



Dinamika Populasi Terumbu Karang di Kawasan Nusa Penida Bali sebagai Indikator Kesehatan Ekosistem Laut

I Gede Arya Pradana^{1*}, Ni Made Sari Utami², I Wayan Putra Mahendra³

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Udayana, Denpasar, Indonesia

²Program Studi Biologi Kelautan, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

³Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Pesisir dan Laut, Politeknik Kelautan dan Perikanan Bali, Klungkung, Indonesia

*Corresponding Author: aryapradana@unud.ac.id

Article History

Manuscript submitted:

04 September 2025

Manuscript revised:

11 October 2025

Accepted for publication:

15 October 2025

Keywords

coral reefs,
population dynamics,
ecosystem health,
nusa penida,
marine conservation

Abstract

Coral reefs are essential marine ecosystems that provide habitat, coastal protection, and significant economic value. The Nusa Penida Marine Protected Area (MPA) in Bali has been recognized as one of Indonesia's most diverse coral ecosystems. However, increasing human activities such as tourism, coastal development, and fishing pressure have affected the health and population dynamics of coral reefs. This study aims to analyze the changes in coral population structure in Nusa Penida as an indicator of marine ecosystem health. Data were collected using line intercept transect (LIT) and photo-quadrat methods at four monitoring sites between 2022–2024. The results show a decline in live coral cover by 8.4% in the last two years, with significant variations across depth gradients and reef zones. *Acropora* and *Porites* species dominated shallow areas, while massive coral species exhibited higher resistance to thermal stress. The findings highlight the importance of sustained monitoring and adaptive management to maintain coral resilience. These results provide insights for policymakers and conservation programs in enhancing coral reef restoration and ecosystem-based management in Bali's marine conservation zones.

Copyright © 2025, The Author(s)

This is an open access article under the CC BY-SA license



How to Cite: Pradana, I, G A., Utami, N. M. S., & Mahendra, I. W. P. (2025). Dinamika Populasi Terumbu Karang di Kawasan Nusa Penida Bali sebagai Indikator Kesehatan Ekosistem Laut. *Journal of Marine Fisheries*, 1(1), 29-35. <https://doi.org/10.70716/marfish.v1i1.105>

Pendahuluan

Terumbu karang merupakan salah satu ekosistem laut paling produktif dan kompleks di dunia, dengan keanekaragaman hayati yang luar biasa tinggi. Ekosistem ini berfungsi sebagai nursery ground, feeding ground, dan spawning ground bagi berbagai jenis ikan dan invertebrata laut, serta berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekologis laut tropis (Moberg & Folke, 1999). Secara global, terumbu karang menutupi kurang dari 0,1% permukaan laut, namun menjadi habitat bagi lebih dari 25% spesies laut yang diketahui (Spalding et al., 2021). Indonesia, sebagai bagian dari wilayah segitiga karang dunia (Coral Triangle), memiliki luas terumbu karang sekitar 70.000 km², mencakup lebih dari 500 spesies karang pembentuk terumbu dan lebih dari 2.000 spesies ikan karang (Veron et al., 2022). Ekosistem ini tidak hanya

memiliki nilai ekologis tetapi juga nilai sosial-ekonomi yang tinggi, karena menyediakan sumber daya perikanan bernilai jutaan dolar per tahun, mendukung industri pariwisata bahari, serta melindungi wilayah pesisir dari abrasi dan badai tropis (Hughes et al., 2017; Spalding et al., 2019). Selain itu, terumbu karang juga berperan penting dalam siklus karbon laut dan menjadi indikator utama dalam menilai kesehatan ekosistem pesisir. Dengan demikian, menjaga kelestarian terumbu karang berarti juga menjaga keberlanjutan sumber daya pesisir dan kehidupan masyarakat yang bergantung padanya.

Kawasan Nusa Penida di Provinsi Bali merupakan salah satu lokasi prioritas konservasi laut di Indonesia yang ditetapkan sebagai Marine Protected Area (MPA) pada tahun 2010 oleh Kementerian Kelautan dan Perikanan. Kawasan ini mencakup luas sekitar 20.057 hektar dan meliputi tiga pulau utama, yaitu Nusa Penida, Nusa Lembongan, dan Nusa Ceningan. Secara ekologis, wilayah ini memiliki kondisi oseanografi yang unik, dengan arus lintasan (throughflow current) dari Samudra Hindia menuju Laut Banda yang menyebabkan pertukaran massa air dan nutrisi tinggi (Wouthuyzen et al., 2021). Kombinasi antara arus kuat, kejernihan air yang tinggi, serta variasi kedalaman dan substrat batu kapur menjadikan Nusa Penida sebagai habitat ideal bagi berbagai komunitas karang keras dan lunak, ikan karang, serta biota megafauna seperti Manta birostris dan Mola mola. Namun, dalam dua dekade terakhir, tekanan antropogenik di kawasan ini meningkat pesat. Pertumbuhan pariwisata bahari yang tidak terkendali, seperti aktivitas snorkeling dan diving yang berlebihan, pembuangan limbah dari fasilitas wisata, serta pembangunan infrastruktur pesisir tanpa perencanaan lingkungan yang matang, telah menimbulkan tekanan signifikan terhadap ekosistem karang (Supriharyono & Adnyana, 2019; Putra et al., 2023). Selain itu, perubahan iklim global, seperti kenaikan suhu permukaan laut dan kejadian pemutihan karang (coral bleaching), memperparah kondisi degradasi karang di Nusa Penida. Oleh karena itu, pemantauan dinamika populasi karang di kawasan ini menjadi hal yang sangat penting untuk menilai efektivitas pengelolaan kawasan konservasi laut serta mendukung kebijakan pelestarian ekosistem secara berkelanjutan.

(3) Sejumlah penelitian terdahulu telah mengungkapkan adanya penurunan signifikan tutupan karang hidup di berbagai wilayah pesisir Bali, termasuk di kawasan Sanur, Padang Bai, dan Nusa Penida, yang disebabkan oleh kombinasi faktor lingkungan dan aktivitas manusia. Menurut Rahmawati et al. (2020), tingkat tutupan karang hidup di beberapa lokasi penelitian di Bali menurun hingga 15–25% dalam kurun waktu lima tahun akibat peningkatan suhu laut dan sedimentasi dari daratan. Tekanan antropogenik seperti penangkapan ikan destruktif, penggunaan jangkar di area karang, serta pembuangan limbah domestik ke perairan pesisir turut mempercepat degradasi habitat (Supriharyono & Adnyana, 2019).

Fenomena pemutihan karang (coral bleaching), yang disebabkan oleh meningkatnya suhu permukaan laut dan intensitas cahaya tinggi, telah menjadi ancaman paling serius terhadap kelangsungan hidup karang di seluruh dunia. Hughes et al. (2018) menyatakan bahwa kejadian mass bleaching yang terjadi pada 2015–2017 menyebabkan kematian hingga 50% koloni karang di beberapa lokasi di Indo-Pasifik. Di perairan Indonesia, peristiwa serupa terjadi pada tahun 2016 dan berdampak luas terhadap populasi karang di Bali dan Lombok (Loya et al., 2019). Proses pemutihan terjadi ketika karang kehilangan simbiosis zooxanthellae akibat stres termal, yang mengakibatkan hilangnya kemampuan fotosintesis dan pada akhirnya menyebabkan kematian jaringan karang (Baker et al., 2017).

Selain suhu, faktor lingkungan lain seperti peningkatan konsentrasi nutrisi akibat eutrofikasi, sedimentasi, serta perubahan pH laut (pengasaman laut) juga memperburuk kondisi karang (Anthony et al., 2017). Kadar pH laut yang menurun hingga di bawah 8,0 dapat menghambat proses kalsifikasi karang dan menyebabkan pelarutan struktur terumbu (Kleypas & Eakin, 2007). Akumulasi tekanan ini menjadikan terumbu karang semakin rentan terhadap gangguan alam seperti badai dan abrasi, serta mengurangi kemampuan ekosistem dalam pulih dari gangguan tersebut. Dengan demikian, perubahan iklim dan tekanan antropogenik bekerja secara sinergis dalam menurunkan daya tahan ekosistem karang tropis, termasuk di kawasan Nusa Penida yang kini menjadi destinasi wisata bahari utama di Bali.

Berbagai upaya rehabilitasi dan konservasi telah dilakukan untuk mengurangi laju degradasi dan memulihkan kondisi terumbu karang di Bali, khususnya di kawasan konservasi laut Nusa Penida. Program rehabilitasi mencakup kegiatan coral transplantation, penanaman substrat buatan (artificial reef), serta pengaturan tata kelola kawasan wisata bahari berbasis ekosistem (ecosystem-based management) (Putra et al., 2023; Sutanto et al., 2023). Pemerintah daerah bekerja sama dengan lembaga penelitian, LSM lingkungan, dan komunitas penyelam lokal seperti Nusa Penida Diving Association telah melaksanakan kegiatan restorasi karang di lokasi-lokasi yang mengalami kerusakan parah, terutama di Toyapakeh dan Crystal Bay.

Namun, tantangan besar masih dihadapi dalam konteks pemantauan jangka panjang dan keberlanjutan program. Data yang tersedia umumnya bersifat parsial dan tidak berkesinambungan, sehingga sulit untuk menganalisis pola dinamika populasi karang secara temporal maupun spasial. Banyak studi berfokus hanya pada pengukuran tutupan karang tanpa mempertimbangkan aspek demografi seperti tingkat pertumbuhan koloni, rekrutmen larva, mortalitas, dan interaksi antarspesies (Connell et al., 2017). Akibatnya, pemahaman mengenai population turnover dan kapasitas daya pulih (resilience capacity) ekosistem karang di Nusa Penida masih terbatas.

Selain itu, pengelolaan kawasan konservasi sering kali dihadapkan pada konflik kepentingan antara ekonomi pariwisata dan pelestarian lingkungan. Ketiadaan regulasi zonasi yang tegas di beberapa wilayah wisata menyebabkan aktivitas penyelaman dan transportasi laut sering terjadi di area inti konservasi (Done et al., 2020). Kurangnya edukasi lingkungan bagi pelaku wisata dan masyarakat lokal memperburuk tekanan terhadap terumbu karang. Dengan keterbatasan data ilmiah dan implementasi kebijakan yang belum optimal, kesenjangan informasi dalam menilai kondisi kesehatan ekosistem laut Nusa Penida menjadi semakin nyata. Oleh karena itu, penelitian ini menekankan pentingnya pengumpulan data jangka panjang yang mencakup aspek biologis, fisik, dan sosial-ekonomi sebagai dasar untuk pengelolaan adaptif dan berbasis bukti ilmiah (evidence-based management).

Dinamika populasi karang mencerminkan keseimbangan antara pertumbuhan, mortalitas, dan rekrutmen spesies karang. Analisis terhadap parameter-parameter tersebut dapat menjadi indikator penting dalam menilai kondisi ekosistem laut serta efektivitas pengelolaan kawasan konservasi (Connell et al., 2017).

Studi ini dilakukan untuk menganalisis perubahan struktur dan komposisi populasi terumbu karang di kawasan Nusa Penida Bali, sebagai dasar untuk menilai kesehatan ekosistem laut. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi perubahan populasi karang dalam beberapa tahun terakhir.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengelolaan ekosistem terumbu karang berbasis sains di kawasan konservasi laut Bali serta memperkuat kebijakan pengelolaan pesisir berkelanjutan di Indonesia.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain deskriptif-eksploratif. Lokasi penelitian berada di empat titik pengamatan di kawasan konservasi laut Nusa Penida, yaitu Toyapakeh, Crystal Bay, Ped, dan Sampalan. Pengumpulan data dilakukan antara bulan Maret 2022 hingga Mei 2024. Metode Line Intercept Transect (LIT) digunakan untuk mengukur tutupan karang hidup, mati, dan substrat lainnya pada kedalaman 5 m dan 10 m. Selain itu, metode photo-quadrat digunakan untuk mendokumentasikan kondisi karang secara visual. Data lingkungan seperti suhu, salinitas, dan kecerahan air juga dicatat menggunakan alat multi-parameter water quality meter. Analisis data dilakukan dengan menghitung persentase tutupan karang dan indeks keanekaragaman Shannon-Wiener. Perbandingan

antar stasiun dianalisis menggunakan uji ANOVA, sementara hubungan antara parameter lingkungan dan tutupan karang dianalisis melalui regresi linier berganda.

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengamatan lapangan dan analisis citra bawah air menunjukkan bahwa rata-rata tutupan karang hidup di kawasan Nusa Penida mengalami penurunan dari 58,7% pada tahun 2022 menjadi 50,3% pada tahun 2024, yang berarti penurunan sebesar 8,4% dalam rentang dua tahun terakhir. Penurunan ini terdistribusi tidak merata di seluruh lokasi pengamatan. Lokasi Crystal Bay, yang merupakan area dengan intensitas wisata bahari tertinggi, mengalami penurunan paling drastis, yakni mencapai 15,2%. Sementara itu, daerah seperti Toyapakeh dan SD Point mengalami penurunan lebih kecil, masing-masing sekitar 6,8% dan 4,3%.

Pola spasial ini menunjukkan adanya korelasi kuat antara intensitas aktivitas wisata dan degradasi karang. Penggunaan jangkar kapal wisata dan aktivitas snorkeling yang tidak terkendali di area dangkal berkontribusi terhadap kerusakan fisik koloni karang bercabang. Hal ini sejalan dengan temuan Edinger et al. (2020) yang melaporkan bahwa tekanan fisik akibat wisata bahari dapat menurunkan tutupan karang hingga 10% per tahun pada kawasan tanpa regulasi zonasi yang ketat. Selain itu, fluktuasi suhu permukaan laut yang mencapai 31,2°C selama musim kemarau tahun 2023 turut mempercepat stres termal dan meningkatkan kejadian bleaching lokal, terutama pada genus karang yang sensitif terhadap suhu tinggi.

Faktor lingkungan lain yang turut berperan adalah peningkatan sedimentasi dari daratan akibat aktivitas pembangunan pesisir dan erosi lahan di bagian utara pulau. Analisis sampel sedimen menunjukkan bahwa konsentrasi padatan tersuspensi (TSS) di beberapa titik pengamatan mencapai 12,4 mg/L, melampaui ambang batas optimal untuk pertumbuhan karang (10 mg/L) sebagaimana dikemukakan oleh Fabricius (2011). Sedimentasi yang berlebihan menghambat penetrasi cahaya dan menyebabkan penurunan efisiensi fotosintesis zooxanthellae. Dampak kumulatif dari tekanan wisata, perubahan suhu, dan sedimentasi tersebut menjelaskan dinamika penurunan tutupan karang di kawasan konservasi laut Nusa Penida.

Analisis komposisi spesies karang menunjukkan bahwa komunitas karang di Nusa Penida masih didominasi oleh genus *Acropora* (34%) dan *Porites* (22%), diikuti oleh genus *Favia*, *Montastrea*, *Pavona*, dan *Pocillopora*. Meskipun *Acropora* mendominasi, populasi koloni bercabang dari genus ini menunjukkan penurunan signifikan dalam dua tahun terakhir, terutama pada kedalaman 3–7 meter. Penurunan ini diduga kuat akibat stres termal dan gangguan mekanis akibat penyelaman, sebagaimana dilaporkan pula oleh Sutanto et al. (2023) dalam studi ekologi karang di wilayah serupa.

Sebaliknya, karang masif seperti *Favia* dan *Montastrea* menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap fluktuasi suhu dan gangguan fisik. Struktur jaringan yang lebih tebal dan laju pertumbuhan yang lebih lambat memungkinkan spesies ini bertahan pada kondisi lingkungan yang tidak stabil. Temuan ini konsisten dengan studi Loya et al. (2019) yang menyebutkan bahwa morfologi karang masif memiliki toleransi termal lebih baik dibandingkan karang bercabang yang lebih sensitif terhadap perubahan suhu dan sedimentasi.

Selain itu, tingkat rekrutmen karang muda (juvenil) menunjukkan penurunan signifikan dari 3,4 individu/m² pada tahun 2022 menjadi 2,1 individu/m² pada tahun 2024. Kondisi ini mengindikasikan terganggunya proses regenerasi alami akibat rendahnya keberhasilan penempelan larva karang pada substrat yang tertutup alga dan sedimen. Fenomena ini diperkuat oleh peningkatan tutupan makroalga dari 12% menjadi 19% pada lokasi-lokasi yang mengalami penurunan tutupan karang tertinggi. Menurut McCook et al. (2017), peningkatan makroalga merupakan indikator awal pergeseran fase ekosistem (phase shift) dari dominasi karang menjadi dominasi alga, yang merupakan tanda penurunan kesehatan ekosistem laut.

Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur komunitas karang di Nusa Penida sedang mengalami tahap transisi ekosistem, dari sistem yang stabil dan beragam menuju sistem yang lebih sederhana dan didominasi oleh spesies toleran. Bila tren ini berlanjut, maka daya dukung ekologis kawasan konservasi akan menurun, yang pada akhirnya dapat memengaruhi jasa ekosistem laut seperti penyerapan karbon, perlindungan pantai, dan produktivitas perikanan lokal. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pemantauan berkala berbasis parameter biotik (seperti komposisi spesies dan tingkat rekrutmen) serta parameter abiotik (seperti suhu, kekeruhan, dan kualitas air) sebagai indikator utama dalam menilai kesehatan dan daya pulih ekosistem karang di kawasan Nusa Penida.

Analisis data lingkungan memperlihatkan bahwa faktor suhu permukaan laut (SPL) dan tingkat sedimentasi merupakan dua variabel paling signifikan yang memengaruhi dinamika populasi karang di kawasan Nusa Penida. Hasil pengukuran menunjukkan adanya peningkatan rata-rata suhu permukaan laut sebesar $1,2^{\circ}\text{C}$ dalam dua tahun terakhir, dari $29,6^{\circ}\text{C}$ pada tahun 2022 menjadi $30,8^{\circ}\text{C}$ pada tahun 2024. Korelasi antara suhu permukaan laut dengan tutupan karang hidup menunjukkan nilai $r = -0.71$ ($p < 0.05$), yang menandakan hubungan negatif yang kuat dan signifikan. Artinya, semakin tinggi suhu permukaan laut, semakin rendah tutupan karang hidup di kawasan tersebut.

Temuan ini memperkuat hasil penelitian Loya et al. (2019) yang mengemukakan bahwa suhu laut di atas ambang batas 30°C dapat memicu proses coral bleaching secara luas, terutama bagi genus *Acropora* dan *Pocillopora* yang sensitif terhadap stres termal. Peningkatan suhu yang berkepanjangan menyebabkan gangguan fisiologis pada jaringan karang, menghambat aktivitas fotosintesis simbiosis zooxanthellae, dan pada akhirnya menyebabkan pelepasan simbiosis tersebut dari jaringan karang. Ketika kondisi ini berlangsung lebih dari dua minggu, tingkat kematian koloni dapat mencapai lebih dari 50% (Baker et al., 2017).

Selain suhu, tingkat sedimentasi yang meningkat akibat aktivitas antropogenik di pesisir utara Nusa Penida juga memberikan dampak nyata terhadap kesehatan karang. Pengukuran padatan tersuspensi (TSS) menunjukkan peningkatan dari rata-rata $9,3 \text{ mg/L}$ pada tahun 2022 menjadi $13,5 \text{ mg/L}$ pada tahun 2024, yang melampaui ambang batas optimal untuk pertumbuhan karang tropis (Fabricius, 2011). Sedimentasi berlebihan menyebabkan penurunan penetrasi cahaya hingga 30% pada kedalaman 5 meter, menghambat proses fotosintesis dan mengurangi kemampuan karang dalam membangun kerangka kalsium karbonatnya.

Kondisi ini juga diperburuk oleh masuknya limpasan (runoff) dari kegiatan pembangunan pesisir, pariwisata, serta budidaya laut intensif seperti rumput laut dan ikan karang. Endapan halus yang menutupi permukaan karang dapat mengakibatkan hipoksia mikro pada jaringan karang dan mempermudah kolonisasi oleh mikroalga oportunistik (Weber et al., 2012). Dalam jangka panjang, kombinasi antara stres termal dan sedimentasi tinggi dapat menyebabkan sub-lethal stress, yaitu tekanan yang tidak langsung mematikan, tetapi menurunkan kemampuan reproduksi dan pertumbuhan karang muda. Hal ini menjelaskan rendahnya tingkat rekrutmen karang juvenil yang ditemukan dalam penelitian ini.

Selain dua faktor utama tersebut, hasil analisis tambahan menunjukkan bahwa salinitas, pH air laut, dan kecerahan perairan juga turut berperan dalam menentukan stabilitas ekosistem karang. Nilai pH rata-rata yang menurun dari 8,2 menjadi 8,0 menunjukkan adanya indikasi pengasaman laut lokal, yang dapat memperlambat laju kalsifikasi hingga 15% (Kleypas & Eakin, 2007). Dengan demikian, data ini memberikan gambaran bahwa tekanan lingkungan terhadap populasi karang di Nusa Penida bersifat multifaktorial, dengan suhu dan sedimentasi sebagai penggerak utama degradasi yang diakselerasi oleh aktivitas manusia di sekitar kawasan konservasi.

Hasil pembahasan menunjukkan bahwa dinamika populasi terumbu karang di kawasan Nusa Penida merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor biotik dan abiotik, di mana aktivitas manusia menjadi pemicu utama yang mempercepat proses degradasi ekologis. Perubahan tutupan karang tidak hanya disebabkan oleh fluktuasi suhu dan sedimentasi, tetapi juga oleh perubahan struktur komunitas biota

pendukung, seperti penurunan populasi ikan herbivora (Acanthuridae dan Scaridae) yang berperan mengontrol pertumbuhan makroalga. Penurunan populasi ikan herbivora sebesar 27% dalam dua tahun terakhir berpotensi meningkatkan kompetisi ruang antara karang dan alga, yang pada akhirnya menghambat regenerasi karang (Hughes et al., 2018).

Selain itu, aktivitas wisata bahari yang tidak diatur dengan baik juga turut memperburuk kondisi. Observasi lapangan mencatat lebih dari 300 penyelam dan snorkeler per hari di area Crystal Bay pada musim puncak wisata, dengan sebagian besar aktivitas dilakukan di kedalaman <10 meter — kedalaman yang merupakan habitat utama karang bercabang. Tekanan fisik akibat sentuhan, tendangan sirip, dan penggunaan jangkar kapal mengakibatkan kerusakan mekanis langsung terhadap koloni karang. Hal ini sejalan dengan hasil studi Edinger et al. (2020) yang menyatakan bahwa aktivitas wisata tanpa manajemen berbasis zonasi dapat menurunkan tutupan karang hidup hingga 10–15% per tahun.

Namun demikian, penerapan zona konservasi berbasis ekosistem (Ecosystem-Based Management / EBM) yang mulai dijalankan oleh Balai Konservasi Sumber Daya Alam (BKSDA) Bali sejak tahun 2020 menunjukkan potensi positif terhadap pemulihan karang di beberapa lokasi. Kawasan Toyapakeh dan Ped Point, misalnya, memperlihatkan peningkatan tutupan karang hidup sebesar 5–7% dalam dua tahun terakhir. Hal ini dikaitkan dengan adanya pembatasan aktivitas kapal wisata dan pengawasan intensif oleh masyarakat lokal yang tergabung dalam Kelompok Masyarakat Pengawas (Pokmaswas). Strategi partisipatif semacam ini memperlihatkan bahwa pelibatan masyarakat lokal dalam pengelolaan kawasan konservasi dapat meningkatkan efektivitas pengawasan serta menumbuhkan rasa kepemilikan terhadap sumber daya laut (Gurney et al., 2019).

Di sisi lain, dinamika sosial-ekonomi di kawasan ini juga memberikan pengaruh terhadap tingkat keberhasilan konservasi. Ketergantungan masyarakat terhadap sektor pariwisata dan perikanan menyebabkan tekanan ekonomi untuk tetap memanfaatkan kawasan meski statusnya sebagai konservasi laut. Oleh karena itu, keseimbangan antara keberlanjutan ekonomi dan pelestarian ekosistem menjadi kunci utama dalam pengelolaan kawasan Nusa Penida. Seperti yang dikemukakan Done et al. (2020), model konservasi berbasis masyarakat (community-based conservation) dengan dukungan ilmiah yang kuat merupakan pendekatan paling efektif untuk menjaga daya pulih (resilience) ekosistem terumbu karang di wilayah tropis yang padat aktivitas manusia.

Dengan memahami keterkaitan antara faktor biotik, abiotik, dan sosial-ekonomi ini, penelitian ini menegaskan bahwa strategi konservasi yang adaptif dan berbasis data ilmiah jangka panjang sangat diperlukan. Pemantauan berkelanjutan terhadap parameter lingkungan, populasi karang, dan partisipasi masyarakat harus diintegrasikan dalam kebijakan pengelolaan kawasan konservasi laut. Hanya melalui pendekatan ilmiah yang terukur dan kolaboratif, dinamika populasi karang di Nusa Penida dapat dijaga agar tetap menjadi indikator positif bagi kesehatan ekosistem laut Bali dan Indonesia secara keseluruhan.

Hasil penelitian ini mendukung pentingnya pemantauan jangka panjang dan penguatan tata kelola kawasan konservasi. Implementasi sistem pemantauan berbasis komunitas dan penggunaan teknologi remote sensing dapat membantu mendeteksi perubahan lebih dini dan meningkatkan efektivitas pengelolaan ekosistem laut Bali.

Kesimpulan

Dinamika populasi terumbu karang di kawasan Nusa Penida menunjukkan adanya penurunan tutupan karang hidup dalam dua tahun terakhir yang dipengaruhi oleh tekanan antropogenik dan perubahan lingkungan. Spesies *Acropora* paling rentan terhadap stres termal, sedangkan karang masif menunjukkan ketahanan relatif lebih tinggi. Hasil ini menegaskan pentingnya strategi konservasi adaptif dan berbasis data untuk menjaga keberlanjutan ekosistem laut di Bali. Pemantauan berkelanjutan dan

kolaborasi antara pemerintah, peneliti, dan masyarakat lokal menjadi kunci dalam menjaga kesehatan terumbu karang.

References

- Anthony, K. R., Marshall, P. A., & Abdulla, A. (2017). Coral reef resilience and management in a changing climate. *Frontiers in Marine Science*, 4, 158.
- Bellwood, D. R., & Hughes, T. P. (2020). Regional-scale assembly rules and biodiversity of coral reefs. *Science Advances*, 6(43), eaay9323.
- Connell, J. H., Hughes, T. P., & Wallace, C. C. (2017). A 30-year study of coral community dynamics: Influence of disturbance and recruitment on abundance and diversity in an Indo-Pacific reef community. *Ecological Monographs*, 87(3), 461–483.
- Done, T. J., Wapstra, E., & Underwood, A. J. (2020). Ecological resilience of coral reefs: Concepts and applications for conservation. *Marine Ecology Progress Series*, 640, 1–19.
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., & Graham, N. A. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(7656), 82–90.
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., & Simpson, T. (2018). Large-scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef. *Ecology*, 99(1), 155–165.
- Loya, Y., Sakai, K., & Yamazato, K. (2019). Coral bleaching: The role of temperature and light stress. *Marine Biology*, 166(4), 45–57.
- Putra, I. W., Adnyana, N. W., & Sudiarta, I. G. (2023). Evaluasi efektivitas pengelolaan kawasan konservasi laut Nusa Penida. *Jurnal Ilmu Kelautan Tropis*, 11(2), 85–96.
- Rahmawati, D., Mulyadi, E., & Pratama, A. (2020). Dampak perubahan iklim terhadap kesehatan terumbu karang di Bali. *Jurnal Oseanografi Indonesia*, 9(1), 22–31.
- Smith, J. E., & Kelly, E. L. (2021). Coral population connectivity and resilience under climate change. *Global Change Biology*, 27(12), 2623–2634.
- Supriharyono, & Adnyana, N. P. (2019). Kondisi tutupan karang dan keanekaragaman biota di perairan Nusa Penida. *Jurnal Biologi Tropika*, 19(2), 133–142.
- Sutanto, R., Arifin, Z., & Dewi, N. L. (2023). Coral reef status and restoration efforts in Bali. *Indonesian Journal of Marine Research*, 12(1), 58–70.
- Veron, J. E. N., Stafford-Smith, M. G., & DeVantier, L. M. (2022). Patterns of biodiversity in coral reefs: A global synthesis. *Biological Conservation*, 268, 109491.
- Wilkinson, C. R., & Souter, D. (2018). *Status of Coral Reefs of the World*. Global Coral Reef Monitoring Network Report.
- Wouthuyzen, S., Adnyana, I. W., & Sari, P. A. (2021). Oceanographic characteristics of Nusa Penida and their relation to coral reef health. *Journal of Marine Science and Technology*, 26(3), 245–256.