁴, Alia Rizki⁵

¹Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

²Pusat Riset Lingkungan Hidup, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh Indonesia

*Korespondensi : firdus.usk@gmail.com

Abstrak

Pemakaian filter UV (*sunscreen*) secara meluas telah menimbulkan isu lingkungan yang substansial, karena pengaruhnya terhadap ekosistem laut, terutama bagi ekosistem terumbu karang. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji dampak ekotoksikologi dari beragam zat filter UV terhadap kondisi kesehatan terumbu karang serta menilai pendekatan analisis kimiawi guna mengidentifikasi kontaminan tersebut dalam medium laut. Pendekatan yang diterapkan meliputi tinjauan pustaka sistematis berbasis database sains seperti *ScienceDirect*, *PubMed*, dan *Google Scholar*, dengan penekanan pada 35 artikel ilmiah periode 2016–2026. Sintesis data dilakukan melalui perbandingan nilai toksisitas LC_{50} serta dinamika respon seluler. Temuan utama mengindikasikan bahwa zat filter organik yang terdiri dari oksibenzon dan oktinoksat, serta nanopartikel anorganik yang terdiri dari ZnO dan TiO₂, memicu tekanan fisiologis yang spesifik. Hal ini mencakup pembungkusan planula, tekanan oksidatif akibat pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS), serta kerusakan mutualisme *Symbiodinium* yang berujung pada pemutihan karang. Di samping itu, metode analisis seperti HPLC dan GC-MS dapat berperan dalam mendeteksi polutan ini pada kadar rendah dalam perairan laut. Oleh karena itu, filter UV membentuk risiko serius bagi ketahanan terumbu karang. Pengaturan yang lebih ketat dari komposisi kosmetik beserta penerapan "*reef-safe*" menjadi langkah esensial untuk mencegah kerusakan lanjutan pada ekosistem terumbu karang.

Kata Kunci: ekotoksikologi, filter UV, *oxybenzone*, terumbu karang

Abstract

The widespread use of UV filters (*sunscreen*) has raised substantial environmental issues due to their impact on marine ecosystems, particularly coral reef ecosystems. This study aimed to assess the ecotoxicological impacts of various UV filter substances on coral reef health and to evaluate chemical analysis approaches to identify these contaminants in marine environments. The approach employed included a systematic literature review based on scientific databases such as *ScienceDirect*, *PubMed*, and *Google Scholar*, focusing on 35 scientific articles from 2016–2026. Data synthesis was performed through a comparison of LC_{50} toxicity values and cellular response dynamics. Key findings indicate that organic filter substances consisting of oxybenzone and octinoxate, and inorganic nanoparticles consisting of ZnO and TiO₂, trigger specific physiological stresses. These include planula encapsulation, oxidative stress due to the formation of Reactive Oxygen Species (ROS), and damage to the *Symbiodinium* mutualism, leading to coral bleaching. Furthermore, analytical methods such as HPLC and GC-MS can play a role in detecting these pollutants at low levels in marine waters. Therefore, UV filters pose a serious risk to coral reef resilience. Stricter regulation of cosmetic ingredients and the implementation of "*reef-safe*" standards are essential steps to prevent further damage to coral reef ecosystems.

Keywords: ecotoxicology, UV filters, *oxybenzone*, coral reefs

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak di kawasan tropis, memiliki ekosistem terumbu karang yang sangat luas dengan tingkat biodiversitas yang tinggi. Namun, posisi geografis ini menyebabkan Indonesia menerima paparan sinar matahari dengan intensitas tinggi sepanjang tahun, termasuk radiasi ultraviolet (UV) yang dapat berdampak negatif terhadap kesehatan kulit (Wadoe *et al.*, 2019). Kondisi ini mendorong meningkatnya penggunaan produk tabir surya (*sunscreen*) sebagai perlindungan terhadap paparan UV. Seiring dengan meningkatnya penggunaan *sunscreen*, muncul kekhawatiran terkait dampak lingkungan dari bahan kimia yang terkandung di dalamnya. Zat penyerap UV dapat masuk ke perairan melalui aktivitas wisatawan maupun limbah domestik di kawasan pesisir. Senyawa ini dikategorikan sebagai kontaminan baru muncul (*emerging contaminants*) karena keberadaannya yang semakin sering terdeteksi serta berpotensi menimbulkan risiko bagi ekosistem perairan (Astuti *et al.*, 2023).

Produk kosmetik seperti *sunscreen* diketahui menjadi salah satu sumber pencemaran laut, khususnya di kawasan wisata pantai. Kandungan bahan aktif seperti filter UV dapat memberikan dampak negatif terhadap organisme perairan, seperti gangguan reproduksi dan efek estrogenik, serta berkontribusi terhadap pemutihan terumbu karang (Anggraeni *et al.*, 2022). Senyawa seperti *oxybenzone* dan *octinoxate* dilaporkan mampu memicu stres oksidatif dan kerusakan jaringan pada karang (Sekartadji, 2023).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi zat penyerap UV cenderung lebih tinggi di kawasan dengan aktivitas wisata yang intens. Studi di Hawaii menemukan keberadaan *benzophenone-3* dengan konsentrasi 10,9–136 ng/L di perairan Waikiki Beach (Mitchelmore *et al.*, 2019). Selain itu, sumber tambahan kontaminasi juga berasal dari fasilitas wisata seperti pancuran air yang membawa residu *sunscreen* ke lingkungan pesisir (Downs *et al.*, 2022).

Permasalahan ini semakin kompleks karena zat penyerap UV bersifat persisten dan berpotensi terakumulasi di lingkungan. Penelitian di wilayah Mediterania menunjukkan bahwa sekitar 52 kg *sunscreen* dapat terlepas ke laut setiap hari dari aktivitas wisatawan, dengan konsentrasi *octocrylene* mencapai 40–420 ng/L (Labille *et al.*, 2020). Senyawa ini juga terdeteksi pada sedimen dan organisme laut, menunjukkan potensi bioakumulasi dalam rantai makanan (Agawin *et al.*, 2024).

Di Indonesia, keberadaan kontaminan baru seperti *pharmaceuticals and personal care products* (PPCPs) telah terdeteksi di perairan laut, seperti di Teluk Jakarta (Sudaryanto *et al.*, 2023). Namun, penelitian yang secara khusus mengkaji keberadaan, distribusi, serta mekanisme ekotoksikologi filter UV dari produk *sunscreen* di perairan Indonesia masih sangat terbatas. Selain itu, kajian yang mengintegrasikan aspek konsentrasi lingkungan dengan dampak biologis terhadap organisme kunci ekosistem, seperti karang dan alga simbiosis, juga masih jarang dilakukan. Kondisi ini menunjukkan penelitian ini harus dilakukan dengan signifikan, mengingat tingginya aktivitas wisata bahari dan luasnya ekosistem terumbu karang di Indonesia. Untuk mengidentifikasi keberadaan senyawa ini di lingkungan, digunakan metode analisis seperti *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) dan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS) yang mampu mendeteksi zat dalam konsentrasi rendah (Celeiro *et al.*, 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan ini menjadi penting mengingat meningkatnya tekanan antropogenik di kawasan pesisir serta potensi akumulasi kontaminan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, tujuan dan kontribusi review ini adalah untuk menganalisis temuan-temuan penelitian terkini terkait di perairan Indonesia mengenai mekanisme ekotoksikologi filter UV dari produk *sunscreen*, mengevaluasi dampaknya terhadap organisme karang dan alga simbiosis. Tinjauan artikel ini diharapkan dapat memberikan dasar saintifik bagi pengembangan standar produk kosmetik yang ramah lingkungan demi menjaga ketahanan ekosistem terumbu karang dari tekanan antropogenik.

METODE

Karakteristik Penelitian

Penelitian ini merupakan tinjauan literatur sistematis (*Systematic Literature Review*) yang bersifat deskriptif-analitis. Karakteristik utama penelitian ini berfokus pada integrasi data ekotoksikologi

global mengenai dampak filter ultraviolet (UV) organik dan anorganik terhadap biota laut, khususnya pada filum Cnidaria (terumbu karang) dan alga simbiosis *Symbiodinium* sp. Data yang dikaji mencakup konsentrasi filter UV, metode deteksi, parameter toksisitas, mekanisme gangguan biokimia pada tingkat seluler. Pendekatan ini dipilih untuk mensintesis temuan dari berbagai studi eksperimental dan lapangan guna memberikan pemahaman komprehensif mengenai risiko lingkungan dari produk kosmetik *sunscreen* dalam beberapa tahun terakhir. Sebagai sebuah studi tinjauan sistematis, penelitian ini mengedepankan prinsip transparansi dan reproduktibilitas. Oleh karena itu strategi pencarian menggunakan operator Boolean (AND/OR) dengan kombinasi kata kunci spesifik dalam Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia: ("UV filters toxicity" OR "oxybenzone") AND ("coral bleaching" OR "Symbiodinium") AND ("ecotoxicology"). Selanjutnya, hasil sintesis data akan dikategorikan berdasarkan parameter toksikologi untuk memetakan tren dampak dari berbagai jenis senyawa filter UV. Analisis ini tidak hanya meninjau kerusakan fisik yang tampak, tetapi juga menggali dampak subletal seperti penghambatan fotosintesis, gangguan pada jalur pensinyalan seluler, dan induksi stres oksidatif pada *Symbiodinium*. Dengan kerangka kerja ini, penelitian diharapkan dapat menjadi referensi berbasis bukti (*evidence-based*) bagi pengambil kebijakan dalam mengevaluasi regulasi penggunaan bahan kimia dalam produk perawatan pribadi yang ramah lingkungan.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kualitas dan relevansi data yang disintesis perlu diperhatikan, penetapan kriteria seleksi dilakukan secara ketat. Kriteria inklusi difokuskan pada artikel penelitian primer yang diterbitkan dalam rentang waktu 2016 hingga 2026 untuk menjamin keaktualan data. Secara spesifik, kriteria seleksi dirangkum dalam tabel 1 berikut:

Tabel 1. Kriteria inklusi dan eksklusi seleksi literatur

Parameter	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Tipe Dokumen	Artikel jurnal asli (<i>original research</i>), review artikel, dan laporan teknis resmi (NOAA).	Abstrak konferensi, artikel opini, berita, dan buku populer.
Fokus Studi	Dampak spesifik filter UV (Oksibenzon, Oktinoksat, ZnO, TiO ₂) terhadap karang.	Studi polusi laut umum tanpa kaitan langsung dengan filter UV.
Data Hasil	Menyertakan data kuantitatif (Nilai LC_{50} , kadar residu ng/L atau ng/g).	Artikel tanpa data parameter biologi/kimia yang jelas.
Rentang Waktu	Publikasi antara tahun 2016–2026.	Publikasi di bawah tahun 2016.
Bahasa	Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris.	Bahasa selain Indonesia dan Inggris.

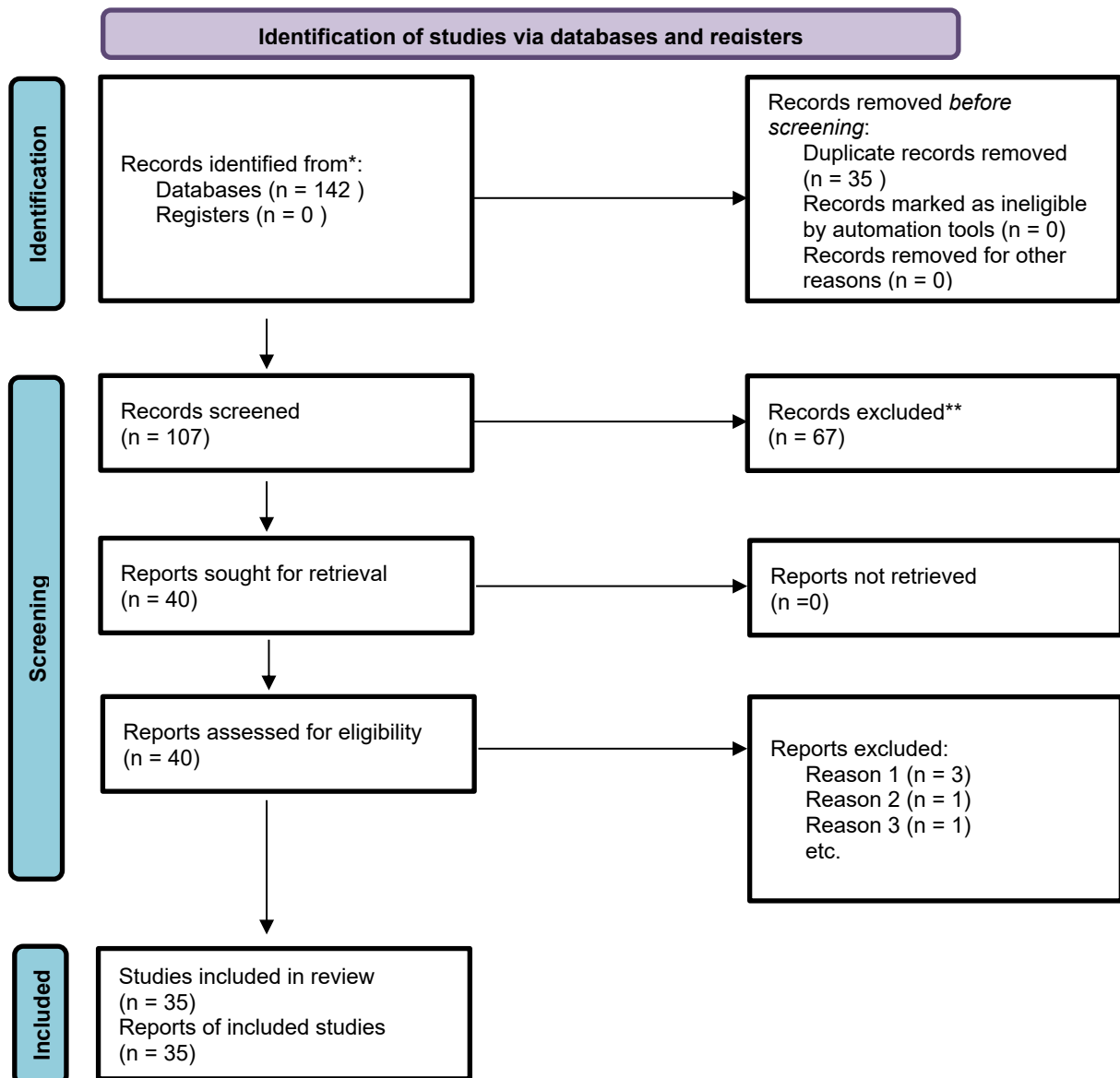
Sumber: Analisis Peneliti, 2026

Desain Penelitian

Desain penelitian ini mengadopsi protokol PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Protokol ini menjamin bahwa setiap tahapan seleksi artikel terdokumentasi dengan transparan, mulai dari identifikasi awal hingga tahap analisis data. Desain ini memungkinkan penelitian untuk mengklasifikasikan literatur ke dalam dua kelompok besar yaitu terdiri dari kelompok studi ekotoksikologi (fokus pada efek biologis) dan kelompok studi kimia lingkungan (fokus pada metode deteksi dan konsentrasi residu). Pendekatan ini memberikan struktur yang kuat dalam membandingkan ambang batas toksisitas (LC_{50}) dari berbagai jenis senyawa terhadap spesies karang yang berbeda, sehingga menghasilkan kesimpulan yang kredibel mengenai risiko ekologis global.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilaksanakan melalui empat tahapan utama. Pertama, identifikasi melalui pencarian database menggunakan kueri yang menghasilkan 142 artikel. Kedua, penyaringan (*screening*) untuk menghapus 35 artikel duplikat dan mengevaluasi 107 judul/abstrak. Ketiga, penilaian kelayakan (*eligibility*) terhadap 40 artikel melalui pembacaan teks lengkap guna memastikan kesesuaian data. Tahap terakhir adalah inklusi, di mana 35 artikel final diekstraksi datanya ke dalam matriks analisis untuk kemudian disintesis menjadi hasil pembahasan mengenai mekanisme ekotoksikologi filter UV dari produk kosmetik terhadap terumbu karang. Proses seleksi ini disajikan dalam bentuk diagram alir PRISMA, diagram ini menggambarkan jumlah artikel pada setiap tahap proses seleksi yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Sumber: (Page et al., 2021)

Gambar 1. Diagram alir PRISMA

PEMBAHASAN

Konsentrasi UV Filter di Pantai Wisata Dunia

Penelitian Mitchelmore et al. (2019) mengungkapkan keberadaan berbagai zat penyerap UV pada air laut, endapan, serta jaringan karang di wilayah pesisir Hawaii. Dari 13 zat yang diuji, delapan di antaranya teridentifikasi pada berbagai kompartemen lingkungan. Kadar *benzophenone-3* di air laut *Waikiki Beach*

terdeteksi dalam rentang 10.9–136 ng/L. Tingkat ini didefinisikan sebagai korelasi antara intensitas pariwisata dan eskalasi zat penyerap UV di ekosistem laut tersebut.

Penelitian Downs *et al.* (2022) juga menyebutkan bahwa sarana rekreasi pantai, seperti pancuran air, sebagai jalur tambahan pelepasan zat penyerap UV ke lingkungan. Penelitian tersebut mendeteksi lebih dari 18 jenis zat penyerap UV pada pasir dan air di sekitar zona pancuran pantai. Konsentrasi *oxybenzone* pada pasir mencapai 34.518 ng/g, yang mengindikasikan bahwa kegiatan wisata mempercepat pengumpulan zat penyerap UV di zona pesisir.

Penelitian Labille *et al.* (2020) di pantai-pantai Mediterania membuktikan bahwa pemakaian *sunscreen* wisatawan memicu emisi zat penyerap UV dalam volume signifikan ke perairan laut. Deteksi *octocrylene* di air laut berada pada kisaran 40–420 ng/L, sementara *avobenzone* terukur antara 10–350 ng/L pada periode musim liburan. Selanjutnya, penelitian terdahulu juga mengindikasikan bahwa zat-zat penyerap UV mengalami perubahan kimiawi di perairan laut. Penelitian Zulfiqar *et al.* (2026) menemukan bahwa zat seperti *octinoxate* dapat mengalami isomerisasi menjadi *cis-octinoxate* yang diakibatkan oleh adanya eksposur sinar matahari di daerah pesisir.

Keberadaan UV Filter dan *Emerging Contaminants* di Indonesia

Penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa senyawa *pharmaceuticals and personal care products* (PPCPs), termasuk UV filter dari produk tabir surya, telah terdeteksi di lingkungan perairan dan berpotensi menjadi sumber pencemaran baru. Astuti *et al.* (2023) melaporkan bahwa berbagai kontaminan dari produk perawatan diri masih terdeteksi pada air buangan instalasi pengolahan limbah, yang mengindikasikan bahwa senyawa tersebut belum sepenuhnya tereliminasi dan berpotensi masuk ke ekosistem perairan. Hal ini diperkuat oleh penelitian Sudaryanto *et al.* (2023) di Teluk Jakarta yang mengonfirmasi keberadaan berbagai senyawa PPCPs di perairan laut akibat aktivitas domestik dan antropogenik di kawasan pesisir.

Studi di Teluk Jakarta dan pantai utara Jawa juga menunjukkan keberadaan senyawa farmasi seperti paracetamol dengan konsentrasi hingga 610 ng/L di kawasan Angke dan 420 ng/L di Ancol, yang menegaskan bahwa limbah domestik dan aliran sungai merupakan jalur utama masuknya kontaminan baru ke perairan laut Indonesia (Koagouw *et al.*, 2021). Meskipun sebagian besar penelitian masih berfokus pada senyawa farmasi, keberadaan PPCPs ini mengindikasikan bahwa senyawa lain dalam kelompok yang sama, termasuk UV filter terdapat produk perawatan pribadi dan aktivitas manusia di wilayah pesisir. Selain itu, berbagai studi menunjukkan bahwa kontaminan dari produk perawatan diri dapat terakumulasi pada biota akuatik dan berpotensi masuk ke dalam rantai makanan, sehingga meningkatkan risiko terhadap keseimbangan ekosistem perairan dalam jangka panjang (Nozaki *et al.*, 2023). Oleh karena itu, meskipun data spesifik mengenai UV filter di Indonesia masih terbatas, bukti keberadaan PPCPs di perairan laut menunjukkan adanya potensi risiko lingkungan yang serupa, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut terkait distribusi dan dampak ekotoksikologi UV filter di perairan Indonesia.

Metode Deteksi Kimia UV Filter

Pengukuran zat penyerap UV di ekosistem laut memerlukan teknik analisis yang sensitif dan selektif karena keberadaannya umumnya pada konsentrasi jejak (ng/L). Metode berbasis kromatografi cair seperti HPLC-MS/MS dan LC-MS/MS banyak digunakan karena mampu mendeteksi berbagai jenis zat penyerap UV secara simultan dengan sensitivitas tinggi. Penelitian Vila *et al.* (2016) menunjukkan bahwa HPLC-MS/MS dapat mengidentifikasi hingga 15 senyawa secara bersamaan, sedangkan kombinasi *solid phase extraction* (SPE) dengan LC-MS/MS efektif mendeteksi senyawa dengan batas deteksi 11–36 ng/L (Cadena-Aizaga *et al.*, 2022). Selain itu, metode SALLE yang dipadukan dengan LC-MS/MS juga dilaporkan memiliki sensitivitas tinggi dalam mendeteksi beberapa senyawa filter UV pada level ng/L (Carve *et al.*, 2023).

Di sisi lain, metode berbasis kromatografi gas seperti GC-MS lebih sesuai untuk senyawa yang bersifat volatil atau semi-volatil. Kombinasi SPE-GC-MS menunjukkan sensitivitas yang baik dengan batas deteksi

sekitar 20–40 ng/L serta mampu mengidentifikasi senyawa seperti *benzophenone* dan *octocrylene* (Puebla-Domínguez *et al.*, 2025). Pengembangan metode seperti *fabric phase sorptive extraction* (FPSE) yang dipadukan dengan GC-MS/MS juga menunjukkan efisiensi tinggi dengan tingkat pemulihan mencapai 80–110% (Celeiro *et al.*, 2020).

Selain metode konvensional, pendekatan alternatif seperti *liquid phase microextraction* yang dikombinasikan dengan LC-MS/MS mulai dikembangkan sebagai metode yang lebih ramah lingkungan karena menggunakan pelarut dalam jumlah minimal, namun tetap mampu mendeteksi senyawa pada konsentrasi rendah (Ku *et al.*, 2020). Secara umum, metode LC-MS/MS unggul dalam analisis multi-residu dengan sensitivitas tinggi, sedangkan GC-MS lebih selektif untuk senyawa tertentu dengan stabilitas termal yang baik.

Interaksi antara filter UV dengan organisme karang memicu berbagai respons patologis pada tingkat seluler maupun fisiologis. Ringkasan mengenai parameter ekotoksikologi dan dampak spesifik dari berbagai jenis filter UV dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. Ringkasan parameter ekotoksikologi dan konsentrasi filter UV pada ekosistem karang

Senyawa UV filter	Spesies / matriks	Konsentrasi / nilai LC_{50}	Dampak / temuan spesifik	Sumber jurnal (penulis, tahun)
<i>Oxybenzone</i> (BP-3)	Larva <i>Stylophora pistillata</i>	LC_{50} : 139 $\mu\text{g/L}$ (kondisi terang)	Menginduksi <i>ossification</i> prematur (deformitas skeletal) serta kematian larva melalui <i>planula encapsulation</i> .	Downs <i>et al.</i> (2016)
<i>Oxybenzone</i>	<i>Galaxea fascicularis</i> (Dewasa)	LC_{50} : 6.53 $\mu\text{g/L}$	Menyebabkan mortalitas akut pada koloni karang dewasa.	Conway <i>et al.</i> (2021)
<i>Zinc Oxide</i> (ZnO)	<i>Acropora</i> spp.	-	Menginduksi pemutihan karang (<i>coral bleaching</i>) secara signifikan melalui degradasi simbiosis alga.	Corinaldesi <i>et al.</i> (2018)
<i>Octinoxate</i> & <i>Octocrylene</i>	<i>Symbiodinium</i> sp.	-	Penurunan fluoresensi pigmen serta aktivitas metabolik alga simbiosis secara signifikan.	Almeida <i>et al.</i> (2025)
Nanopartikel TiO_2	Dinding sel alga	-	Memicu stres oksidatif akibat produksi <i>Reactive Oxygen Species</i> (ROS) yang mengganggu integritas membran sel.	Bakir <i>et al.</i> (2025)
<i>Benzophenone-3</i>	Air Laut (Waikiki Beach)	10.9 – 136 ng/L	Menunjukkan hubungan langsung antara intensitas wisata dengan tingkat polusi kimia di perairan.	Mitchelmore <i>et al.</i> (2019)
<i>Oxybenzone</i>	Pasir (Area Shower)	34.518 ng/g	Menunjukkan fasilitas pantai sebagai sumber utama deposisi kontaminan ke lingkungan pesisir.	Downs <i>et al.</i> (2022)

Sumber: Analisis peneliti, 2026

Berdasarkan data pada Tabel 2, terdapat variasi sensitivitas yang signifikan pada berbagai fase hidup karang terhadap paparan filter UV. Nilai LC_{50} *oxybenzone* yang terdapat pada karang dewasa *Galaxea fascicularis* terdeteksi jauh lebih rendah, yaitu sebesar 6.53 $\mu\text{g/L}$, jika dibandingkan dengan ambang batas pada fase larva *Stylophora pistillata* yang mencapai 139 $\mu\text{g/L}$. Perbedaan nilai ini menjadi indikasi bahwa koloni karang dewasa mempunyai kerentanan fisiologis yang lebih tinggi terhadap paparan akut filter UV. Sedangkan pada fase larva, dampak yang muncul mengarah kepada sifat gangguan perkembangan jangka panjang seperti *planula encapsulation*. Selain itu, data pada Tabel 2 juga menegaskan bahwa polusi ini tidak hanya sebatas terpapar pada air laut, melainkan juga terakumulasi secara kuat pada sedimen pantai dengan

konsentrasi yaitu mencapai 34.518 ng/g, yang berarti hal ini berpotensi menjadi kumpulan kontaminan berkelanjutan bagi ekosistem terumbu karang yang ada di sekitarnya.

Gangguan Metabolisme dan Stres Oksidatif

Paparan filter UV, baik organik maupun anorganik, menginduksi gangguan metabolik yang signifikan pada alga simbiosis (*Symbiodinium* sp. atau *Zooxanthellae*) melalui berbagai jalur. Mekanisme utama yang terjadi adalah disrupsi pada sistem fotosintesis, khususnya pada Fotosistem II (PSII). Senyawa seperti oksibenzon dan partikel nano ZnO bertindak sebagai fototoksin yang menghambat transfer elektron dalam kloroplas. Oleh karena itu, energi cahaya yang diserap tidak dapat diproses secara normal dan justru memicu pembentukan energi eksitasi berlebih yang berujung pada akumulasi *Reactive Oxygen Species* (ROS), seperti radikal superoksida (O_2^-) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) (Bakir *et al.*, 2025).

Hubungan antara zat penyerap UV organik dan alga simbiosis (*Zooxanthellae*) menjadi pemicu utama kerusakan pada ekosistem karang. Menurut Almeida *et al.* (2025), zat *octinoxate* serta *octocrylene* memunculkan toksisitas khas terhadap *Symbiodinium* sp., yang terlihat dari penurunan signifikan pada fluoresensi pigmen dan fungsi metabolisme alga. Perubahan ini umumnya dipicu oleh *kelebihan Reactive Oxygen Species* (ROS). Stres oksidatif yang dipicu oleh akumulasi ROS ini menyebabkan kerusakan oksidatif pada membran tilakoid dan protein D1 yang krusial untuk perbaikan PSII. Ketika laju kerusakan protein melebihi laju sintesis ulangnya, efisiensi kuantum fotosintesis (F_v/F_m) akan menurun drastis. Penurunan fungsi ini tidak hanya mengurangi suplai nutrisi organik (glukosa dan gliserol) dari alga ke inang karang, tetapi juga mengubah *Zooxanthellae* dari mitra simbiosis yang menguntungkan menjadi sumber racun internal. Tingginya kadar ROS di dalam sel alga memicu respons imun dari inang karang untuk mengeluarkan alga tersebut dari jaringan gastrodermisnya sebagai upaya perlindungan diri, yang secara makroskopis terlihat sebagai fenomena pemutihan karang (*coral bleaching*) (Rücker *et al.*, 2025).

Corinaldesi *et al.* (2018) mengobservasi bahwa eksposur zat penyerap mineral tertentu, khususnya *Zinc Oxide* (ZnO), secara signifikan akan memicu pemutihan karang (*coral bleaching*) pada *Acropora* spp. melalui kehancuran simbiosis alga. Fenomena pemutihan ini bukan hanya sekedar hilangnya pigmen pada karang, melainkan juga disebabkan oleh proliferasi mikrobial yang tak terkendali di sekitar jaringan karang akibat adanya pelepasan lendir karang sebagai reaksi terhadap racun yang terdapat di wilayah sekitar perairan.

Selain kerusakan pada sistem fotosintesis, filter UV organik diketahui mengganggu metabolisme lipid dan integritas genomik pada *Zooxanthellae*. Oksibenzon, misalnya, dapat bertindak sebagai pengganggu endokrin pada tingkat seluler yang memicu enkapsulasi abnormal pada larva karang dan kerusakan DNA pada sel alga (Watkins & Sallach, 2021). Pada kondisi paparan kronis, gangguan metabolisme ini menyebabkan penurunan kepadatan klorofil-a secara sistemik. Hal ini memperlemah ketahanan karang terhadap stresor sekunder, karena energi yang seharusnya digunakan untuk kalsifikasi dan pertumbuhan justru dialihkan untuk mekanisme detoksifikasi dan perbaikan seluler yang tidak efisien. Di perairan Indonesia yang memiliki intensitas cahaya matahari tinggi, radikal bebas yang terbentuk akibat interaksi fotokimia antara filter UV dan radiasi UV alami menjadi lebih reaktif. Peningkatan suhu air laut semakin mempercepat laju reaksi kimia ini, sehingga ambang batas toksisitas filter UV menjadi jauh lebih rendah pada kondisi panas ekstrem dibandingkan pada suhu optimal (Wijgerde *et al.*, 2020). Fenomena sinergis ini menegaskan bahwa gangguan metabolisme pada *Zooxanthellae* merupakan titik kritis awal yang menentukan kelangsungan hidup seluruh koloni terumbu karang.

Gangguan Endokrin dan Kegagalan Reproduksi pada Larva (Planulae)

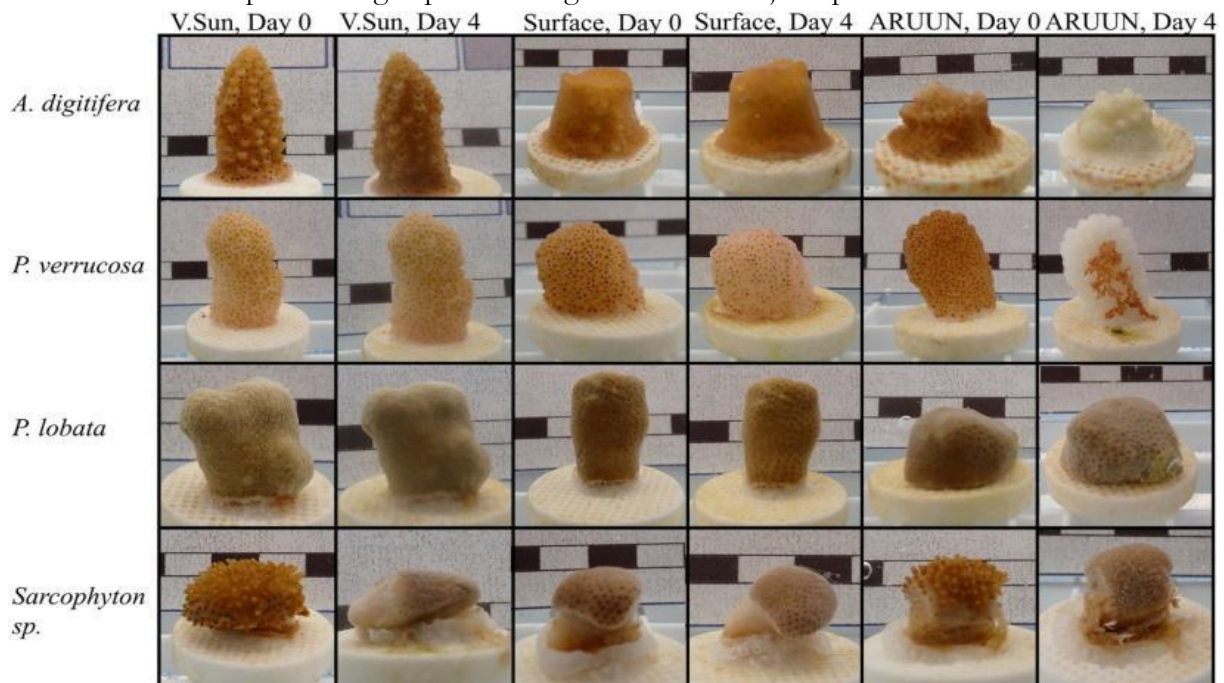
Dampak paling destruktif zat penyerap UV ini tampak terlihat saat fase ontogeni dini pada karang. Penelitian landmark Downs *et al.* (2016) mengungkap bahwa *Oxybenzone* (*Benzophenone-3*) berperan sebagai disruptor endokrin skeletal terhadap larva *Sylophora pistillata*. Zat ini memicu ossifikasi (pengerasan rangka) dini pada karang, sehingga membuat larva terperangkap dalam cangkangnya sendiri (enkapsulasi planula), yang berujung pada kematian pra-penempelan (*settlement*). Downs *et al.* (2016) juga melaporkan bahwa nilai

LC_{50} *oxybenzone* yang ditemukan pada larva karang yaitu mencapai 139 $\mu\text{g/L}$ di bawah kondisi standar paparan sinar UV, yang menandakan karakter *photo-toxicant* dengan peningkatan virulensi akibat paparan sinar matahari tersebut.

Selanjutnya penelitian Mitchelmore *et al.* (2021) serta Watkins & Sallach (2021) menyebutkan bahwa sifat lipofilik zat penyerap organik memfasilitasi akumulasi di jaringan lipid larva, sehingga mengganggu jalur sinyal hormon pengatur metamorfosis. Kegagalan penetasan larva secara persisten di perairan rekreasi Indonesia dapat berpotensi menghambat pemulihan alami pada terumbu karang, walaupun populasi dewasa tampak tetap dominan (Burns & Davies, 2021).

Analisis Komparatif Toksisitas Filter Kimia vs. Mineral

Kontroversi terkait zat penyerap mineral sebagai opsi "*Reef Safe*" menuai perhatian intensif dalam publikasi terkini. Miller *et al.* (2021) menyampaikan argumen bahwa larangan zat penyerap organik seperti UV seperti *oxybenzone* dan octinoxate dapat mendorong peningkatan penggunaan ZnO serta TiO₂ secara ekstensif. Sebaliknya, Yuan *et al.* (2022) dan Hodge *et al.* (2025) menegaskan bahwa zat penyerap anorganik berbentuk nanopartikel masih menyimpan bahaya ekologis substansial melalui bioakumulasi dan dampak toksik fisik. Hal ini sejalan dengan temuan eksperimental terbaru yang membandingkan berbagai produk komersial, di mana produk berbasis mineral justru menunjukkan destruksi jaringan yang lebih signifikan. Sebuah penelitian eksperimental di Maldives membandingkan dampak tiga jenis produk *sunscreen* komersial dengan komposisi berbeda: V.Sun dan Surface (menggunakan filter organik seperti *Avobenzone*, *Octocrylene*, dan *Ethylhexyl Triazone*) serta ARUUN (menggunakan filter mineral *Zinc Oxide*). Dampak ekotoksikologi filter UV tidak hanya terlihat secara makroskopis melalui kerusakan jaringan, akan tetapi juga dapat diukur secara fisiologis yaitu melalui fotosintesis alga simbion (*Symbiodinium* sp.). Penurunan efisiensi kuantum maksimum fotosistem II (F_v/F_m) indikator awal terjadinya stres pada terumbu karang sebelum gejala pemutihan (*bleaching*) terlihat secara visual. Perbandingan dampak tiga produk *sunscreen* komersial terhadap efisiensi fotosintesis pada berbagai spesies karang di Maldives disajikan pada Gambar 2.



Sumber: (Rücker *et al.*, 2025).

Gambar 2. Perubahan karang yang terpapar *sunscreen* hari ke-0 dan hari ke-4

Berdasarkan data pada Gambar 2 menunjukkan bahwa respons fisiologis karang terhadap paparan *sunscreen* sangat bergantung pada spesies dan jenis formulasi produk. Spesies *Acropora digitifera* menunjukkan kerentanan paling tinggi, ditandai dengan penurunan nilai F_v/F_m yang drastis mendekati nol saat terpapar

produk ARUUN yang berbasis mineral (ZnO). Sebaliknya, produk V.Sun dan Surface yang berbasis filter organik menunjukkan dampak yang lebih signifikan. Hal ini membuktikan bahwa filter mineral dalam konsentrasi tinggi dapat menghentikan aktivitas fotosintesis secara total pada spesies sensitif, yang pada akhirnya memicu pelepasan *Zoosaxanthellae* dan kematian jaringan koloni karang.

Temuan Conway *et al.* (2021) menyediakan bukti awal kematian yang kerap terjadi pada karang batu dewasa *Galaxea fascicularis* akibat eksposur *oxybenzone*, dengan nilai LC_{50} 6,53 $\mu\text{g/L}$, yang diklasifikasikan sebagai toksisitas sedang tetapi berpotensi berbahaya pada paparan berkelanjutan. Pawlowski *et al.* (2025) menyatakan urgensi serta memandang risiko zat penyerap UV ini dalam konteks holistik, di mana pemanasan global tetap ancaman dominan, meskipun kontaminasi lokal dari kosmetik berfungsi sebagai faktor pemicu tambahan (*additive stressor*) yang melemahkan ketahanan karang terhadap peningkatan temperatur laut (Mitchelmore *et al.*, 2021).

KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis menyeluruh dari beragam sumber pustaka mengindikasikan bahwa zat penyerap ultraviolet (UV) berperan sebagai agen kimia pemicu permasalahan utama bagi ekosistem terumbu karang melalui dua mekanisme pokok yaitu disrupsi endokrin dan tekanan oksidatif. Zat penyerap organik seperti *oxybenzone* memberikan toksisitas tajam terhadap koloni karang matang dengan nilai LC_{50} 6,53 $\mu\text{g/L}$, serta menyebabkan kelainan skeletal (enkapsulasi planula) pada stadium larva dengan LC_{50} 139 $\mu\text{g/L}$ di bawah iluminasi cahaya. Sebaliknya, zat penyerap anorganik nanopartikel seperti ZnO dan TiO_2 cenderung merangsang pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang merusak sistem fotosintesis *Symbiodinium* sp., sehingga memicu pemutihan karang (*bleaching*). Walaupun makalah ini menguraikan jalur toksik pada skala molekuler, kekurangan informasi terkait interaksi campuran (*cocktail effect*) dari berbagai jenis kosmetik di perairan tropis Indonesia tetap menjadi isu krusial. Oleh karena itu, penyeragaman penanda "Reef Safe" serta pengaturan pemakaian *sunscreens* di zona pelestarian laut Indonesia bersifat esensial dan penting untuk meredam ancaman kimia yang melemahkan ketahanan terumbu karang yang dihadapkan pada tekanan perubahan iklim secara global.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala atas dukungan fasilitas akademik yang diberikan selama penyusunan artikel ulasan ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada dosen pengampu mata kuliah Toksikologi Lingkungan atas bimbingan dan arahnya sehingga artikel ini dapat diselesaikan sebagai kontribusi dalam pemahaman dampak polutan kosmetik terhadap ekosistem laut di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Agawin, N. S., García-Márquez, M. G., Espada, D. R., Freemantle, L., Herrera, M. G. P., & Tovar Sánchez, A. (2024). Science of the Total Environment Distribution and accumulation of UV filters (UVFs) and conservation status of *Posidonia oceanica* seagrass meadows in a prominent Mediterranean coastal tourist hub. *Science of the Total Environment*, 948(174784), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174784>
- Almeida, A. C., Reid, M., & Lillicrap, A. (2025). Ecotoxicology and Environmental Safety Specific toxicity of octinoxate and octocrylene on *Symbiodinium* sp., a symbiotic microalga with corals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 304(119151), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.119151>
- Anggraeni, S. R., Sari, Q. W., Utami, S. T., & Putriana, N. A. (2022). Pengetahuan dan Kesadaran Pentingnya Produk Eco-Friendly Skincare Bagi Ekosistem Perairan Indonesia. *Majalah Farmasetika*, 7(1), 65-72. <https://doi.org/10.24198/mfarmasetika.v7i1.36825>
- Astuti, M. P., Notodarmojo, S., Rianti, C., & Lokesh, P. (2023). Contaminants of emerging concerns

- (CECs) in a municipal wastewater treatment plant in Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 21512–21532. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23567-8>
- Bakir, M., Abad-alvaro, I., Laborda, F., & Slaveykova, V. I. (2025). Comparative assessment of uptake and effects of TiO₂ and CeO₂ nanoparticles in Algae using advanced single-entity analytical techniques. *Aquatic Toxicology*, 286(107430), 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2025.107430>
- Burns, E. E., & Davies, I. A. (2021). Coral Ecotoxicological Data Evaluation for the Environmental Safety Assessment of Ultraviolet Filters. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(12), 3441–3464. <https://doi.org/10.1002/etc.5229>
- Cadena-aizaga, M. I., Montesdeoca-esponda, S., Sosa-ferrera, Z., & Santana-rodríguez, J. (2022). Occurrence and environmental hazard of organic UV filters in seawater and wastewater from Gran Canaria Island (Canary Islands , Spain). *Environmental Pollution Journal*, 300(118843), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118843>
- Carve, M., Singh, N., Askeland, M., Allinson, G., & Shimeta, J. (2023). Salting - out assisted liquid – liquid extraction combined with LC – MS / MS for the simultaneous determination of seven organic UV filters in environmental water samples : method development and application. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(47), 104870–104885. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29646-8>
- Celeiro, M., Acerbi, R., Kabir, A., Furton, K. G., & Llompart, M. (2020). Analytica Chimica Acta : X Development of an analytical methodology based on fabric phase sorptive extraction followed by gas chromatography-tandem mass spectrometry to determine UV filters in environmental and recreational waters. *Analytica Chimica Acta: X*, 4(100038), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.acax.2019.100038>
- Conway, A. J., Gonsior, M., Clark, C., Heyes, A., & Mitchelmore, C. L. (2021). Science of the Total Environment Acute toxicity of the UV filter oxybenzone to the coral *Galaxea fascicularis*. *Science of the Total Environment*, 796(1016), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148666>
- Corinaldesi, C., Marcellini, F., Nepote, E., Damiani, E., & Danovaro, R. (2018). Science of the Total Environment Impact of inorganic UV filters contained in sunscreen products on tropical stony corals (*Acropora* spp .). *Science of the Total Environment*, 637–638(10), 1279–1285. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.108>
- Downs, C. A., Diaz-cruz, M. S., White, W. T., Rice, M., Jim, L., Dant, M., Gautam, K., Woodley, C. M., Walsh, K. O., Downs, E. M., Bishop, L., Garg, A., King, K., Paltin, T., Ellen, B., Cruises, W., & Kona, K. (2022). Beach showers as sources of contamination for sunscreen pollution in marine protected areas and areas of intensive beach tourism in Hawaii , U . S . A . *Journal of Hazardous Materials*, 438(129546), 1–48. <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- Downs, C. A., Kramarsky-Winter, E., Segal, R., Fauth, J., Knutson, S., Bronstein, O., & Loya, Y. (2016). Toxicopathological Effects of the Sunscreen UV Filter , Oxybenzone (Benzophenone-3), on Coral Planulae and Cultured Primary Cells and Its Environmental Contamination in Hawaii and the U . S . Virgin Islands. *Arch Environ Contam Toxicol*, 70(7), 265–288. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0227-7>
- Hodge, A. A., Hopkins, F. E., Saha, M., & Jha, A. N. (2025). Ecotoxicological effects of sunscreen derived organic and inorganic UV filters on marine organisms : A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, 213(117627), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117627>
- Koagouw, W., Arifin, Z., Olivier, G. W. J., & Ciocan, C. (2021). High concentrations of paracetamol in effluent dominated waters of Jakarta. *Marine Pollution Bulletin*, 169(112558), 1–6.

- <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112558>
- Ku, P. C., Liu, T. Y., Lee, S. H., Kung, T. A., & Wang, W. H. (2020). An environmentally friendly strategy for determining organic ultraviolet filters in seawater using liquid-phase microextraction with liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(9), 9818–9825. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07612-4>
- Labille, J., Slomberg, D., Catalano, R., Robert, S., Apers-tremelo, M., Boudenne, J., Manas, T., & Radakovitch, O. (2020). *Science of the Total Environment Assessing UV filter inputs into beach waters during recreational activity: A field study of three French Mediterranean beaches from consumer survey to water analysis*. 706(136010), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136010>
- Marbun, F. K., Tarigan, S. B., & Sudarti, S. (2023). Tinjauan Analisis Manfaat dan Dampak Sinar Ultraviolet Terhadap Kesehatan Manusia. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 3(3), 605–612. <https://doi.org/10.54082/jupin.235>
- Miller, I. B., Pawlowski, S., Kellermann, M. Y., Thiery, M. P., Moeller, M., Nietzer, S., & Schupp, P. J. (2021). Toxic effects of UV filters from sunscreens on coral reefs revisited : regulatory aspects for “ reef safe ” products. *Environmental Sciences Europe*, 33(74), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00515-w>
- Mitchelmore, C. L., Burns, E. E., Conway, A., Heyes, A., & Davies, I. A. (2021). A Critical Review of Organic Ultraviolet Filter Exposure , Hazard , and Risk to Corals. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(4), 967–988. <https://doi.org/10.1002/etc.4948>
- Mitchelmore, C. L., He, K., Gonsior, M., Hain, E., Heyes, A., Clark, C., & Blaney, L. (2019). Occurrence and distribution of UV-filters and other anthropogenic contaminants in coastal surface water, sediment, and coral tissue from Hawaii. *Science of the Total Environment*, 670, 398–410. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.034>
- Nieddu, M., Pasciu, V., Demontis, M. P., & Baralla, E. (2024). The Application of Liquid Chromatography for the Analysis of Organic UV Filters in Environmental and Marine Biota Matrices. *Separations*, 11(30), 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/separations11010030>
- Nozaki, K., Tanoue, R., Kunisue, T., Minh, N., Fujii, S., & Sudo, N. (2023). Science of the Total Environment Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in surface water and fish from three Asian countries : Species-specific bioaccumulation and potential ecological risks. *Science of the Total Environment*, 866(161258), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161258>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(71), 1–9. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pawlowski, S., Lütjens, L. H., Sinram, T., Willing, L. E., Tschentscher, D., Leubner, N., Sachers, S. S., Freitag, T., & Thiery, M. P. (2025). Cosmetic UV filters used in sunscreens and their impact on corals put into perspective. *Environmental Sciences Europe*, 37(173), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12302-025-01242-2>
- Pawlowski, S., Moeller, M., Miller, I. B., Kellermann, M. Y., & Schupp, P. J. (2021). *Special Series UV filters used in sunscreens — A lack in current coral protection?* 17(5), 926–939. <https://doi.org/10.1002/ieam.4454>
- Puebla-Domínguez, B., Rascón, A. J., Ávalos-Monroy, L., Palacios-Colón, L., & Ballesteros, E. (2025). Chemosphere Determination of octocrylene , benzophenone-3 and its derivatives in Spanish surface waters by solid-phase extraction / gas chromatography – mass spectrometry. *Chemosphere*, 380(144455), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144455>
- Rücker, J., Leonhardt, J., & Wild, C. (2025). Effects of three sunscreens on the ecophysiology of

- hard and soft corals from the Maldives. *Marine Pollution Bulletin*, 219(118316), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118316>
- Sudaryanto A, R O Witama, K Nosaki, R Tanoue, F Suciati1, S I Sachoemar, Y Hayami, A Morimoto, K. N. and T. K. (2023). Occurrence of emerging contaminants in Jakarta Bay , Indonesia : pharmaceuticals and personal care products Occurrence of emerging contaminants in Jakarta Bay , Indonesia : pharmaceuticals and personal care products. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1137(012050), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1137/1/012050>
- Sekartadji, B. P. P., Noviana, E., & Januarsa, A. (2023). Perancangan Kampanye Bahaya Tabir Surya Terhadap Terumbu Karang Bagi Remaja. *FAD*, 2(1), 1-13. <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/fad/article/view/2065>
- Vila, M., Facorro, R., Lamas, J. P., Garcia-Jares, C., Dagnac, T., & Llompert, M. (2016). Determination of fifteen water and fat-soluble UV filters in cosmetics by pressurized liquid extraction followed by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Analytical Methods*, 8(37), 6787-6794. <https://doi.org/10.1039/C6AY01195K>
- Wadoe, M., Syifaudin, D. S., Alfianna, W., Aifa, F. F., Narlika, D. P., Savitri, R. A., ... & Sulistyarini, A. (2019). Penggunaan Dan Pengetahuan Sunscreen Pada Mahasiswa Unair. *Jurnal Farmasi Komunitas*, 6(1), 1-8. <https://e-journal.unair.ac.id/JFK/article/download/21821/11966>
- Watkins, Y. S. D., & Sallach, J. B. (2021). Investigating the exposure and impact of chemical UV filters on coral reef ecosystems : Review and research gap prioritization. *Integr Environ Assess Manag*, 17(5), 967–981. <https://doi.org/10.1002/ieam.4411>
- Wijgerde, T., van Ballegooijen, M., Nijland, R., van der Loos, L., Kwadijk, C., Osinga, R., Murk, A., & Slijkerman, D. (2020). Adding insult to injury: effects of chronic oxybenzone exposure and elevated temperature on two reef-building corals. *Science of The Total Environment*, 733 (139030), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139030>
- Yuan, S., Huang, J., Jiang, X., Huang, Y., Zhu, X., & Cai, Z. (2022). Environmental Fate and Toxicity of Sunscreen-Derived Inorganic Ultraviolet Filters in Aquatic Environments : A Review. *Nanomaterials*, 12(699), 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nano12040699>
- Zulfiqar, H., Llompert, M., Castiñeira-Landeira, A., Coralli, I., Vassura, I., & Fabbri, D. (2026). Occurrence of twelve UV filters and evidence of cis-octinoxate formation in Adriatic coastal waters : Environmental implications. *Marine Pollution Bulletin Journal*, 225(119195), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.119195>