

Kenaikan Suhu Laut dan Kerusakan Karang: Analisis Dampak Jangka Panjang Terhadap Ekosistem Terumbu Karang

Sri Magfirah HS

Universitas Syekh Yusuf Al Makassar Gowa dan magfirahsri@gmail.com

ABSTRAK

Pemanasan global dan kenaikan suhu laut telah menjadi ancaman utama bagi ekosistem terumbu karang. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang yang ditimbulkan oleh kenaikan suhu laut terhadap kerusakan karang serta terhadap ekosistem terumbu karang secara keseluruhan. Kajian ini mencakup analisis terhadap penelitian-penelitian sebelumnya mengenai efek dari peningkatan suhu laut terhadap kesehatan, pertumbuhan, dan struktur terumbu karang. Hasil tinjauan literatur mengungkapkan bahwa suhu laut yang lebih tinggi menyebabkan pemutihan karang, penurunan kesehatan karang, serta kerusakan struktural pada terumbu karang. Dampak ini juga berpengaruh pada spesies lain yang bergantung pada ekosistem terumbu karang, mengakibatkan penurunan keanekaragaman hayati dan gangguan keseimbangan ekosistem. Selain itu, penelitian ini mengevaluasi berbagai strategi mitigasi dan adaptasi yang telah diusulkan untuk mengurangi dampak negatif tersebut dan meningkatkan ketahanan ekosistem terumbu karang. Temuan dari kajian ini menegaskan pentingnya pelaksanaan konservasi dan pengelolaan yang lebih efektif untuk melindungi terumbu karang dari dampak perubahan suhu laut. Rekomendasi untuk penelitian lebih lanjut mencakup pengembangan teknologi adaptasi serta kebijakan pengelolaan yang lebih efektif guna mendukung keberlanjutan ekosistem terumbu karang.

Kata Kunci: Kenaikan Suhu Laut, Konservasi Laut, Ekosistem Terumbu Karang

ABSTRACT

Global warming and rising sea temperatures have emerged as significant threats to coral reef ecosystems. This study aims to evaluate the long-term impacts of increased sea temperatures on coral damage and the overall coral reef ecosystem. The review includes an analysis of previous research regarding the effects of elevated sea temperatures on coral health, growth, and structural integrity of coral reefs. The literature review reveals that higher sea temperatures lead to coral bleaching, decreased coral health, and structural damage to coral reefs. These impacts also affect other species dependent on coral reef ecosystems, resulting in reduced biodiversity and disruption of ecosystem balance. Furthermore, this study assesses various proposed mitigation and adaptation strategies designed to mitigate these adverse effects and enhance the resilience of coral reef ecosystems. The findings underscore the critical need for more effective conservation and management practices to protect coral reefs from the impacts of rising sea temperatures. Recommendations for future research include the development of adaptive technologies and more effective management policies to support the sustainability of coral reef ecosystems.

Keywords: Sea Temperature Rise, Marine Conservation, Coral Reef Ecosystem

PENDAHULUAN

Pemanasan global, yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, telah menyebabkan kenaikan suhu rata-rata Bumi. Proses ini dimulai ketika energi dari sinar matahari diserap oleh permukaan Bumi dan kemudian dipancarkan kembali dalam bentuk panas. Gas rumah kaca di atmosfer, seperti karbon dioksida dan klorofluorokarbon, menahan sebagian besar panas ini, yang secara alami menjaga Bumi tetap hangat. Namun, aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi telah memperkuat efek rumah kaca ini, mengakibatkan peningkatan suhu global yang signifikan (Suhartawan dkk., 2024).

Peningkatan suhu global tidak hanya memengaruhi atmosfer, tetapi juga menyebabkan kenaikan suhu air laut. Lautan menyerap sebagian besar panas yang terperangkap oleh gas rumah kaca, menyebabkan suhu air laut meningkat secara signifikan. Kenaikan suhu air laut ini berdampak pada berbagai aspek ekosistem laut, termasuk pergeseran distribusi spesies, pemutihan karang, dan perubahan pola cuaca global. Berdasarkan model iklim, suhu air laut diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan kenaikan suhu global, dengan dampak yang semakin parah terhadap kehidupan laut dan manusia. Perubahan ini berpotensi mengganggu rantai makanan laut, mengurangi produktivitas perikanan, dan meningkatkan frekuensi serta intensitas badai (Cheng dkk., 2019; Suhartawan dkk., 2024).

Terumbu karang, yang merupakan salah satu ekosistem laut paling beragam dan produktif di dunia, sangat sensitif terhadap perubahan suhu laut. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa kenaikan suhu laut di atas rata-rata dapat memicu pemutihan karang secara massal. Pemutihan karang adalah kondisi di mana karang mengeluarkan zooxanthellae—alga simbiotik yang memberikan karang warna serta nutrisi penting. Ketika karang kehilangan zooxanthellae, mereka tidak hanya kehilangan warna tetapi juga kemampuan untuk bertahan hidup karena kekurangan nutrisi. Pemutihan karang yang parah dan berkepanjangan dapat menyebabkan kematian karang secara besar-besaran, mengancam keanekaragaman hayati laut dan mengurangi fungsi ekosistem yang bergantung pada terumbu karang (Hoegh-Guldberg dkk., 2007).

Mengidentifikasi dan memahami dampak jangka panjang dari kenaikan suhu laut terhadap terumbu karang sangat penting untuk pengembangan strategi konservasi yang efektif. Penelitian ini akan mengeksplorasi bagaimana perubahan suhu laut yang diinduksi oleh pemanasan global mempengaruhi kesehatan terumbu karang, serta mengevaluasi potensi solusi untuk mengurangi kerusakan dan meningkatkan ketahanan ekosistem terumbu karang terhadap perubahan iklim di masa depan. Fokus utama penelitian ini adalah untuk menganalisis dampak jangka panjang dari perubahan suhu laut terhadap kesehatan terumbu karang dan menilai berbagai pendekatan konservasi yang dapat diterapkan untuk mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim global.

LANDASAN TEORI

A. Pemanasan Global dan Kenaikan Suhu Laut

Pemanasan global merujuk pada fenomena peningkatan suhu rata-rata permukaan Bumi yang disebabkan oleh akumulasi gas rumah kaca di atmosfer. Gas-gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan oksida nitrat (NO_x) memiliki kemampuan untuk menyerap radiasi inframerah yang dipancarkan oleh permukaan Bumi dan memancarkannya kembali ke atmosfer, yang memperlambat proses pendinginan alami Bumi dan mengakibatkan peningkatan suhu global (Houghton, 2015; Masson-Delmotte dkk., 2021). Aktivitas antropogenik, termasuk pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi, telah memperburuk efek rumah kaca ini dengan meningkatkan konsentrasi gas-gas tersebut secara signifikan, sehingga mempercepat perubahan iklim (Suhartawan dkk., 2024).

B. Kenaikan Suhu Laut dan Kerusakan Karang

Lautan berfungsi sebagai penyerap utama kelebihan panas yang terperangkap oleh gas rumah kaca, dengan sekitar 90% dari energi panas tambahan diserap oleh lautan (Masson-Delmotte dkk., 2021). Peningkatan suhu permukaan laut (SST) mempengaruhi lapisan atas laut, menyebabkan perubahan dalam pola sirkulasi laut dan stratifikasi vertikal (Pinsky & Fogarty, 2012). Terumbu karang merupakan ekosistem laut yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu air laut. Bahkan peningkatan suhu sebesar 1-2°C dapat memicu pemutihan karang, yaitu proses di mana karang mengeluarkan zooxanthellae, alga simbiotik yang memberikan warna dan nutrisi penting kepada karang (Hoegh-Guldberg dkk., 2007). Dampak dari kenaikan suhu laut meliputi pergeseran distribusi spesies laut, pengasaman laut akibat penyerapan CO₂ (Gattuso & Hansson, 2011), serta peningkatan stres termal pada organisme laut, termasuk terumbu karang (Hughes dkk., 2017). Pemutihan karang yang parah dan berkepanjangan dapat mengakibatkan kematian karang massal, yang merusak struktur dan fungsi ekosistem terumbu karang serta mengancam keanekaragaman hayati laut (Hoegh-Guldberg dkk., 2007; Wilkinson, 2008).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode analisis literatur sistematis untuk mengevaluasi dampak jangka panjang dari kenaikan suhu laut terhadap ekosistem terumbu karang. Metode ini melibatkan pengumpulan dan penilaian literatur ilmiah yang relevan dari berbagai sumber, termasuk jurnal akademik dan laporan institusi. Studi ini menilai data yang tersedia untuk memahami bagaimana perubahan suhu laut mempengaruhi terumbu karang dan ekosistem sekitarnya. Analisis dilakukan dengan mensintesis temuan dari berbagai studi untuk mengidentifikasi tren utama, dampak, dan rekomendasi terkait strategi konservasi. Pendekatan ini memungkinkan pemahaman yang komprehensif mengenai pengaruh pemanasan global pada terumbu karang dan menyediakan wawasan penting untuk kebijakan dan penelitian lebih lanjut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Dampak Kenaikan Suhu Laut dan Kerusakan Karang

Kenaikan suhu air laut sebagai dampak dari perubahan iklim global merupakan ancaman signifikan bagi kesehatan terumbu karang. Penelitian menunjukkan bahwa suhu yang meningkat menyebabkan peningkatan kejadian penyakit karang serta pemutihan yang disebabkan oleh patogen. Dalam sebuah eksperimen pada karang *Pocillopora damicornis*, suhu air dinaikkan hingga 31°C, setara dengan prediksi kenaikan suhu musim panas sebesar 2–3°C. Hasil analisis dari eksperimen ini menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam jumlah bakteri *Vibrio*, termasuk patogen seperti *Vibrio coralliilyticus*. Peningkatan ini menunjukkan dampak negatif perubahan iklim terhadap ekosistem terumbu karang, dengan adanya potensi infeksi patogen yang lebih tinggi (Tout dkk., 2015). Ini menunjukkan bagaimana suhu yang lebih tinggi dapat mempengaruhi kesehatan karang dengan memperburuk infeksi oleh patogen yang merusak.

Dalam penelitian terkait, ditemukan bahwa karang tropis sangat rentan terhadap peningkatan suhu laut. Suhu yang tinggi dapat merusak hubungan simbiosis antara karang dan alga

penyusun *zooxanthellae*, yang sering kali mengakibatkan pemutihan karang. Selama fenomena El Niño pada 2015–2016, terpantau bahwa tingkat stres termal pada karang melebihi periode sebelumnya, menandakan dampak pemanasan global yang serius. Proyeksi dari studi menunjukkan bahwa bahkan jika pemanasan global dapat dibatasi pada 1,5°C, pemutihan karang secara massal mungkin tetap meningkat di masa depan (Lough dkk., 2018). Penelitian ini memperlihatkan betapa krusialnya isu suhu tinggi dalam merusak hubungan simbiosis dan mengancam kesehatan terumbu karang secara global

Sejalan dengan itu, studi lain menyoroti ketahanan terumbu karang di wilayah Coral Triangle terhadap gangguan termal di masa depan. Dalam studi ini, model metakomunitas menunjukkan bahwa terumbu karang yang terpapar suhu permukaan laut (SST) yang lebih stabil memiliki peluang kelangsungan hidup yang hampir dua kali lipat dibandingkan dengan terumbu yang mengalami SST ekstrem tanpa filter. Ini menunjukkan bahwa stabilitas SST memainkan peran penting dalam kelangsungan hidup terumbu karang, dan konektivitas larva serta sensitivitas terhadap pemutihan sangat menentukan dalam mempertahankan struktur dan fungsi ekosistem terumbu karang. Beberapa terumbu mungkin mengalami kepunahan lokal akibat stres termal, sementara terumbu lainnya dapat tetap relatif stabil. Hal ini menunjukkan bahwa dampak pemanasan global bervariasi secara spasial dan memerlukan pendekatan yang berbeda untuk mitigasi dan adaptasi (McManus dkk., 2020).

Di wilayah Teluk Arab, pemanasan suhu permukaan laut (SST) yang signifikan teramati, dengan rata-rata maksimum sekitar 0,7°C per dekade di sisi barat Teluk. Data SST yang diperoleh melalui penginderaan jauh menunjukkan bahwa peningkatan suhu ini berhubungan langsung dengan pemutihan terumbu karang yang signifikan, serta interaksi utama antara iklim dan lautan. Peningkatan suhu yang berkelanjutan mengancam kesehatan terumbu karang, yang merupakan komponen utama dari ekosistem pesisir yang kaya akan keanekaragaman hayati (Hereher, 2020). Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa pemijahan massal karang, terutama pada spesies *Acropora spp.*, dipengaruhi lebih oleh peningkatan suhu permukaan laut yang cepat daripada suhu rata-rata yang tinggi. Dataset yang mencakup 34 terumbu di Samudra Hindia dan Pasifik menunjukkan bahwa kenaikan SST yang cepat merupakan prediktor utama untuk bulan pemijahan dan bulan puncak pemijahan pada skala geografis yang luas. Ini mengindikasikan bahwa perubahan mendadak dalam suhu laut dapat menjadi isyarat penting bagi pemijahan karang, yang krusial untuk kelangsungan hidup dan regenerasi populasi karang di berbagai lokasi geografis (Keith dkk., 2016).

Lebih jauh lagi, kenaikan suhu laut juga memengaruhi spesies lain yang bergantung pada ekosistem terumbu karang. Penelitian menunjukkan bahwa suhu yang diprediksi akan meningkat pada akhir abad ini dapat berdampak signifikan pada dinamika interaksi pemangsa-mangsa di ekosistem laut. Studi ini secara khusus menilai pengaruh suhu tinggi terhadap perilaku predator dan mangsa pada ikan terumbu, seperti *damsel fish* (*Pomacentrus wardi*) dan *dottyback* (*Pseudochromis fuscus*). Temuan menunjukkan bahwa predator yang terpapar suhu tinggi mengalami peningkatan kecepatan serangan maksimal, sedangkan mangsa menunjukkan penurunan kecepatan dan jarak melarikan diri, serta penurunan kinerja sensorik. Ini mengindikasikan bahwa mangsa menjadi lebih rentan terhadap predasi di bawah kondisi suhu yang lebih tinggi, dengan predator memperoleh keuntungan dalam berburu. Dalam lingkungan laut yang semakin bervariasi secara termal, penting untuk memahami bagaimana perubahan suhu mempengaruhi kinerja individu dan hubungan

predator-mangsa untuk memprediksi dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut (Allan dkk., 2015).

Di samping itu, negara-negara Arab di sepanjang Teluk menghadapi tantangan besar dengan pengembangan pesisir di daerah dataran rendah yang sangat rentan terhadap kenaikan permukaan laut. Analisis model elevasi digital mengidentifikasi lebih dari 3100 km² area pesisir pada ketinggian 1 meter, meningkatkan risiko terhadap dampak perubahan iklim seperti kenaikan permukaan laut. Dalam konteks ini, perlindungan dan langkah-langkah konservasi pesisir menjadi sangat penting untuk melindungi wilayah pesisir rendah yang sering digunakan secara urban, serta untuk mencegah kerusakan lebih lanjut akibat perubahan iklim dan aktivitas manusia. Langkah mitigasi dan adaptasi yang efektif diperlukan untuk menjaga keberlanjutan ekosistem pesisir dan melindungi masyarakat yang bergantung pada sumber daya pesisir di wilayah tersebut (Hereher, 2020).

Menghadapi berbagai tantangan seperti polusi, over-harvesting, penghancuran fisik, dan perubahan iklim, terumbu karang, yang merupakan penopang utama keanekaragaman hayati laut dan layanan ekosistem penting, mengalami degradasi yang cepat. Terumbu karang air hangat, yang tumbuh di perairan dangkal dan hangat, diperkirakan akan mengalami kehilangan signifikan pada periode 2040-2050, bahkan dengan skenario emisi gas rumah kaca yang lebih rendah. Terumbu karang mesofotik dan air dingin juga menghadapi ancaman dari pemanasan suhu dan pengasaman, meskipun dampak perubahan iklim pada mereka masih kurang jelas. Kemampuan adaptasi terumbu karang terbatas, dan migrasi ke lintang lebih tinggi belum terbukti secara menyeluruh. Degradasi ini berpotensi mempengaruhi sekitar 500 juta orang yang bergantung pada terumbu karang untuk makanan, pendapatan, dan perlindungan pesisir. Tanpa kemajuan signifikan dalam mitigasi perubahan iklim sesuai dengan Perjanjian Iklim Paris, ancaman terhadap ekosistem terumbu karang dapat mengakibatkan peningkatan kemiskinan, gangguan sosial, dan ketidakamanan regional (Hoegh-Guldberg dkk., 2017).

Di masa depan, terumbu karang kemungkinan akan mengalami perubahan menjadi bentuk-bentuk baru akibat peningkatan suhu global. Mengembalikan terumbu karang ke kondisi historis bukanlah solusi yang realistis; tantangan mendesak adalah mengarahkan terumbu karang melalui era *Anthropocene* sambil mempertahankan fungsi biologisnya. Upaya yang terkoordinasi dan inovatif akan menjadi kunci untuk melindungi dan mempertahankan ekosistem terumbu karang di tengah perubahan global yang cepat (Hughes dkk., 2017).

B. Strategi Mitigasi dan Adaptasi

Menjaga ekosistem terumbu karang adalah kewajiban sosial yang sangat penting karena banyak orang bergantung pada terumbu karang untuk sumber makanan, perlindungan garis pantai, dan mata pencaharian. Namun, kelangsungan hidup terumbu karang semakin terancam oleh dampak perubahan iklim yang terus meningkat. Untuk mencegah keruntuhan ekosistem terumbu karang, mitigasi iklim menjadi langkah utama yang esensial. Tanpa upaya mitigasi yang memadai, diperkirakan terumbu karang akan mengalami penurunan signifikan dalam 20–30 tahun ke depan. Bahkan dengan mitigasi iklim yang kuat, langkah-langkah konservasi yang ada, seperti area perlindungan laut dan pengelolaan perikanan, tidak cukup untuk mempertahankan ekosistem terumbu karang. Tindakan tambahan dan inovatif diperlukan untuk meningkatkan ketahanan terumbu karang (Kleypas dkk., 2021).

Dalam konteks ini, pada tahun 2019, Majelis Lingkungan PBB meminta UNEP dan ICRI untuk mengembangkan pedoman praktik terbaik dalam restorasi terumbu karang. Tim ahli yang terdiri dari 20 pakar di bidang manajemen, sains, dan kebijakan terumbu karang menyusun pedoman ini untuk mengumpulkan pengetahuan terbaik dan memberikan rekomendasi realistis tentang penggunaan restorasi sebagai strategi manajemen terumbu karang. Pedoman tersebut menegaskan bahwa restorasi terumbu karang bisa menjadi alat yang berguna untuk meningkatkan ketahanan terumbu, terutama pada skala lokal di mana rekrutmen karang terbatas dan gangguan dapat dikendalikan. Meskipun bukti keberhasilan jangka panjang restorasi terumbu karang masih terbatas, investasi berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan diharapkan dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi biaya metode yang ada. Restorasi, meskipun bermanfaat, tidak boleh dianggap sebagai solusi tunggal untuk penurunan ekologis; sebaliknya, harus diterapkan dengan hati-hati sebagai bagian dari strategi manajemen ketahanan terumbu yang lebih luas (Hein dkk., 2021)

Kewajiban negara dalam mitigasi perubahan iklim diatur secara internasional melalui prinsip Common but Differentiated Responsibility (CBDR) yang terdapat dalam Perjanjian Paris. Prinsip ini mengharuskan semua negara untuk melakukan upaya mitigasi, dengan tingkat kewajiban yang bervariasi tergantung pada kapasitas dan kontribusi masing-masing negara terhadap perubahan iklim. Di tingkat nasional, meskipun Indonesia telah mengeluarkan beberapa peraturan terkait mitigasi perubahan iklim, seperti Perpres No 98 Tahun 2021 yang mencakup sektor mangrove dan blue carbon, pengelolaan serta pelestarian lingkungan laut masih belum terintegrasi secara memadai dalam Rencana Aksi Nasional Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK). Penelitian ini menegaskan adanya kebutuhan mendesak untuk menerjemahkan peraturan-peraturan tersebut ke dalam kebijakan yang lebih spesifik dan terperinci, terutama yang mengatur tentang ekosistem karbon biru. Hal ini penting agar mitigasi perubahan iklim di Indonesia mencakup seluruh sektor, termasuk laut dan ekosistem karbon biru yang memainkan peran krusial dalam penyerapan karbon (Zunnuraeni dkk., 2024).

Mitigasi gas rumah kaca (GRK) memainkan peran penting dalam mengurangi risiko perubahan iklim di masa depan dengan menurunkan emisi GRK dan menghindari kenaikan suhu global yang ekstrem, yang memerlukan upaya adaptasi yang besar dan sulit dicapai. Meskipun upaya mitigasi dan adaptasi dilakukan, dampak perubahan iklim yang tidak bisa dihindari tetap ada. Batasan adaptasi terhadap perubahan lingkungan bervariasi; beberapa spesies atau sistem dapat menyesuaikan diri dengan cepat, sementara yang lain tidak. Batasan ini bisa berupa hal-hal yang bisa diubah, seperti perubahan aturan sosial, atau hal-hal yang tidak bisa diubah, seperti pasokan air dari akuifer fosil. Kapasitas adaptasi berbeda antara individu, sektor, dan wilayah, dan sulit diukur. Peluang dalam adaptasi dapat mempermudah perencanaan dan implementasi, sementara kendala dapat menghambatnya. Penting untuk memahami konteks spesifik dan batasan yang ada agar strategi adaptasi dapat diterapkan dengan lebih efektif (Klein dkk., 2014).

Strategi mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim adalah kunci dalam menjaga kelestarian ekosistem terumbu karang yang vital. Upaya mitigasi yang efektif, termasuk penerapan pedoman restorasi terumbu karang dan peraturan internasional seperti prinsip CBDR, sangat penting untuk mengurangi dampak perubahan iklim. Namun, meskipun tindakan mitigasi berperan penting, diperlukan pendekatan yang lebih menyeluruh dan inovatif dalam pengelolaan dan konservasi terumbu karang. Adaptasi juga harus dipertimbangkan sebagai bagian dari strategi

yang lebih luas, mengingat adanya batasan dan tantangan yang berbeda-beda di setiap konteks. Dengan kombinasi upaya mitigasi yang kuat, kebijakan yang terintegrasi, dan strategi adaptasi yang fleksibel, kita dapat meningkatkan ketahanan ekosistem terumbu karang dan memastikan keberlanjutannya untuk generasi mendatang.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi dampak jangka panjang dari kenaikan suhu laut terhadap kerusakan karang dan ekosistem terumbu karang secara keseluruhan dengan meninjau berbagai literatur terkait. Hasil analisis menunjukkan bahwa pemanasan global yang menyebabkan kenaikan suhu laut memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan dan struktur terumbu karang. Suhu laut yang lebih tinggi menyebabkan pemutihan karang, penurunan kesehatan karang, serta kerusakan struktural pada terumbu karang. Proses pemutihan karang, di mana karang kehilangan zooxanthellae, dapat mengakibatkan kematian karang massal dan mengancam keanekaragaman hayati laut. Selain itu, kenaikan suhu laut berpengaruh pada spesies lain yang bergantung pada ekosistem terumbu karang, menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati dan gangguan keseimbangan ekosistem. Studi juga menyoroti pentingnya stabilitas suhu laut dan dampaknya terhadap kelangsungan hidup terumbu karang, dengan beberapa lokasi menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan termal.

Dari hasil penelitian ini, muncul kebutuhan mendesak untuk strategi mitigasi dan adaptasi yang efektif guna melindungi ekosistem terumbu karang. Tindakan mitigasi iklim yang kuat sangat penting untuk mencegah penurunan signifikan pada terumbu karang di masa depan. Restorasi terumbu karang, meskipun berpotensi meningkatkan ketahanan lokal, harus diterapkan sebagai bagian dari strategi manajemen yang lebih luas dan bukan sebagai solusi tunggal. Kewajiban negara dalam mitigasi perubahan iklim, sesuai dengan prinsip Common but Differentiated Responsibility (CBDR) dalam Perjanjian Paris, menekankan pentingnya integrasi pengelolaan lingkungan laut dalam kebijakan mitigasi perubahan iklim. Indonesia, khususnya, perlu mengembangkan kebijakan yang lebih spesifik dan terintegrasi untuk melindungi ekosistem karbon biru, termasuk terumbu karang. Dengan mempertimbangkan batasan adaptasi yang berbeda, strategi adaptasi harus dirancang secara kontekstual dan fleksibel untuk menghadapi tantangan perubahan iklim yang semakin kompleks. Upaya terkoordinasi dan inovatif diperlukan untuk memastikan keberlanjutan ekosistem terumbu karang dan mitigasi dampak perubahan iklim di masa depan.

REFERENSI

- Allan, B. J. M., Domenici, P., Munday, P. L., & McCormick, M. I. (2015). Feeling the heat: The effect of acute temperature changes on predator-prey interactions in coral reef fish. *Conservation Physiology*, 3(1), cov011. <https://doi.org/10.1093/conphys/cov011>
- Cheng, L., Abraham, J., Hausfather, Z., & Trenberth, K. E. (2019). How fast are the oceans warming? *Science* (New York, N.Y.), 363(6423), 128–129. <https://doi.org/10.1126/science.aav7619>

- Gattuso, J.-P., & Hansson, L. (Ed.). (2011). *Ocean Acidification*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199591091.001.0001>
- Hein, M. Y., Vardi, T., Shaver, E. C., Pioch, S., Boström-Einarsson, L., Ahmed, M., Grimsditch, G., & McLeod, I. M. (2021). Perspectives on the Use of Coral Reef Restoration as a Strategy to Support and Improve Reef Ecosystem Services. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.618303>
- Hereher, M. E. (2020). Assessment of Climate Change Impacts on Sea Surface Temperatures and Sea Level Rise—The Arabian Gulf. *Climate*, 8(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/cli8040050>
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., & Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science (New York, N.Y.)*, 318(5857), 1737–1742. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>
- 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>
- Houghton, J. (2015). *Global Warming The Complete Briefing*. Cambridge University Press. <http://www.cambridge.org/9780521528740>
- 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>
- Keith, S. A., Maynard, J. A., Edwards, A. J., Guest, J. R., Bauman, A. G., van Hooidek, R., Heron, S. F., Berumen, M. L., Bouwmeester, J., Piromvaragorn, S., Rahbek, C., & Baird, A. H. (2016). Coral mass spawning predicted by rapid seasonal rise in ocean temperature. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1830), 20160011. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0011>
- Klein, R. J. T., Midgley, G. F., Preston, B. L., Alam, M., Berkhout, F. G. H., Dow, K., Shaw, R. M., Botzen, W. J. W., Buhaug, H., Butzer, K. W., Keskitalo, E. C. H., Mateescu, E., Muir-Wood, R., Mustelin, J., Reid, H., Rickards, L., Scorgie, S., Smith, T. F., Thomas, A., ... Wolf, J. (2014). Adaptation Opportunities Constraints and Limits. Dalam C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mack, & M. D. Mastrandea (Ed.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (hlm. 899–943). Cambridge University Press.
- Kleypas, J., Allemand, D., Anthony, K., Baker, A. C., Beck, M. W., Hale, L. Z., Hilmi, N., Hoegh-Guldberg, O., Hughes, T., Kaufman, L., Kayanne, H., Mangan, A. K., Mcleod, E., Mumby, P., Palumbi, S., Richmond, R. H., Rinkevich, B., Steneck, R. S., Voolstra, C. R., ... Gattuso, J.-P. (2021). Designing a blueprint for coral reef survival. *Biological Conservation*, 257, 109107. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109107>
- Lough, J. M., Anderson, K. D., & Hughes, T. P. (2018). Increasing thermal stress for tropical coral reefs: 1871–2017. *Scientific Reports*, 8(1), 6079. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24530-9>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., & Zhou, B. (Ed.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- McManus, L. C., Vasconcelos, V. V., Levin, S. A., Thompson, D. M., Kleypas, J. A., Castruccio, F. S., Curchitser, E. N., & Watson, J. R. (2020). Extreme temperature events will drive coral decline in the Coral Triangle. *Global Change Biology*, 26(4), 2120–2133. <https://doi.org/10.1111/gcb.14972>
- Pinsky, M., & Fogarty, M. (2012). Lagged social-ecological responses to climate and range shifts in fisheries. *Climatic Change*, 115(3), 883–891.
- Suhartawan, B., Hs, S. M., Suyasa, I. W. B., Gurning, K., Hudha, M. I., Ayuningtyas, E. A., & Wahyuni, S. (2024). *Kimia Lingkungan*. Get Press Indonesia. <https://scholar.google.com/scholar?cluster=15591369363312779367&hl=en&oi=scholar>
- Tout, J., Siboni, N., Messer, L. F., Garren, M., Stocker, R., Webster, N. S., Ralph, P. J., & Seymour, J. R. (2015). Increased seawater temperature increases the abundance and alters the structure of natural *Vibrio* populations associated with the coral *Pocillopora damicornis*. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00432>
- Wilkinson, C. (2008). *Status of coral reefs of the world*. UNESCO Digital Library. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000179217>

Zunnuraeni, Z., Risnain, M., & Putro, W. D. (2024). Mitigasi Perubahan Iklim Melalui Kebijakan Pengelolaan dan Pelestarian Lingkungan Laut. *Jurnal Hukum Mimbar Justitia*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.35194/jhmj.v10i1.4153>