

Dampak Pencemaran Laut terhadap Distribusi dan Adaptasi Terumbu Karang di Berbagai Zona Biogeografi

Herlina Sattuang¹, Riska Wulandari²

¹ Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Wira Bhakti dan herlinasattuang@wirabhaktimakassar.ac.id

² Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Wira Bhakti dan
riskawulandarii3197@wirabhaktimakassar.ac.id

ABSTRAK

Terumbu karang merupakan salah satu ekosistem laut yang paling rentan terhadap pencemaran laut yang disebabkan oleh aktivitas antropogenik dan perubahan iklim. Studi ini bertujuan untuk mengkaji dampak pencemaran laut terhadap distribusi dan adaptasi terumbu karang di berbagai zona biogeografi serta memberikan rekomendasi konservasi yang efektif. Kajian literatur menunjukkan bahwa pencemaran laut, termasuk limpasan limbah domestik dan industri, peningkatan kadar nutrisi yang menyebabkan eutrofikasi, serta akumulasi polutan kimia dan mikroplastik, telah menyebabkan degradasi terumbu karang secara signifikan di berbagai wilayah. Dampak pencemaran ini bervariasi antar zona biogeografi, tergantung pada faktor oseanografi dan tingkat tekanan lingkungan. Beberapa spesies karang menunjukkan mekanisme adaptasi melalui perubahan simbiosis dengan zooxanthellae yang lebih tahan terhadap kondisi ekstrem serta peningkatan toleransi terhadap sedimentasi dan polutan kimiawi. Namun, adaptasi ini memiliki keterbatasan dan tidak dapat sepenuhnya melindungi ekosistem terumbu karang dari tekanan lingkungan yang semakin meningkat. Oleh karena itu, upaya konservasi yang komprehensif diperlukan, termasuk pengurangan sumber pencemaran, pemantauan ekosistem, restorasi terumbu karang, serta peningkatan kesadaran masyarakat dan pengembangan zona perlindungan laut. Dengan langkah-langkah ini, diharapkan ekosistem terumbu karang dapat tetap lestari dan memberikan manfaat ekologis serta ekonomi bagi keberlanjutan lingkungan laut.

Kata Kunci: Terumbu Karang, Pencemaran Laut, Adaptasi, Zona Biogeografi, Konservasi

ABSTRACT

Coral reefs are one of the most biodiverse marine ecosystems, yet they are highly vulnerable to environmental changes and pollution. This study examines the impact of marine pollution on coral reef distribution across various biogeographic zones and the adaptive mechanisms that enable coral survival under stress. The findings indicate that pollution from domestic, agricultural, and industrial sources significantly affects coral health and distribution. In the Indo-Pacific region, eutrophication from river discharge and microplastic contamination disrupts coral growth. In the Indian Ocean, rising sea temperatures, combined with persistent organic pollutants, contribute to mass coral bleaching events. The Caribbean reefs face degradation due to nutrient runoff and hydrocarbon pollution, while the Pacific reefs are increasingly affected by microplastic accumulation. Moreover, chemical pollutants such as heavy metals and pesticides interfere with coral metabolism, leading to increased mortality. Some coral species exhibit adaptive responses, including symbiotic shifts with resilient zooxanthellae and enhanced feeding strategies in turbid waters. However, these adaptations are not sufficient to counteract the rapid environmental changes caused by human activities. Conservation efforts should focus on pollution reduction, coral restoration, community engagement, and marine protected areas. Implementing adaptive management strategies based on coral resilience will be crucial to sustaining coral reef ecosystems in the future.

Keywords: Coral Reefs, Marine Pollution, Biogeographic Zones, Adaptation, Conservation

PENDAHULUAN

Terumbu karang merupakan salah satu ekosistem laut yang paling produktif dan memiliki tingkat keanekaragaman hayati yang sangat tinggi. Ekosistem ini tidak hanya berperan sebagai

habitat bagi berbagai spesies laut, tetapi juga berkontribusi dalam menjaga keseimbangan ekosistem pesisir, termasuk sebagai pelindung alami terhadap abrasi dan gelombang laut. Terumbu karang tersebar di berbagai zona biogeografi laut, yang masing-masing memiliki karakteristik lingkungan yang berbeda, seperti suhu, salinitas, intensitas cahaya, serta pola arus laut. Faktor-faktor ini berperan penting dalam menentukan distribusi dan adaptasi terumbu karang di berbagai wilayah perairan (Hughes dkk., 2017). Namun, dalam beberapa dekade terakhir, tekanan lingkungan akibat aktivitas manusia semakin meningkat, menyebabkan degradasi ekosistem terumbu karang secara global. Salah satu ancaman terbesar yang dihadapi terumbu karang saat ini adalah pencemaran laut, yang berdampak langsung maupun tidak langsung terhadap kelangsungan hidup ekosistem ini.

Pencemaran laut berasal dari berbagai sumber, baik dari aktivitas di daratan maupun di laut. Sumber pencemaran dari daratan umumnya berasal dari limpasan limbah industri, domestik, dan pertanian yang mengandung polutan seperti logam berat, pestisida, serta senyawa organik persisten. Polutan-polutan ini dapat terakumulasi di lingkungan laut dan menyebabkan stres fisiologis pada terumbu karang, menghambat pertumbuhan, serta meningkatkan risiko pemutihan dan kematian karang (Fabricius, 2005). Selain itu, eutrofikasi akibat peningkatan kadar nutrisi seperti nitrogen dan fosfor dari limbah pertanian dan domestik dapat memicu ledakan populasi alga. Pertumbuhan alga yang berlebihan dapat bersaing dengan karang dalam mendapatkan ruang dan cahaya, yang pada akhirnya menurunkan tingkat kelangsungan hidup terumbu karang (Burkpile & Hay, 2006). Polusi plastik, terutama dalam bentuk mikroplastik, semakin menjadi perhatian karena dapat merusak jaringan karang, mengganggu proses fotosintesis zooxanthellae, serta berdampak negatif terhadap sistem reproduksi dan regenerasi karang (Lamb dkk., 2018).

Dampak pencemaran laut terhadap terumbu karang juga dipengaruhi oleh zona biogeografi tempat mereka berada. Terumbu karang di perairan tropis, misalnya, lebih rentan terhadap perubahan suhu dan pencemaran dibandingkan dengan yang berada di zona subtropis atau sedang, karena suhu yang lebih tinggi dapat mempercepat proses pemutihan dan meningkatkan sensitivitas terhadap polutan (Hoegh-Guldberg dkk., 2017). Selain itu, kemampuan adaptasi spesies karang terhadap polutan juga menentukan distribusi mereka di berbagai zona biogeografi. Beberapa spesies karang telah menunjukkan mekanisme adaptasi, seperti perubahan simbiosis dengan jenis zooxanthellae yang lebih tahan terhadap stres lingkungan, sementara spesies lainnya mengalami pemutihan massal dan penurunan populasi secara drastis akibat perubahan lingkungan yang ekstrem (Grottoli dkk., 2021).

Selain faktor biologis, perubahan fisik lingkungan akibat pencemaran juga berkontribusi terhadap degradasi terumbu karang. Peningkatan sedimentasi akibat erosi daratan, misalnya, dapat mengurangi penetrasi cahaya ke dalam perairan, yang berdampak negatif terhadap proses fotosintesis zooxanthellae dan menghambat pertumbuhan karang (Rogers & Ramos-Scharrón, 2022). Sementara itu, pencemaran kimiawi dari tumpahan minyak dan senyawa organik persisten dapat merusak jaringan karang secara langsung, mengganggu keseimbangan ekosistem terumbu karang, serta meningkatkan tingkat kematian organisme laut yang bergantung pada ekosistem ini.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian literatur mengenai dampak pencemaran laut terhadap distribusi dan adaptasi terumbu karang di berbagai zona biogeografi. Kajian ini akan membahas jenis-jenis polutan yang paling berpengaruh, mekanisme adaptasi yang dilakukan oleh karang, serta bagaimana perubahan lingkungan akibat pencemaran mempengaruhi pola distribusi mereka. Dengan pemahaman yang lebih mendalam mengenai interaksi antara pencemaran laut dan

ekosistem terumbu karang, diharapkan dapat diperoleh rekomendasi yang lebih efektif untuk upaya konservasi dan pengelolaan ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan.

LANDASAN TEORI

A. Ekologi Terumbu Karang dan Zona Biogeografi

Terumbu karang adalah ekosistem kompleks yang terdiri dari koloni polip karang yang bersimbiosis dengan alga zooxanthellae. Hubungan simbiosis ini sangat penting bagi kelangsungan hidup terumbu karang, karena zooxanthellae menyediakan sumber energi bagi karang melalui proses fotosintesis. Keberadaan terumbu karang sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu air, intensitas cahaya, kadar nutrisi, dan tingkat sedimentasi (Hoegh-Guldberg dkk., 2017). Zona biogeografi laut merupakan wilayah dengan karakteristik fisik, kimia, dan biologi yang serupa, yang secara langsung mempengaruhi distribusi dan komposisi spesies karang.

Beberapa zona biogeografi utama yang menjadi habitat terumbu karang meliputi:

1. Zona Tropis: Wilayah ini memiliki suhu yang relatif tinggi sepanjang tahun, menjadikannya habitat utama bagi terumbu karang. Namun, ekosistem di zona ini sangat rentan terhadap pemanasan global, yang dapat menyebabkan pemutihan karang secara massal;
2. Zona Subtropis dan Sedang: Suhu di wilayah ini lebih bervariasi, dan beberapa spesies karang telah menunjukkan kemampuan adaptasi terhadap perubahan lingkungan yang lebih ekstrem;
3. Zona Perairan Dalam: Beberapa spesies karang laut dalam mampu bertahan dalam kondisi intensitas cahaya rendah dan tekanan tinggi, serta memiliki mekanisme fisiologis khusus untuk beradaptasi terhadap lingkungan ekstrem (Rahmawati dkk., 2025).

B. Jenis Pencemaran Laut dan Dampaknya terhadap Terumbu Karang

Pencemaran laut dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber dan dampaknya terhadap ekosistem terumbu karang. Beberapa jenis pencemaran utama meliputi:

1. Pencemaran Kimiawi: Meliputi kontaminasi oleh logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), dan kadmium (Cd), serta senyawa organik persisten seperti PCB dan DDT, yang dapat menyebabkan gangguan metabolisme dan stres fisiologis pada karang;
2. Eutrofikasi: Peningkatan kadar nutrisi seperti nitrogen dan fosfor dari limbah domestik dan pertanian dapat memicu pertumbuhan alga berlebih, yang bersaing dengan karang untuk mendapatkan ruang dan cahaya serta menyebabkan penurunan ketersediaan oksigen;
3. Pencemaran Plastik dan Mikroplastik: Plastik dan mikroplastik dapat menyebabkan gangguan mekanis pada jaringan karang, mengurangi efisiensi

fotosintesis zooxanthellae, serta mempengaruhi kesehatan dan proses reproduksi karang;

4. Sedimentasi Berlebih: Aktivitas seperti deforestasi dan konstruksi di daratan dapat meningkatkan tingkat sedimentasi di perairan, yang mengurangi kecerahan air dan menghambat pertumbuhan karang (Burkepile & Hay, 2006; Fabricius, 2005; Lamb dkk., 2018; Rogers & Ramos-Scharrón, 2022).

C. Mekanisme Adaptasi Terumbu Karang terhadap Pencemaran

Untuk bertahan dalam kondisi lingkungan yang semakin tercemar, beberapa spesies karang telah mengembangkan mekanisme adaptasi, antara lain:

1. Perubahan Simbiosis Zooxanthellae: Karang dapat mengganti jenis zooxanthellae dengan varian yang lebih tahan terhadap stres lingkungan, sehingga meningkatkan toleransi terhadap suhu tinggi dan polusi;
2. Toleransi terhadap Kekeruhan Air: Beberapa spesies karang mampu beradaptasi dengan tingkat sedimentasi tinggi dengan meningkatkan efisiensi penyaringan makanannya;
3. Resistensi terhadap Logam Berat: Beberapa jenis karang memiliki mekanisme detoksifikasi untuk mengurangi dampak toksisitas logam berat dalam jaringan mereka (Grottoli dkk., 2021).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur atau tinjauan pustaka untuk mengkaji dampak pencemaran laut terhadap distribusi dan adaptasi terumbu karang. Data dikumpulkan dari jurnal ilmiah, buku, laporan penelitian, dan dokumen resmi yang relevan dengan topik ini. Analisis dilakukan dengan pendekatan kualitatif untuk mengidentifikasi pola dan hubungan antara pencemaran laut dan perubahan ekosistem terumbu karang di berbagai zona biogeografi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Dampak Pencemaran Laut terhadap Distribusi Terumbu Karang di Berbagai Zona Biogeografi

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa pencemaran laut memiliki dampak yang beragam terhadap distribusi terumbu karang di berbagai zona biogeografi, tergantung pada tingkat pencemaran, kondisi oseanografi, dan karakteristik ekosistem setempat. Zona biogeografi laut dibedakan berdasarkan faktor lingkungan seperti suhu, salinitas, arus laut, dan keberadaan penghalang geologi yang mempengaruhi penyebaran spesies karang.

1. Zona Indo-Pasifik Barat

Zona Indo-Pasifik Barat, yang mencakup kawasan Asia Tenggara, termasuk Segitiga Terumbu Karang (Coral Triangle), memiliki keanekaragaman karang tertinggi di dunia. Namun, tekanan dari pencemaran limbah domestik, pertanian, dan industri sangat tinggi di kawasan ini. Limbah kaya nutrisi dari sungai besar seperti Mekong dan Kapuas berkontribusi terhadap

eutrofikasi, yang memicu ledakan populasi alga dan menghambat pertumbuhan karang. Selain itu, pencemaran plastik di perairan Indonesia dan Filipina telah menyebabkan gangguan pada ekosistem karang, dengan mikroplastik yang menempel pada jaringan karang dan menghambat proses fotosintesis zooxanthellae (Fabricius, 2005).

2. Zona Samudra Hindia

Di kawasan Samudra Hindia, seperti terumbu karang di Maladewa dan pesisir timur Afrika, peningkatan suhu laut akibat perubahan iklim yang diperparah oleh limpasan limbah dari daratan telah menyebabkan peristiwa pemutihan karang yang meluas. Misalnya, peristiwa El Niño 1998 dan 2016 menyebabkan lebih dari 60% karang di Maladewa mengalami pemutihan dan kematian (Hughes dkk., 2017). Zona ini juga mengalami akumulasi polutan organik persisten yang terbawa arus dari perairan Asia Selatan, yang dapat mengganggu sistem imun karang dan meningkatkan risiko penyakit.

3. Zona Karibia dan Atlantik Barat

Terumbu karang di zona Karibia menghadapi tantangan besar dari pencemaran akibat aktivitas pariwisata, limpasan pertanian, dan pengelolaan limbah yang buruk. Peningkatan kadar nitrogen dan fosfor dari pupuk pertanian di wilayah seperti Florida Keys dan Bahama telah memicu eutrofikasi yang menyebabkan alga mendominasi substrat karang. Selain itu, kontaminasi hidrokarbon dari aktivitas pelayaran dan industri minyak di Teluk Meksiko memperparah degradasi karang. Studi menunjukkan bahwa spesies karang di Karibia lebih rentan terhadap penyakit yang diperparah oleh pencemaran dibandingkan dengan spesies di Indo-Pasifik (Burkepile & Hay, 2006)

4. Zona Pasifik Tengah dan Timur

Zona Pasifik Tengah, termasuk Hawaii dan Kepulauan Pasifik lainnya, memiliki ekosistem terumbu karang yang lebih terlindungi dari aktivitas manusia dibandingkan dengan zona lainnya. Namun, dampak pencemaran mikroplastik di kawasan ini mulai meningkat akibat akumulasi sampah laut di Great Pacific Garbage Patch. Selain itu, perubahan pola arus akibat pemanasan global telah menyebabkan pergeseran distribusi spesies karang ke perairan yang lebih dalam, di mana kondisi termal lebih stabil dan tingkat pencemaran lebih rendah (Grottoli dkk., 2021)

5. Zona Laut Kutub dan Subtropis

Terumbu karang di perairan subtropis seperti Laut Jepang dan pesisir Australia bagian selatan mengalami tekanan akibat pencemaran industri dan sedimentasi yang meningkat akibat deforestasi pesisir. Di sisi lain, zona kutub mulai menunjukkan tanda-tanda ekspansi spesies karang yang sebelumnya hanya ditemukan di daerah tropis, sebagai respons terhadap pemanasan laut. Namun, peningkatan kadar karbon dioksida menyebabkan penurunan pH laut (ocean acidification), yang menghambat kemampuan karang dalam membentuk kerangka kalsium karbonat (Rogers & Ramos-Scharrón, 2022).

B. Dampak Pencemaran Kimiawi terhadap Adaptasi Terumbu Karang

Pencemaran kimiawi, terutama dari logam berat dan senyawa organik persisten, berdampak langsung pada proses metabolisme karang. Studi menunjukkan bahwa paparan merkuri (Hg) dan

kadmium (Cd) dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan gangguan pada jaringan karang, menghambat pertumbuhan, dan meningkatkan tingkat kematian karang (Lamb dkk., 2018). Selain itu, polutan seperti pestisida dan hidrokarbon aromatik yang berasal dari limpasan industri dan pertanian juga berkontribusi terhadap penurunan ketahanan karang terhadap stres lingkungan.

Dalam beberapa kasus, terumbu karang telah menunjukkan mekanisme adaptasi terhadap pencemaran kimiawi, misalnya dengan mengubah jenis zooxanthellae yang bersimbiosis dengannya. Karang yang mampu beradaptasi dengan zooxanthellae yang lebih tahan terhadap suhu tinggi dan polutan memiliki peluang bertahan yang lebih besar di perairan tercemar (Grottoli dkk., 2021). Namun, adaptasi ini memiliki keterbatasan dan tidak dapat sepenuhnya melindungi karang dari efek jangka panjang pencemaran.

C. Pengaruh Eutrofikasi terhadap Kesehatan Terumbu Karang

Eutrofikasi akibat peningkatan kadar nitrogen dan fosfor dari limbah pertanian dan domestik telah menyebabkan ledakan populasi alga yang menghambat pertumbuhan terumbu karang. Studi menunjukkan bahwa di wilayah dengan tingkat eutrofikasi tinggi, alga mendominasi substrat yang sebelumnya ditempati oleh karang, sehingga menyebabkan perubahan ekosistem yang signifikan (Burkepile & Hay, 2006). Selain itu, peningkatan kadar nutrisi juga berdampak pada perubahan komunitas mikroba yang dapat meningkatkan risiko penyakit karang.

Terumbu karang di zona pesisir yang menerima limpasan limbah lebih banyak cenderung memiliki laju pertumbuhan lebih rendah dan tingkat mortalitas lebih tinggi dibandingkan dengan yang berada di perairan terbuka. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan nutrisi yang berlebihan dapat menjadi faktor utama dalam menurunkan ketahanan karang terhadap perubahan lingkungan.

D. Pencemaran Plastik dan Mikroplastik sebagai Ancaman Baru bagi Terumbu Karang

Pencemaran plastik, terutama dalam bentuk mikroplastik, telah ditemukan berdampak negatif terhadap kesehatan terumbu karang. Mikroplastik dapat menghambat proses respirasi karang, menyebabkan stres oksidatif, dan mengganggu proses fotosintesis zooxanthellae (Lamb dkk., 2018). Studi terbaru menunjukkan bahwa di perairan dengan tingkat pencemaran mikroplastik tinggi, karang mengalami peningkatan insiden nekrosis jaringan dan penurunan efisiensi metabolisme.

Selain itu, mikroplastik juga dapat menjadi vektor bagi patogen yang dapat menyebabkan penyakit pada terumbu karang. Misalnya, mikroplastik yang terkontaminasi bakteri patogen dapat meningkatkan risiko infeksi pada karang, yang pada akhirnya mempercepat degradasi ekosistem terumbu karang (Rogers & Ramos-Scharrón, 2022).

E. Mekanisme Adaptasi Terumbu Karang terhadap Pencemaran Laut

Meskipun dampak pencemaran laut terhadap terumbu karang sangat signifikan, beberapa spesies karang telah menunjukkan mekanisme adaptasi yang memungkinkan mereka bertahan dalam kondisi lingkungan yang semakin memburuk. Adaptasi ini menjadi kunci dalam mempertahankan keberlanjutan ekosistem terumbu karang, terutama di tengah tekanan akibat perubahan iklim dan pencemaran antropogenik yang terus meningkat. Berbagai mekanisme adaptasi yang telah teridentifikasi meliputi strategi fisiologis, morfologi, dan ekologi, yang memungkinkan spesies tertentu untuk tetap bertahan meskipun kondisi lingkungan mengalami degradasi.

Salah satu mekanisme adaptasi utama adalah perubahan simbiosis zooxanthellae. Karang dapat beralih ke jenis zooxanthellae yang lebih tahan terhadap suhu tinggi dan pencemaran kimiawi, yang meningkatkan peluang kelangsungan hidup mereka dalam kondisi yang lebih ekstrem (Grottoli dkk., 2021). Simbiosis ini memungkinkan karang untuk tetap mendapatkan suplai energi meskipun terjadi pemanasan laut atau peningkatan polutan di lingkungan sekitarnya. Namun, pergantian jenis zooxanthellae tidak selalu menjamin kelangsungan hidup jangka panjang, karena beberapa strain yang lebih resisten sering kali memiliki efisiensi fotosintesis yang lebih rendah dibandingkan dengan strain asli, sehingga dapat mempengaruhi pertumbuhan dan reproduksi karang dalam jangka panjang (HS, 2024; Hs dkk., 2024).

Selain itu, beberapa spesies karang juga menunjukkan toleransi terhadap kekeruhan air dengan meningkatkan efisiensi dalam menangkap partikel makanan dari air yang lebih keruh. Adaptasi ini umumnya ditemukan pada spesies karang yang hidup di perairan dengan tingkat sedimentasi tinggi, seperti yang terjadi akibat aktivitas konstruksi di pesisir, deforestasi, atau erosi lahan (Rogers & Ramos-Scharrón, 2022). Karang yang mampu meningkatkan efisiensi penyaringan makanannya memiliki peluang lebih besar untuk bertahan dalam kondisi di mana intensitas cahaya berkurang akibat tingginya kadar partikel tersuspensi di perairan.

Di samping itu, beberapa spesies karang menunjukkan resistensi terhadap logam berat, yaitu dengan mengembangkan mekanisme detoksifikasi yang dapat mengurangi dampak toksisitas logam berat dalam jaringan mereka. Logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), dan kadmium (Cd) sering kali terakumulasi dalam ekosistem laut akibat aktivitas industri dan limbah domestik. Karang yang memiliki kemampuan untuk mengisolasi atau mengeliminasi logam berat dari jaringan tubuhnya lebih mungkin untuk bertahan dibandingkan dengan spesies yang lebih rentan terhadap akumulasi zat toksik.

Namun, meskipun beberapa spesies karang mampu menunjukkan adaptasi terhadap berbagai bentuk pencemaran, tidak semua spesies memiliki ketahanan yang sama. Banyak spesies mengalami penurunan populasi yang drastis akibat tekanan lingkungan yang meningkat, terutama yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi terhadap perubahan lingkungan. Pemutihan karang massal yang sering terjadi dalam beberapa dekade terakhir merupakan bukti nyata bahwa mekanisme adaptasi yang dimiliki oleh beberapa spesies tidak selalu cukup untuk mengimbangi perubahan lingkungan yang terjadi dengan cepat.

Oleh karena itu, diperlukan upaya konservasi yang lebih efektif untuk melindungi terumbu karang dari dampak pencemaran laut yang terus meningkat. Strategi mitigasi yang dapat dilakukan mencakup pengurangan sumber pencemaran, pengelolaan kawasan konservasi, serta pemulihan ekosistem terumbu karang melalui restorasi dan rehabilitasi. Selain itu, pemahaman lebih lanjut mengenai mekanisme adaptasi karang dapat menjadi dasar bagi pengembangan strategi konservasi berbasis ekologi adaptif, yang mempertimbangkan toleransi spesies terhadap perubahan lingkungan serta potensinya dalam mempertahankan keanekaragaman ekosistem laut di masa depan.

E. Implikasi dan Rekomendasi untuk Konservasi Terumbu Karang

Untuk memperkuat upaya konservasi terumbu karang, beberapa langkah strategis dapat diambil:

1. **Pengurangan Sumber Pencemaran:** Mengurangi limpasan limbah domestik, industri, dan pertanian yang mengandung polutan berbahaya ke perairan laut sangat penting

untuk menjaga kesehatan terumbu karang. Pencemaran dapat menyebabkan eutrofikasi dan menurunkan kualitas air, yang berdampak negatif pada ekosistem terumbu karang;

2. **Pemantauan dan Restorasi Terumbu Karang:** Penggunaan teknologi pemantauan berbasis satelit dan drone memungkinkan deteksi perubahan kondisi terumbu karang secara real-time. Selain itu, metode restorasi seperti transplantasi karang dan teknologi Biorock telah diterapkan di berbagai wilayah Indonesia, termasuk di Taman Nasional Kepulauan Seribu, untuk mempercepat pertumbuhan dan pemulihan terumbu karang yang rusak;
3. **Peningkatan Kesadaran Masyarakat:** Melibatkan komunitas lokal dalam program konservasi dan edukasi tentang pentingnya menjaga kebersihan laut sangat krusial. Inisiatif seperti program adopsi karang di Taman Nasional Kepulauan Seribu telah berhasil meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pelestarian terumbu karang;
4. **Pengembangan Zona Perlindungan Laut:** Menetapkan kawasan konservasi laut yang membatasi aktivitas manusia yang dapat merusak ekosistem terumbu karang merupakan langkah efektif dalam melindungi keanekaragaman hayati laut. Program COREMAP (Coral Reef Rehabilitation and Management Program) telah berkontribusi signifikan dalam pengelolaan dan perlindungan terumbu karang di Indonesia melalui pendekatan desentralisasi berbasis masyarakat (KSDAE, 2022; World Bank Group, 2023).

Dengan implementasi langkah-langkah konservasi yang komprehensif ini, diharapkan ekosistem terumbu karang dapat bertahan dan terus memberikan manfaat ekologis serta ekonomi bagi generasi mendatang.

KESIMPULAN

Pencemaran laut memiliki dampak yang signifikan terhadap distribusi dan adaptasi terumbu karang di berbagai zona biogeografi. Faktor pencemaran seperti limpasan limbah domestik dan industri, peningkatan kadar nutrisi, polutan kimia, serta akumulasi plastik dan mikroplastik telah menyebabkan degradasi ekosistem terumbu karang. Meskipun beberapa spesies karang menunjukkan mekanisme adaptasi, seperti perubahan simbiosis dengan zooxanthellae yang lebih toleran serta peningkatan kemampuan bertahan terhadap sedimentasi dan polutan kimia, adaptasi ini memiliki keterbatasan dalam menghadapi tekanan lingkungan yang terus meningkat.

Berbagai strategi konservasi diperlukan untuk melindungi ekosistem terumbu karang, di antaranya pengurangan sumber pencemaran, pemantauan dan restorasi ekosistem, peningkatan kesadaran masyarakat, serta pengembangan zona perlindungan laut. Implementasi konservasi berbasis ekologi adaptif dan pengelolaan berbasis masyarakat, seperti yang dilakukan dalam program COREMAP, menjadi langkah penting dalam menjaga keberlanjutan terumbu karang. Dengan pendekatan yang terintegrasi dan berbasis ilmiah, ekosistem terumbu karang dapat dipertahankan untuk mendukung

keseimbangan ekologi dan memberikan manfaat jangka panjang bagi manusia serta lingkungan.

REFERENSI

- Burkepile, D. E., & Hay, M. E. (2006). Herbivore Vs. Nutrient Control of Marine Primary Producers: Context-Dependent Effects. *Ecology*, 87(12), 3128–3139. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[3128:HVNCOM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[3128:HVNCOM]2.0.CO;2)
- Fabricius, K. E. (2005). Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: Review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 50(2), 125–146. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.11.028>
- Grottoli, A. G., Toonen, R. J., van Woesik, R., Vega Thurber, R., Warner, M. E., McLachlan, R. H., Price, J. T., Bahr, K. D., Baums, I. B., Castillo, K. D., Coffroth, M. A., Cunning, R., Dobson, K. L., Donahue, M. J., Hench, J. L., Iglesias-Prieto, R., Kemp, D. W., Kenkel, C. D., Kline, D. I., ... Wu, H. C. (2021). Increasing comparability among coral bleaching experiments. *Ecological Applications*, 31(4), e02262. <https://doi.org/10.1002/eap.2262>
- Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E. S., Skirving, W., & Dove, S. (2017). Coral Reef Ecosystems under Climate Change and Ocean Acidification. *Frontiers in Marine Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00158>
- HS, S. M. (2024). Kenaikan Suhu Laut dan Kerusakan Karang: Analisis Dampak Jangka Panjang Terhadap Ekosistem Terumbu Karang. *West Science Press*, 3(8), 1195–1203. <https://doi.org/10.58812/jmws.v3i08.1569>
- Hs, S. M., Dharma, S., & Zainuddin, M. (2024). Utilizing Sediment Microbial Fuel Cells (SMFCs) for Bioremediation in Coral Transplantation at Samalona Island. *ARRUS Journal of Engineering and Technology*, 4(2), 165–175. <https://doi.org/10.35877/jetech3147>
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., van de Leemput, I. A., Lough, J. M., Morrison, T. H., Palumbi, S. R., van Nes, E. H., & Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(1), 82–89. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- KSDAE, D. (2022). *Pelestarian Terumbu Karang Melalui Adopsi Coral di Taman Nasional Kepulauan Seribu – Ditjen Konservasi Sumber Daya Alam dan Ekosistem*. <http://ksdae.menlhk.go.id>
- Lamb, J. B., Willis, B. L., Fiorenza, E. A., Couch, C. S., Howard, R., Rader, D. N., True, J. D., Kelly, L. A., Ahmad, A., Jompa, J., & Harvell, C. D. (2018). Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science*, 359(6374), 460–462. <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Rahmawati, A., Azril, Muh., Setyastuti, T. A., HS, S. M., Wijiyanto, C., Zainuddin, M., & Sabilah, A. A. (2025). *Ekologi Laut*. Get Press Indonesia.
- Rogers, C. S., & Ramos-Scharrón, C. E. (2022). Assessing Effects of Sediment Delivery to Coral Reefs: A Caribbean Watershed Perspective. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.773968>
- World Bank Group. (2023, Juni 8). *Warisan Seperempat Abad Konservasi Terumbu Karang dan Dampaknya Bagi Masyarakat Indonesia* [Text/HTML]. World Bank. <https://www.worldbank.org/in/news/feature/2023/06/08/a-quarter-century-legacy-of-coral-reef-conservation-and-community-impact-in-indonesia>