

Tersedia online di: <http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/jkpi>

e-mail: jkpi.puslitbangkan@gmail.com

JURNAL KEBIJAKAN PERIKANAN INDONESIA

Volume 17 Nomor 1 Mei 2025

p-ISSN: 1979-6366

e-ISSN: 2502-6550

Akreditasi Ditjen DIKTIRISTEK Nomor: 10/C/C3/DT.05.00/2025



EVALUASI MULTITEMPORAL INDEKS KESEHATAN KARANG DI KAWASAN KONSERVASI PULAU PIEH DAN LAUT SEKITARNYA (2021-2024): ANALISIS BIOFISIK DAN IMPLIKASINYA TERHADAP KEBIJAKAN PENGELOLAAN BERBASIS EKOSISTEM

MULTITEMPORAL EVALUATION OF CORAL HEALTH INDEX IN PIEH ISLAND CONSERVATION AREA AND SURROUNDING SEA (2021-2024): BIOPHYSICAL ANALYSIS AND ITS IMPLICATIONS FOR ECOSYSTEM-BASED MANAGEMENT POLICIES

Efi Noferya Manafi^{1,3}, Dietrich Geoffrey Bengen², Neviaty Putri Zamani², Meutia Samira Ismet², Ryan Adhitha Muslim^{1,3}, Defrian Marza Arisandi², Fadhlan Basaluddin Rahmat³, Yuwanda Ilham³, Agung Putra Utama³, Samsuardi⁴, Yennafri⁴, dan Muhammad Miswandi⁴

¹Mahasiswa Pascasarjana Program Studi Ilmu Kelautan, Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Jl. Agatis, IPB Dramaga, Bogor, Jawa Barat

²Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jl. Medan Merdeka Timur, Jakarta Pusat, DKI Jakarta

³LKKPN Pekanbaru Wilker Kawasan Konservasi Pulau Pieh, Kompleks Pelabuhan Perikanan Samudera Bungus, Jl. Padang Painan km 16, Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat

⁴Yayasan Minang Bahari, Jl. Pekanbaru No.11, Ulak Karang Selatan, Kota Padang, Sumatera Barat

Teregistrasi I tanggal: 7 Mei 2025; Diterima setelah perbaikan tanggal: 14 Juli 2025;

Disetujui terbit tanggal: 16 Juli 2025

ABSTRAK

Terumbu karang merupakan ekosistem laut yang memiliki peran penting dalam menjaga biodiversitas dan ketahanan lingkungan pesisir. Beberapa dekade terakhir, degradasi terumbu karang terus meningkat akibat aktivitas antropogenik dan perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis Indeks Kesehatan Karang (*Coral Health Index / CHI*) di Kawasan Konservasi Pulau Pieh dan perairan sekitarnya dalam periode 2021-2024 menggunakan pendekatan biofisik dan statistik. Analisis dilakukan terhadap 16 stasiun pengamatan, menggunakan data parameter bentik (tutupan karang hidup, resiliensi) dan biomassa ikan karang yang diperoleh melalui metode *Underwater Photo Transect* (UPT) dan *Underwater Visual Census* (UVC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai CHI berkisar antara 3 hingga 10, dengan beberapa stasiun menunjukkan tren peningkatan sementara lainnya mengalami stagnasi atau penurunan. Analisis *Spearman correlation* mengindikasikan bahwa parameter kualitas air (pH, DO, suhu, dan salinitas) tidak memiliki hubungan signifikan terhadap CHI pada semua tahun pengamatan ($p\text{-value} > 0,05$). Analisis *Principal Component Analysis* (PCA) menunjukkan bahwa faktor kualitas air bukan penentu utama perubahan CHI, tetapi tekanan ekologis dan aktivitas antropogenik lebih berperan dalam menentukan kondisi kesehatan terumbu karang. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pembagian zonasi konservasi di kawasan ini telah sesuai dengan peruntukannya, di mana zona inti berhasil mempertahankan kondisi ekosistem yang relatif lebih baik dibandingkan zona rehabilitasi dan pemanfaatan. Hasil penelitian ini memberikan rekomendasi pengelolaan berbasis ekosistem yang lebih adaptif untuk menjaga keberlanjutan terumbu karang di kawasan konservasi tersebut.

Kata Kunci: Coral Health Index (CHI); Ekosistem Terumbu Karang; Biomassa Ikan Karang; Analisis Biofisik; Pengelolaan Berbasis Ekosistem

ABSTRACT

Coral reefs are marine ecosystems that play a crucial role in maintaining biodiversity and coastal environmental resilience. However, in recent decades, coral reef degradation has continued to increase due to anthropogenic activities and climate change. This study aims to analyze the Coral

Korespondensi penulis:

e-mail: efinoferya@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.15578/jkpi.17.1.2025.59-75>

Health Index (CHI) in the Pieh Island Conservation Area and its surrounding waters from 2021 to 2024, utilizing both biophysical and statistical approaches. The analysis was conducted at 16 observation stations, utilizing benthic parameters (live coral cover and resilience) and reef fish biomass data collected through the Underwater Photo Transect (UPT) and Underwater Visual Census (UVC) methods. The results indicate that CHI values range from 3 to 10, with some stations showing an increasing trend while others experience stagnation or decline. Spearman correlation analysis indicates that water quality parameters (pH, DO, temperature, and salinity) do not have a significant relationship with CHI in all observation years ($p\text{-value} > 0.05$). Principal Component Analysis (PCA) shows that water quality factors are not the main determinants of CHI changes; instead, ecological pressure and anthropogenic activities play a more significant role in determining coral reef health. Furthermore, the evaluation revealed that the zoning arrangement in the conservation area was suitable for its intended purpose, as the core zones maintained relatively better ecosystem conditions compared to the rehabilitation and utilization zones. This study, ecosystem-based management to ensure the sustainability of coral reef ecosystems within the conservation area.

Keywords: *Coral Health Index (CHI); Coral Reef Ecosystem; Reef Fish Biomass; Biophysical Analysis; Ecosystem-Based Management*

PENDAHULUAN

Terumbu karang merupakan ekosistem kompleks yang menyediakan jasa ekosistem penting, seperti habitat bagi organisme laut, perlindungan pesisir, sumber daya pariwisata, dan peran dalam regulasi iklim global (Woodhead *et al.*, 2019). Kawasan Konservasi Pulau Pieh dan Laut di Sekitarnya, yang terletak di Provinsi Sumatera Barat, merupakan salah satu kawasan konservasi laut yang memiliki peran strategis dalam menjaga keanekaragaman hayati laut Indonesia. Kawasan ini mencakup ekosistem terumbu karang yang berfungsi sebagai habitat bagi berbagai spesies ikan, penyu, dan mamalia laut, serta memiliki nilai ekonomi yang tinggi melalui kegiatan pariwisata dan perikanan (Bahri, 2019; Komala *et al.*, 2024). Ekosistem ini menghadapi ancaman serius akibat perubahan iklim yang menyebabkan pemutihan karang dan juga aktivitas antropogenik seperti penangkapan ikan berlebihan, polusi, dan perubahan iklim yang menyebabkan pemutihan karang, sama seperti banyak kawasan terumbu karang di dunia (Giyanto *et al.*, 2017; Hughes *et al.*, 2018).

Secara global, kesehatan terumbu karang terus menurun, antara Januari 2023 hingga April 2025, tekanan panas telah berdampak pada 84% terumbu karang di seluruh dunia, dari Terumbu Mesoamerika di Karibia hingga wilayah super koral di Laut Merah, lokasi-lokasi yang sebelumnya diyakini tangguh terhadap kerusakan yang disebabkan oleh suhu ekstrem (Hanbury, 2025). Kondisi terumbu karang di Indonesia juga mengalami tekanan yang signifikan, dengan hanya sekitar 30% terumbu karang yang berada dalam kondisi baik (Hadi *et al.*, 2019). *Coral Health Index* (CHI) menjadi alat penting untuk menilai kesehatan terumbu karang secara komprehensif. CHI menggabungkan parameter bentik (tutupan karang hidup, resiliensi) dan biomassa ikan karang, sehingga

memberikan gambaran holistik tentang kondisi ekosistem (Giyanto *et al.*, 2017). Penggunaan CHI dalam penelitian ini karena dapat mengidentifikasi prioritas pengelolaan dan intervensi yang diperlukan untuk memulihkan ekosistem terumbu karang (Aprilian *et al.*, 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kesehatan terumbu karang di Kawasan Konservasi Pulau Pieh dan sekitarnya dalam kurun waktu 4 tahun terakhir dengan menggunakan Indeks Kesehatan Karang sebagai acuan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengelolaan dan konservasi ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan, sekaligus memperkuat kebijakan berbasis data dalam melindungi sumber daya laut Indonesia.

Studi ini berkontribusi terhadap ilmu pengetahuan dengan memberikan data multitemporal tentang kesehatan terumbu karang di Kawasan Konservasi Pulau Pieh, serta memberikan rekomendasi kebijakan untuk pengelolaan yang lebih efektif. Selain itu, penelitian ini juga relevan dengan upaya global dalam mencapai target konservasi laut, seperti yang diamanatkan dalam *Sustainable Development Goals* (SDGs) dan Konvensi Keanekaragaman Hayati (CBD).

METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dirancang sebagai studi multitemporal untuk mengevaluasi kesehatan terumbu karang di Kawasan Konservasi Nasional Pulau Pieh dan Laut di Sekitarnya selama periode 2021-2024. Desain penelitian mencakup pengumpulan data lapangan, analisis laboratorium, dan pemodelan statistik untuk mengidentifikasi tren dan faktor yang mempengaruhi kesehatan terumbu karang.

Pengumpulan dan Pengolahan Data

Penelitian dilakukan di 16 stasiun yang tersebar di Kawasan Konservasi Nasional Pulau Pieh dan Laut di Sekitarnya pada bulan Mei sampai dengan Agustus 2024. Data dikumpulkan menggunakan metode UPT untuk analisis tutupan bentik dan UVC untuk pengamatan biomassa ikan karang. Parameter kualitas air yang diukur meliputi pH, oksigen terlarut (DO), suhu, dan salinitas. Data sekunder didapatkan dari laporan hasil monitoring kesehatan terumbu karang LKKPN Pekanbaru sejak tahun 2021 hingga tahun 2024.

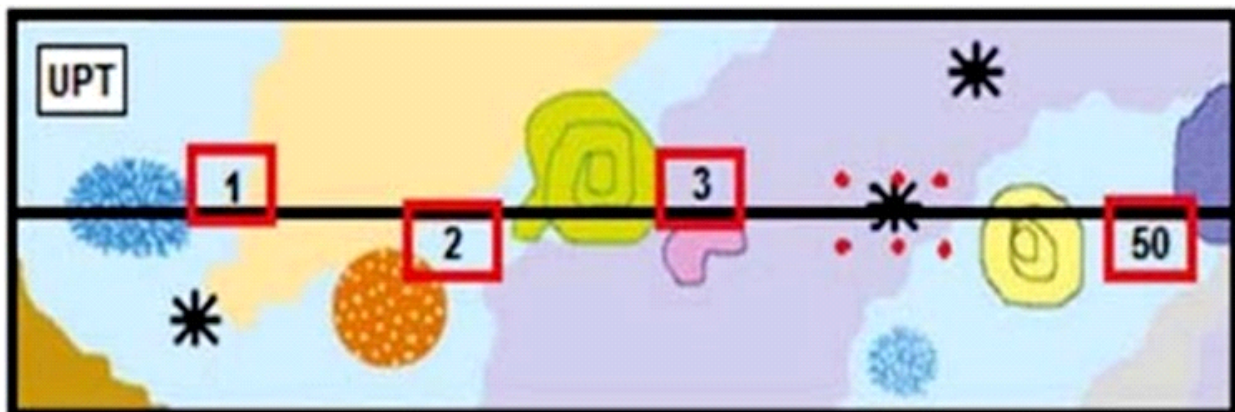
Kualitas Perairan

Pengambilan data parameter fisika dan kimia perairan dilakukan di semua stasiun pengamatan untuk memantau kualitas lingkungan perairan. Pengukuran dilakukan secara *in situ* menggunakan *Water Quality Checker GPS AQUAMETER AM-200*

untuk memastikan akurasi data. Hasil pengukuran dibandingkan dengan Baku Mutu Air Laut bagi Biota Laut berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021.

Komunitas Bentik Dan Karang

Data komunitas bentik dikumpulkan menggunakan metode *Underwater Photo Transect* (UPT). Metode ini dipilih karena efisiensinya dalam mengumpulkan data tutupan karang hidup, *rubble*, dan *fleshy seaweed* secara akurat dan tidak merusak. UPT melibatkan pengambilan foto sepanjang transek sejajar dengan garis pantai pada kedalaman 5 meter dan 7 meter. Foto-foto tersebut kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak *Coral Point Count with Excel Extensions* (CPCe) untuk menghitung persentase tutupan karang hidup dan komponen bentik lainnya (Giyanto *et al.*, 2017; Utami *et al.*, 2022).



Gambar 2. Ilustrasi metode UPT.

Figure 2. Illustration of the UPT Method.

Ikan Karang

Underwater Visual Census (UVC) digunakan untuk menilai struktur komunitas ikan karang dalam transek sabuk seluas 350 m² dengan panjang 70 meter dan lebar 2,5 meter di setiap sisi garis transek. Identifikasi ikan dilakukan berdasarkan buku referensi spesies ikan karang.

Analisis Statistik

Penelitian ini menggunakan uji statistik parametrik, yaitu *Principal Component Analysis* (PCA) dan Korelasi Spearman, untuk menganalisis pengaruh parameter kualitas air terhadap kondisi terumbu karang. Data yang digunakan merupakan data panel dari 8-12 stasiun pengamatan yang dikumpulkan selama empat tahun terakhir. Variabel yang dianalisis meliputi pH, oksigen terlarut (DO), suhu, dan salinitas, yang diduga berpengaruh terhadap *Coral Health Index* (CHI).

Uji korelasi Spearman digunakan untuk mengukur hubungan antara parameter kualitas air dengan CHI karena sifatnya yang tidak memerlukan asumsi distribusi normal dan lebih sesuai untuk data lingkungan. PCA diterapkan untuk mengidentifikasi faktor utama yang mempengaruhi perubahan ekosistem berdasarkan variabilitas data multivariat. Sebelum analisis, asumsi statistik diuji untuk memastikan validitas hasil, termasuk pengecekan distribusi data dan multikolinearitas antar variabel.

BAHASAN

Kualitas Perairan

Kondisi lingkungan, termasuk kualitas air laut pada ekosistem terumbu karang, diketahui dapat mempengaruhi biota yang hidup di dalamnya (Wulandari *et al.*, 2022). Semua pengambilan data kualitas air dilakukan secara *in situ* pada setiap stasiun pengamatan. Pengamatan dilakukan selama

empat tahun (2021-2024) di 16 stasiun PIEC yang sama dengan kategori bentik dan ikan karang.

Hasil menunjukkan bahwa terdapat fluktuasi signifikan pada beberapa parameter utama, seperti pH, DO (mg/L), suhu (°C), dan salinitas (ppt) (Tabel 2). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang baku mutu air laut, parameter suhu, salinitas, dan pH memenuhi baku mutu air laut bagi kehidupan biota laut. Namun, terjadi penurunan kualitas air dalam beberapa aspek, terutama pada tingkat DO dan salinitas yang berada di luar batas standar yang ditetapkan.

Secara umum, pH perairan relatif stabil di seluruh stasiun selama empat tahun dengan nilai rata-rata berada di kisaran 8,0 hingga 8,4, yang masih memenuhi standar pH ideal antara 7,0 hingga 8,5. Stabilitas pH ini menunjukkan bahwa keasaman perairan di 16 stasiun tersebut masih berada dalam ambang batas aman untuk mendukung kehidupan

organisme akuatik. Sebaliknya, parameter DO mengalami penurunan kualitas yang signifikan. Pada tahun 2021, 2023, dan 2024, nilai DO berkisar antara 2,9 hingga 3,9 mg/L, yang berada di bawah standar minimal yang ditetapkan (>5 mg/L). Kondisi ini mengindikasikan potensi hipoksia yang dapat mengancam kelangsungan hidup organisme perairan serta mengganggu keseimbangan ekosistem (Priya et al., 2023). Namun, pada tahun 2022, rata-rata DO tertinggi mencapai 7,3 mg/L, melebihi nilai baku mutu yang ditetapkan, menunjukkan kondisi perairan yang lebih sehat.

Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya di kawasan TWP Pieh yang menunjukkan adanya penurunan kualitas lingkungan akibat peningkatan aktivitas Studi di Pulau Pandan dan Pulau Toran melaporkan bahwa kawasan dengan aktivitas manusia yang lebih tinggi memiliki nilai DO yang lebih rendah dibandingkan dengan kawasan yang lebih terlindungi (Xu et al., 2023).

Tabel 2. Parameter Fisika dan Kimia Kualitas Air
Table 2. Physical and Chemical Parameters of Water Quality

St. (PIEC)	pH				DO (mg/L)				Suhu (°C)				Salinitas (ppt)			
	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
14	8,2	8,4	8,1	8,1	3,6	7,4	2,0	4,6	29,0	30,0	30,0	31,8	33,0	30,0	32,0	36,8
41	8,1	8,4	8,2	8,0	3,7	7,5	2,3	4,6	30,0	30,0	30,1	31,9	34,0	32,0	32,0	37,2
16	8,2	8,4	8,1	8,0	3,7	7,4	3,8	4,3	30,0	30,0	30,5	31,7	33,0	32,0	31,8	37,6
32	8,0	8,4	8,2	7,9	4,0	8,4	2,3	4,1	29,0	30,0	30,2	31,8	42,0	32,0	31,9	40,5
33	8,2	8,4	8,2	8,1	3,7	7,5	2,3	3,9	29,0	30,0	30,0	31,9	42,0	33,0	31,9	40,7
48	8,2	8,4	8,1	8,1	4,2	7,4	2,2	4,3	30,0	30,0	30,1	31,9	43,0	31,0	32,0	39,0
24	8,2	8,4	8,3	8,1	4,2	7,4	3,8	4,9	30,0	30,0	30,5	31,6	42,0	34,0	31,4	39,9
25	8,2	6,9	8,3	8,1	4,2	2,1	4,1	4,8	30,0	30,0	30,7	31,6	43,0	25,0	31,4	39,9
44	8,1	8,4	8,0	8,1	4,5	7,4	3,2	4,9	31,0	31,0	30,5	31,7	43,0	32,0	32,1	39,6
06	8,2	8,4	8,3	8,0	4,7	8,4	3,9	4,8	31,0	30,0	30,6	31,6	43,0	30,0	31,3	37,7
28	8,2	8,3	8,3	7,8	3,5	7,3	3,2	3,6	30,0	30,0	30,2	32,0	34,0	31,0	31,8	40,1
46	8,2	8,4	8,1	7,5	3,7	7,6	3,2	4,1	30,0	30,0	30,4	32,2	33,0	31,0	31,6	39,3
20	8,2	8,4	8,1	8,0	4,1	7,4	2,3	3,5	28,0	30,0	30,0	31,3	33,0	30,0	32,1	36,7
21	8,2	8,4	8,1	8,1	4,1	7,7	2,4	3,5	28,0	30,0	30,1	31,6	33,0	31,0	32,0	36,3
42	8,2	8,3	8,0	8,1	3,7	8,2	3,2	3,5	30,0	31,0	30,5	31,7	34,0	31,0	32,1	36,9
08	8,2	8,4	8,2	8,0	3,5	7,3	2,4	3,5	29,0	30,0	30,6	31,1	34,0	34,0	31,5	35,5
Rata-rata	8,2	8,3	8,2	8,0	3,9	7,3	2,9	3,7	29,6	30,1	30,3	31,7	37,4	31,2	31,8	38,4
Standar Deviasi Baku Mutu	0,06	0,37	0,10	0,16	0,36	1,43	0,71	1,44	0,89	0,34	0,25	0,26	4,70	2,07	0,28	1,69
	7 – 8,5*				>5 mg/L*				28 – 30°C*				33 – 34 ppm*			

Sumber: *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021

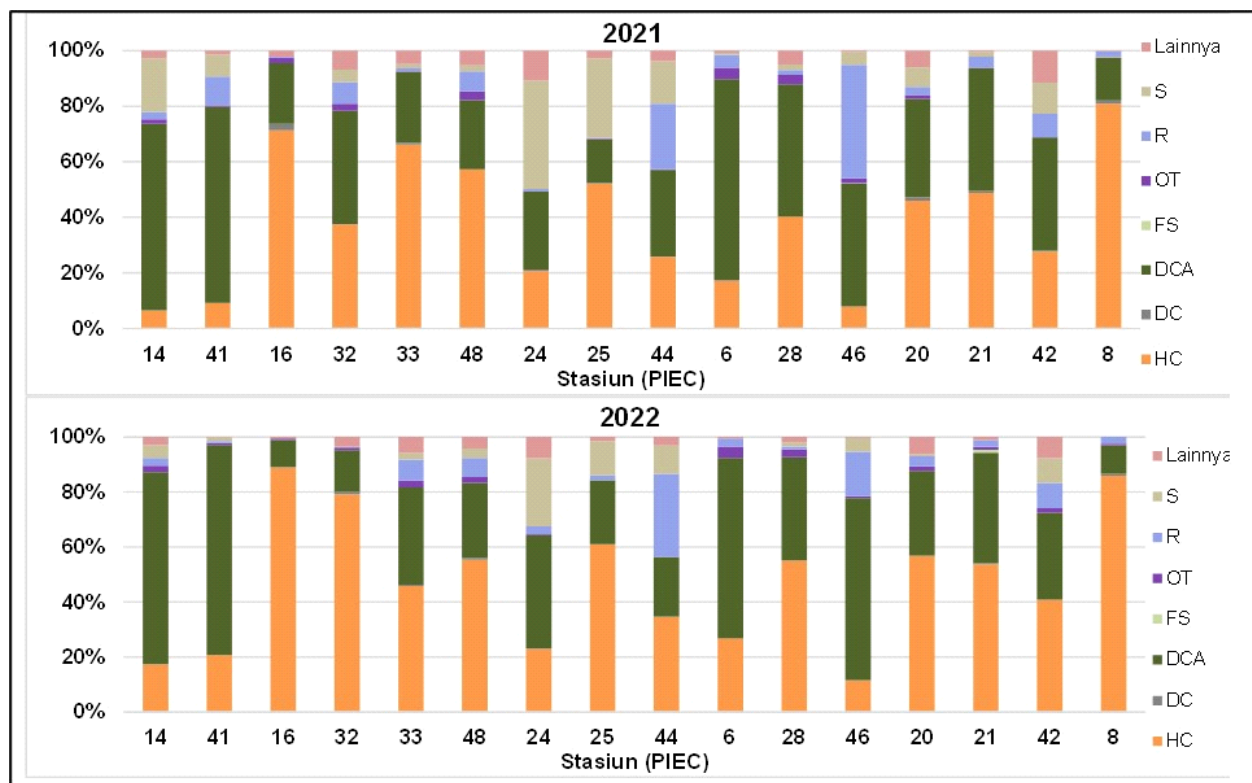
Karakteristik Habitat dan Komunitas Bentik

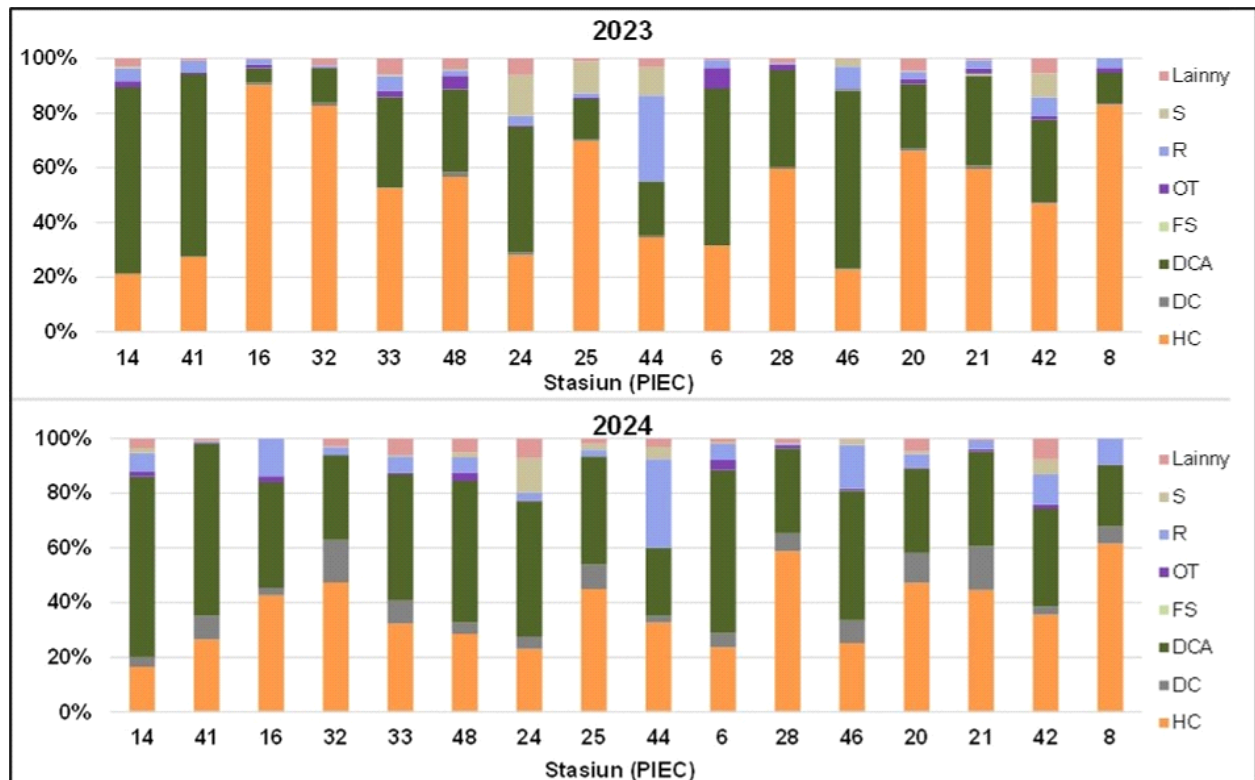
Hasil yang disajikan pada Gambar 4 menunjukkan bahwa komponen bentik terdiri dari *hard coral* (HC), *recent dead coral* (DC), *dead coral with algae* (DCA), *fleshy seaweed* (FS), *other biota* (OT), *rubble* (R), *sand* (S), serta kategori lainnya seperti *soft coral* (SC), *sponge* (SP), dan *silt* (SI). Data yang dikumpulkan dari 16 stasiun selama periode 2021 hingga 2024 menunjukkan variasi signifikan dalam distribusi kategori bentik di setiap stasiun dari tahun ke tahun. Fluktuasi ini mengindikasikan kondisi kesehatan terumbu karang serta dinamika ekosistem dasar perairan.

Tutupan HC yang tinggi mencerminkan kondisi ekosistem yang lebih sehat, sedangkan peningkatan DCA, FS, dan R menunjukkan adanya tekanan lingkungan yang dapat menghambat pertumbuhan karang. Pada tahun 2021, tutupan HC tertinggi ditemukan di PIEC 8 dengan persentase 80,80%, sementara di PIEC 14 hanya mencapai 6,40%, menunjukkan adanya variasi kondisi ekosistem antar stasiun. Secara umum, pada tahun 2022 terjadi peningkatan tutupan HC di hampir semua stasiun, dengan kenaikan signifikan di PIEC 16 dari 71,27% pada 2021 menjadi 88,80% pada 2022. Peningkatan ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh upaya rehabilitasi ekosistem dan regenerasi alami terumbu karang di beberapa lokasi (Suggett *et al.*, 2023).

Tahun 2024 terjadi penurunan tutupan HC di hampir semua stasiun jika dibandingkan dengan 2023. Penurunan ini dapat disebabkan oleh stres lingkungan yang terus meningkat, seperti pemanasan suhu laut dan peningkatan sedimentasi yang menghambat pertumbuhan karang (Sebastian & Kaaya, 2018). Selain itu, ketidakhadiran FS di sebagian besar stasiun selama empat tahun pengamatan dapat dihubungkan dengan kuatnya arus atau aktivitas sedimentasi rendah yang tidak mendukung keberadaan pasir halus sebagai substrat dasar laut.

Kategori *rubble* (R) menunjukkan fluktuasi signifikan di berbagai stasiun. Pada tahun 2021, beberapa stasiun mencatat tutupan batuan cukup tinggi, seperti PIEC 46 dengan 40,87% dan PIEC 44 dengan 23,60%. Tahun berikutnya, terjadi penurunan pada tutupan R di beberapa stasiun, seperti di PIEC 46 yang turun menjadi 16,07% pada 2024. Fluktuasi ini kemungkinan besar disebabkan oleh dinamika substrat dasar laut, seperti erosi, sedimentasi, dan aktivitas biologis yang mempengaruhi distribusi batuan di dasar perairan. Kehadiran batuan sebagai substrat penting karena dapat menjadi tempat menempel bagi berbagai organisme bentik, termasuk karang dan alga (Razak *et al.*, 2022).





Gambar 3. Kategori Bentik Pada Stasiun Pengamatan dalam 4 Tahun.

Figure 3. Benthic Category at Observation Stations Over 4 Years.

Hasil pengamatan karakteristik habitat sangat bervariasi terutama setiap zona. Komponen bentik yang digunakan untuk menghitung indeks kesehatan terumbu karang adalah *fleshy seaweed* (makro alga), pecahan karang mati (*rubble*) dan tutupan karang hidup (Mcleod *et al.*, 2019). Persentase tutupan karang hidup 16 stasiun pengamatan berdasarkan kategori LIPI Giyanto *et al.*, (2017) menunjukkan pada kategori rendah hingga tinggi, pada 4 tahun terakhir (3). Selain itu, juga di temukan tingkat kemampuan resiliensi atau pemulihan dengan kategori tinggi. Kemudian untuk tingkat resiliensi pada semua stasiun berdasarkan Buku Panduan Indeks Kesehatan Karang Indonesia bahwa resiliensi terumbu karang tinggi apabila tutupan *fleshy seaweed* < 3% atau tutupan pecahan karang d"60% dan tutupan karang hidup >5% (Giyanto *et al.*, 2017). Resiliensi merupakan respon ekosistem dan jaminan terhadap terjadinya perubahan lingkungan, dan telah menjadi tujuan utama dari pengelolaan terumbu karang (Mcleod *et al.*, 2019).

Tingkat kerusakan pada habitat karang dicirikan oleh rendahnya tutupan karang hidup dan tingginya tutupan *rubble*, yang kemudian menyediakan media tumbu bagi makroalga (Wulandari *et al.*, 2022). Makroalga adalah kompetitor bagi karang karena mengambil alih karang jika perairan subur, dimana makroalga yang tumbuh pada karang hidup dapat membunuh jaringan karang (Mcleod *et al.*, 2019).

Pada dasarnya, makroalga tumbuh lebih cepat daripada karang karena adanya persaingan cahaya dan ruang untuk tumbuh. Substrat *rubble* merupakan substrat yang tidak stabil, sehingga sulit bagi karang baru untuk merekolonisasi area tersebut. Namun, *rubble* justru menjadi substrat yang cocok untuk pertumbuhan makroalga. Keanekaragaman makroalga diketahui meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi fosfat, nitrat, pH, dan salinitas (Rugebregt *et al.*, 2020). Sebaliknya, peningkatan suhu, salinitas, dan amonia cenderung mengurangi keanekaragaman makroalga (Silaban *et al.*, 2020).

Dominasi makroalga pada substrat akan menyulitkan proses pemulihan kondisi karang (Lei *et al.*, 2024). Potensi pemulihan atau kemampuan adaptasi dan bertahan dari tekanan merupakan salah satu indikator penilaian, dimana apabila memiliki potensi pemulihan yang rendah maka terumbu karang akan mudah rusak apabila terdapat tekanan, namun demikian semua stasiun memiliki tingkat pemulihan tinggi. Berkaitan dengan tingkat resiliensi ataupun potensi pemulihan saat mengalami kerusakan karena mendapatkan gangguan/tekanan, maka pada kondisi karang yang sehat, tidak akan dijumpai tanda-tanda kerusakan atau gangguan serius yang akan mempengaruhi pemulihannya untuk kembali ke kondisi semula. Hal ini ditandai dengan tidak

banyak dijumpainya pecahan karang yang hancur berantakan (*unconsolidated rubble*), ataupun melimpahnya *fleshy seaweed* (Ritonga *et al.*, 2022).

Tabel 3 menunjukkan bahwa data persentase tutupan karang dari tahun 2021 hingga 2024 cenderung bervariasi namun kategori pemulihan

cenderung sama. Hal ini serupa dengan penelitian Morais *et al.*, (2024) yang menyebutkan bahwa meskipun lokasi berbeda dengan kondisi awal tutupan karang yang beragam, semua menunjukkan pemulihan alami berkat spesies suksesional awal dengan tingkat pemulihan yang cepat dan serupa antar lokasi.

Tabel 3. Persentase Komponen Benthik Terumbu Karang dan Kategorinya

Table 3. Percentage of Coral Reef Benthic Components and Their Categories

St. PIEC	HC	FS	R	Kategori Tutupan Karang	Kategori Pemulihan	St. PIEC	HC	FS	R	Kategori Tutupan Karang	Kategori Pemulihan
2021						2022					
14	6,40	0,00	2,53	Rendah	Tinggi	14	17,27	0,00	2,80	Rendah	Tinggi
41	9,20	0,00	10,40	Rendah	Tinggi	41	20,67	0,00	0,73	Sedang	Tinggi
16	71,27	0,07	0,40	Tinggi	Tinggi	16	88,80	0,00	0,07	Tinggi	Tinggi
32	37,47	0,00	7,73	Tinggi	Tinggi	32	79,20	0,00	0,27	Tinggi	Tinggi
33	66,13	0,00	1,00	Tinggi	Tinggi	33	45,80	0,00	7,67	Tinggi	Tinggi
48	57,13	0,00	7,27	Tinggi	Tinggi	48	55,33	0,00	7,00	Tinggi	Tinggi
24	20,67	0,00	0,80	Sedang	Tinggi	24	22,93	0,00	2,80	Sedang	Tinggi
25	52,13	0,00	0,27	Tinggi	Tinggi	25	60,81	0,00	1,80	Tinggi	Tinggi
44	25,73	0,00	23,60	Sedang	Tinggi	44	34,47	0,00	30,20	Sedang	Tinggi
06	17,20	0,00	4,60	Rendah	Tinggi	06	26,73	0,00	2,80	Sedang	Tinggi
28	40,27	0,00	1,63	Tinggi	Tinggi	28	55,00	0,00	1,07	Tinggi	Tinggi
46	7,80	0,20	40,87	Rendah	Tinggi	46	11,33	0,00	16,13	Rendah	Tinggi
20	46,00	0,00	2,93	Tinggi	Tinggi	20	56,60	0,00	3,80	Tinggi	Tinggi
21	48,80	0,00	4,07	Tinggi	Tinggi	21	53,67	1,07	2,40	Tinggi	Tinggi
42	27,62	0,00	8,40	Sedang	Tinggi	42	40,73	0,00	9,13	Tinggi	Tinggi
08	80,80	0,20	1,60	Tinggi	Tinggi	08	85,87	0,00	2,47	Tinggi	Tinggi
2023						2024					
14	21,07	0,00	4,73	Sedang	Tinggi	14	16,53	0,00	6,87	Rendah	Tinggi
41	27,27	0,00	4,47	Sedang	Tinggi	41	26,60	0,00	0,60	Sedang	Tinggi
16	90,27	0,00	2,00	Tinggi	Tinggi	16	42,67	0,00	13,67	Tinggi	Tinggi
32	82,73	0,00	0,60	Tinggi	Tinggi	32	47,27	0,00	2,73	Tinggi	Tinggi
33	52,60	0,00	5,27	Tinggi	Tinggi	33	32,27	0,00	5,93	Sedang	Tinggi
48	56,73	0,00	1,93	Tinggi	Tinggi	48	28,60	0,00	5,53	Sedang	Tinggi
24	28,07	0,00	3,13	Sedang	Tinggi	24	23,06	0,00	2,75	Sedang	Tinggi
25	69,87	0,00	1,73	Tinggi	Tinggi	25	44,93	0,00	2,40	Tinggi	Tinggi
44	34,53	0,00	31,33	Sedang	Tinggi	44	32,67	0,00	32,53	Sedang	Tinggi
06	31,47	0,00	2,87	Sedang	Tinggi	06	23,53	0,00	5,80	Sedang	Tinggi
28	59,67	0,00	0,33	Tinggi	Tinggi	28	58,87	0,00	0,73	Tinggi	Tinggi
46	22,73	0,13	8,20	Sedang	Tinggi	46	25,20	0,07	16,07	Sedang	Tinggi
20	66,27	0,00	2,53	Tinggi	Tinggi	20	47,20	0,00	4,87	Tinggi	Tinggi
21	59,67	0,73	3,00	Tinggi	Tinggi	21	44,60	0,13	3,13	Tinggi	Tinggi
42	46,93	0,00	7,07	Tinggi	Tinggi	42	35,47	0,00	10,93	Tinggi	Tinggi
08	83,07	0,00	3,33	Tinggi	Tinggi	08	61,53	0,00	9,53	Tinggi	Tinggi

Ikan Karang

Biomassa ikan karang meliputi ikan karnivor dan ikan herbivor merupakan indikator utama kesehatan ekosistem terumbu karang, yang mencerminkan produktivitas ekosistem dan fungsi ekologisnya. Dalam penelitian ini, biomassa ikan karang diamati selama empat tahun (2021-2024) pada berbagai stasiun dengan hasil yang bervariasi. Beberapa stasiun seperti PIEC 16, 33, dan 28 menunjukkan peningkatan signifikan dalam biomassa, mencerminkan pemulihan ekosistem yang efektif. Beberapa stasiun lainnya seperti PIEC 32 dan 41 mengalami penurunan yang mengindikasikan tekanan ekologis yang masih tinggi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa ikan karang berkorelasi erat dengan persentase tutupan karang hidup. Lokasi dengan tutupan karang

yang lebih tinggi cenderung memiliki biomassa ikan yang lebih besar, sementara degradasi habitat akibat aktivitas manusia seperti penangkapan ikan berlebihan dan polusi menyebabkan penurunan populasi ikan. Berdasarkan klasifikasi LIPI (Giyanto et al., 2017), variasi biomassa ikan karang di stasiun-stasiun penelitian berkisar dari kategori “Rendah” (< 970 kg/ha) hingga “Tinggi” (> 1940 kg/ha).

Studi ini menegaskan bahwa strategi konservasi berbasis ekosistem sangat diperlukan untuk meningkatkan biomassa ikan dan menjaga keseimbangan ekosistem. Rekomendasi utama mencakup penguatan zonasi konservasi, mitigasi tekanan antropogenik, pemantauan biomassa secara berkelanjutan, serta upaya restorasi habitat untuk meningkatkan daya dukung ekosistem bagi spesies ikan karang.

Tabel 4. Total Biomassa Ikan Karang

Table 4. Total Biomass of Coral Reef Fish

St. PIEC	Total Biomassa (kg/ha)				Kategori			
	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
14	178,75	120,07	489,36	249,39	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
41	68944,78	108,46	583,54	189,14	Tinggi	Rendah	Rendah	Rendah
16	256,57	56,38	1128,34	221,38	Rendah	Rendah	Sedang	Rendah
32	689,09	289,33	501,41	167,29	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
33	314,74	821,94	664,35	3837,93	Rendah	Rendah	Rendah	Tinggi
48	243,26	91,37	747,75	236,31	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
24	49,79	59,19	271,77	332,31	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
25	45,25	83,47	338,57	138,45	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
44	92,24	263,78	801,06	1351,24	Rendah	Rendah	Rendah	Sedang
06	227,40	127,74	614,42	182,18	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
28	242,47	457,72	1266,89	5571,49	Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi
46	33,30	66,13	869,10	124,67	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
20	79,12	282,57	1236,49	631,31	Rendah	Rendah	Sedang	Rendah
21	270,86	77,44	404,69	272,88	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
42	91,58	281,40	640,95	209,65	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
08	106,01	277,11	3269,85	438,92	Rendah	Rendah	Tinggi	Rendah

Analisis Multitemporal Coral Health Indeks (CHI)

Penilaian indeks kesehatan terumbu karang pada kawasan penelitian ini didasarkan pada kombinasi dua komponen utama, yaitu komponen bentik dan komponen ikan terumbu karang, yang masing-masing terdiri dari enam dan tiga kelas. Untuk meningkatkan sensitivitas indeks terhadap kondisi ikan, bobot komponen ikan terumbu karang diberikan dua kali lebih besar dibandingkan komponen bentik. Nilai masing-

masing kelas ikan terumbu karang ditetapkan sebagai berikut: “rendah” = 2, “sedang” = 4, dan “tinggi” = 6. Sementara itu, nilai komponen bentik tetap mengacu pada rentang skor 1 hingga 6. Setiap kombinasi dari kedua komponen tersebut menghasilkan total 18 kombinasi nilai, yang dihitung dengan cara menjumlahkan skor komponen bentik dan ikan terumbu karang. Seluruh hasil kombinasi kemudian dirangking mulai dari nilai tertinggi hingga terendah, sehingga diperoleh skor indeks kesehatan terumbu

karang dengan rentang nilai 1 hingga 10. Indeks tertinggi (nilai 10) merepresentasikan kondisi terumbu karang yang paling sehat dan stabil, sedangkan indeks terendah (nilai 1) menunjukkan kondisi terumbu karang yang sangat terdegradasi (Giyanto *et al.*, 2017).

Menurut Hadi *et al.*, (2020), indeks kesehatan terumbu karang mencerminkan kondisi tutupan karang hidup, potensi pemulihannya, dan fungsi ekologis yang terkait. Indeks ini melibatkan beberapa parameter penting seperti tutupan persentase karang hidup (HC), pecahan karang (R), *fleshy seaweed* (FS), dan biomassa ikan karang sebagai indikator fungsi ekologis ekosistem terumbu karang. Secara umum, penelitian indeks kesehatan terumbu karang di Indonesia yang dilakukan pada 366 stasiun menunjukkan bahwa skala CHI berkisar antara 3 hingga 6 (Ritonga *et al.*, 2022).

Berdasarkan Tabel 5 mengenai *Coral Health Index* (CHI), terlihat adanya variasi nilai CHI pada setiap stasiun dari tahun 2021 hingga 2024. Secara keseluruhan, nilai CHI berkisar antara 3 hingga 10 di berbagai stasiun. Variasi ini mencerminkan perbedaan kondisi ekosistem karang antarstasiun, yang dipengaruhi oleh tutupan karang, resiliensi, dan biomassa ikan. PIEC 14 mengalami kondisi stagnan pada awalnya, dengan nilai CHI 3 sepanjang 2021-

2022, kemudian meningkat menjadi 5 pada 2023 sebelum kembali menurun ke angka 3 pada 2024. Kondisi ini menunjukkan ekosistem yang tidak stabil dengan tekanan lingkungan yang signifikan.

Stasiun PIEC 41 menunjukkan peningkatan dari nilai CHI 3 pada 2021 menjadi 5 pada 2022 dan bertahan hingga 2024. PIEC 41 mencerminkan kondisi ekosistem yang masih dalam tahap pemulihan. Sementara itu, PIEC 16 mengalami tren yang lebih stabil dengan nilai CHI tetap di angka 6 sepanjang periode 2021 hingga 2024. PIEC 33 dan PIEC 28 mencatat tren yang lebih positif dengan peningkatan signifikan pada 2024, mencapai nilai CHI 9 dan 10. Kondisi ini mencerminkan keberhasilan intervensi konservasi dengan perlindungan habitat yang lebih baik dan pemulihan biomassa ikan karang.

Temuan ini konsisten dengan penelitian Prakash & Verma (2022) di kawasan yang sama, yang menegaskan bahwa efektivitas konservasi sangat bergantung pada tingkat perlindungan dan keberlanjutan rehabilitasi ekosistem. Selain itu, studi Hughes *et al.*, (2017) dan Ritonga *et al.*, (2022) menunjukkan bahwa degradasi habitat akibat tekanan manusia merupakan faktor utama dalam penurunan kesehatan ekosistem terumbu karang di kawasan konservasi serupa.

Tabel 5. Indeks Kesehatan Terumbu Karang Kawasan Konservasi Pulau Pieh dan sekitarnya
Table 5. *Coral Health Index of the Pieh Island Conservation Area and Surroundings*

St. PIEC	Komponen Bentik		Nilai	Komponen Ikan	Nilai	Total Nilai	Indeks Kesehatan Karang (CHI)
	Tutupan Karang	Resiliensi		Biomassa			
2021							
14	Rendah	Tinggi	3	Rendah	2	5	3
41	Rendah	Tinggi	3	Tinggi	6	9	7
16	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
32	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
33	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
48	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
24	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
25	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
44	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
06	Rendah	Tinggi	3	Rendah	2	5	3
28	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
46	Rendah	Tinggi	3	Rendah	2	5	3
20	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
21	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
42	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
08	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6

2022							
14	Rendah	Tinggi	3	Rendah	2	5	3
41	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
16	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
32	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
33	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
48	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
24	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
25	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
44	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
06	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
28	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
46	Rendah	Tinggi	3	Rendah	2	5	3
20	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
21	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
42	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
08	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
2023							
14	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
41	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
16	Tinggi	Tinggi	6	Sedang	2	8	6
32	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
33	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
48	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
24	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
25	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
44	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
06	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
28	Tinggi	Tinggi	6	Sedang	4	10	8
46	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
20	Tinggi	Tinggi	6	Sedang	4	10	8
21	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
42	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
08	Tinggi	Tinggi	6	Tinggi	6	12	10
2024							
14	Rendah	Tinggi	3	Rendah	2	5	3
41	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
16	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
32	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
33	Sedang	Tinggi	5	Tinggi	6	11	9
48	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
24	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
25	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
44	Sedang	Tinggi	5	Sedang	4	9	7
06	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
28	Tinggi	Tinggi	6	Tinggi	6	12	10
46	Sedang	Tinggi	5	Rendah	2	7	5
20	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
21	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
42	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6
08	Tinggi	Tinggi	6	Rendah	2	8	6

Hubungan Kualitas Air dengan Indeks Kesehatan Terumbu Karang (CHI)

Hasil PCA menunjukkan bahwa kualitas air tidak memiliki hubungan signifikan dengan CHI. Faktor dominan yang mempengaruhi CHI meliputi tekanan ekologis dan aktivitas manusia. Tekanan dari pemanfaatan sumber daya laut, sedimentasi, dan degradasi habitat lebih berperan dalam menentukan kondisi ekosistem karang (Hughes *et al.*, 2017; Wilson *et al.*, 2019).

Komparasi dengan studi sebelumnya menunjukkan bahwa tren serupa ditemukan di berbagai wilayah konservasi lainnya. Misalnya, penelitian Cinner *et al.*, (2020) mengungkapkan bahwa efektivitas pengelolaan berbasis zonasi dapat meningkatkan daya tahan ekosistem terhadap gangguan eksternal. Sementara itu, studi Obura *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa pendekatan mitigasi berbasis ekosistem seperti restorasi terumbu karang dan peningkatan populasi herbivora dapat meningkatkan daya tahan sistem terhadap tekanan lingkungan.

Tabel 6. Uji korelasi Spearman tanpa mempertimbangkan waktu dan lokasi.

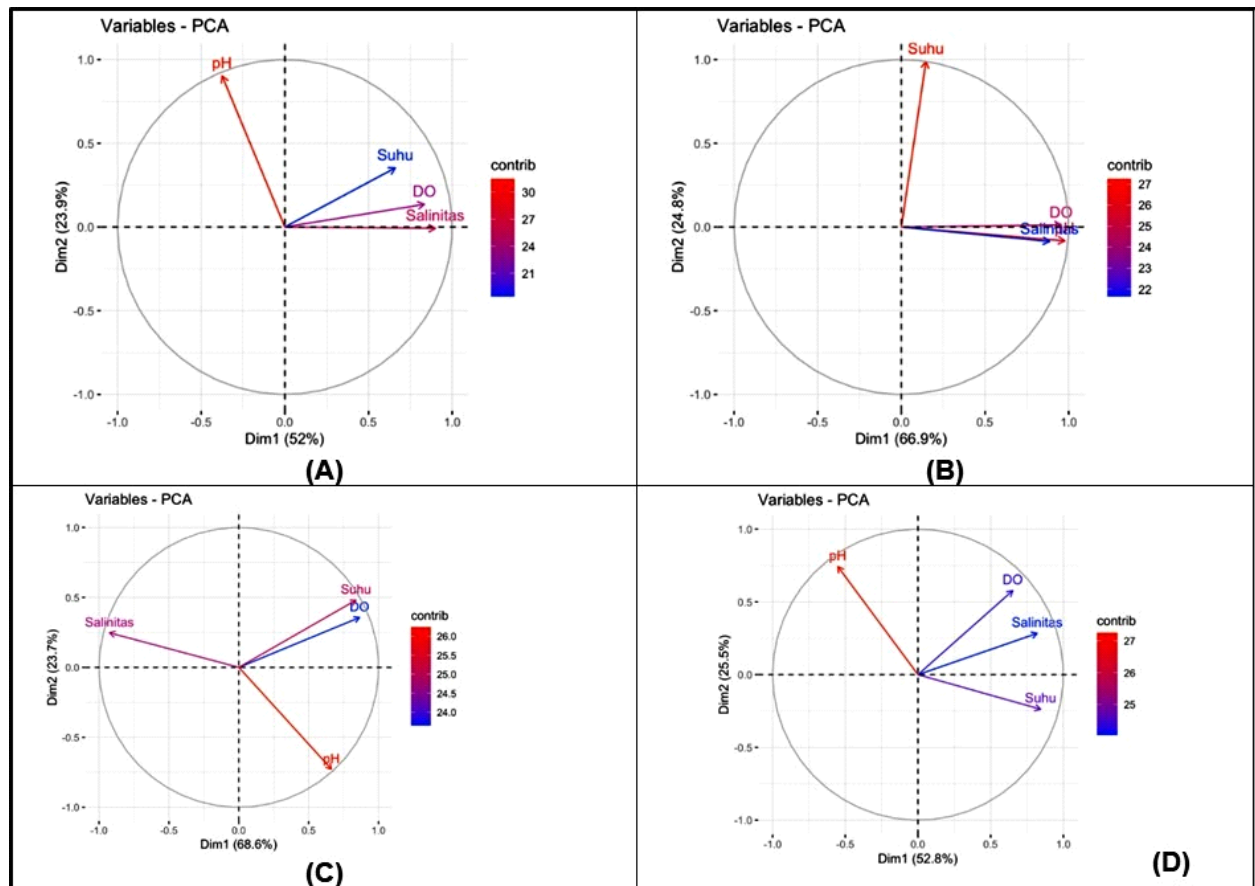
Table 6. Spearman Correlation Test Without Considering Time and Location

Variabel	Spearman's ρ	p-value	Signifikansi
pH	-0,142	0,2628	Tidak Signifikan
DO	-0,203	0,1076	Tidak Signifikan
Suhu	0,011	0,933	Tidak Signifikan
Salinitas	0,106	0,4047	Tidak Signifikan

Tabel 7. Uji korelasi Spearman dengan mempertimbangkan waktu dan lokasi untuk setiap tahun.

Table 7. Spearman Correlation Test Considering Time and Location for Each Year

Tahun	Variabel	Spearman's ρ	p-value	Signifikansi
2021	pH	0,10833	3,925	Tidak Signifikan
2021	DO	-0,075	5,42778	Tidak Signifikan
2021	Suhu	-0,469	0,46319	Tidak Signifikan
2021	Salinitas	0,041	6,11806	Tidak Signifikan
2022	pH	-0,153	3,97153	Tidak Signifikan
2022	DO	-0,303	1,75833	Tidak Signifikan
2022	Suhu	-0,322	1,55139	Tidak Signifikan
2022	Salinitas	0,07431	4,81736	Tidak Signifikan
2023	pH	0,07569	4,78542	Tidak Signifikan
2023	DO	-0,211	2,99931	Tidak Signifikan
2023	Suhu	-0,236	2,62847	Tidak Signifikan
2023	Salinitas	0,048	5,97847	Tidak Signifikan
2024	pH	-0,150	4,02014	Tidak Signifikan
2024	DO	-0,381	1,00694	Tidak Signifikan
2024	Suhu	0,029	6,35903	Tidak Signifikan
2024	Salinitas	0,29097	0,74028	Tidak Signifikan



Gambar 4. Grafik Biplot PCA untuk Setiap Tahun: (A) 2021; (B) 2022; (C) 2023; dan (D) 2024.

Figure 4. PCA Biplot Graph for Each Year: (A) 2021; (B) 2022; (C) 2023; and (D) 2024.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Kesimpulan

Variasi CHI antarstasiun: Penilaian *Coral Health Index* (CHI) di kawasan konservasi TWP PIEH menunjukkan variasi signifikan dalam kondisi terumbu karang di berbagai stasiun, mencerminkan status kesehatan ekosistem dari kondisi sehat hingga terdegradasi. Ketidakseimbangan antara tutupan karang dan CHI: Tutupan karang keras (HC) tidak selalu berkorelasi langsung dengan nilai CHI. Beberapa stasiun dengan tutupan karang tinggi tetap menunjukkan kondisi kritis akibat prevalensi penyakit karang, sementara beberapa stasiun dengan tutupan lebih rendah memiliki kondisi yang relatif lebih baik. Stasiun dengan tren positif dan negatif: PIEC 16, 33, dan 28 mencatat peningkatan nilai CHI hingga tahun 2024, yang didukung oleh tutupan karang yang tinggi dan biomassa ikan dalam kategori sedang hingga tinggi. Sebaliknya, PIEC 14 mengalami stagnasi dengan nilai CHI rendah (3-5), mencerminkan degradasi ekosistem tanpa pemulihan yang signifikan.

Kesehatan terumbu karang dipengaruhi oleh suhu, salinitas, pH, dan oksigen terlarut (DO) sebagai

parameter lingkungan utama. Suhu laut yang meningkat 1–2°C di atas normal dapat memicu pemutihan massal dan meningkatkan kerentanan karang terhadap penyakit (Shinzato *et al.*, 2022; Hughes *et al.*, 2023). Salinitas ekstrem akibat intrusi air tawar atau hujan deras menyebabkan stres osmotik yang menghambat fotosintesis simbiosis dan pertumbuhan karang (Suggett & Smith, 2020). Penurunan pH sebesar ~0,3–0,4 unit akibat pengasaman laut menurunkan kalsifikasi hingga 40%, membuat kerangka karang rapuh dan rentan terhadap erosi (Comeau *et al.*, 2019; Erez *et al.*, 2021). Sementara itu, rendahnya DO memicu stres oksidatif melalui akumulasi ROS, yang merusak jaringan karang (Nelson & Altieri, 2019). Pengaruh kualitas air terhadap CHI: Analisis korelasi Spearman pada penelitian ini menunjukkan bahwa parameter kualitas air (pH, DO, suhu, dan salinitas) tidak memiliki hubungan signifikan terhadap CHI pada semua tahun pengamatan ($p\text{-value} > 0,05$). Faktor dominan dalam perubahan CHI: Analisis *Principal Component Analysis* (PCA) mengungkapkan bahwa meskipun faktor lingkungan mempengaruhi variasi dalam data, hubungan antara kualitas air dan CHI tetap lemah. Dimensi pertama (Dim1) selalu menjadi faktor utama

yang menjelaskan perbedaan data setiap tahun, dengan pH, suhu, DO, dan salinitas sebagai variabel utama. Tekanan ekologis sebagai faktor utama: Hasil ini menunjukkan bahwa selain kualitas air, faktor lain seperti Arus laut, gelombang, dan aktivitas manusia berperan besar dalam kesehatan terumbu karang. Upwelling dan arus moderat menyediakan air dingin dan nutrisi sebagai *thermal refugia* saat pemanasan (Leichter *et al.*, 2021). Sebaliknya, gelombang ekstrem dapat merusak struktur karang dan mengurangi kompleksitas habitat (Jones & Smith, 2023). Tekanan antropogenik seperti sedimentasi, polusi nutrisi, dan perikanan destruktif memperburuk degradasi terumbu dengan menurunkan kualitas air dan meningkatkan penyakit karang (Siregar *et al.*, 2021). Meta-analisis terbaru juga menunjukkan kombinasi stressor global dan lokal menghambat kapasitas pemulihan ekosistem karang (Khan *et al.*, 2022).

Rekomendasi

Pemulihan ekosistem terumbu karang di kawasan TWP Pieh perlu dilakukan melalui pendekatan adaptif berbasis ekosistem. Peninjauan ulang terhadap zonasi konservasi sangat penting, mengingat beberapa area dengan nilai Coral Health Index (CHI) rendah, seperti stasiun PIEC 14 dan PIEC 41, menunjukkan tutupan karang <30% tetapi memiliki potensi perekrutan alami yang tinggi. Lokasi ini direkomendasikan sebagai prioritas untuk perluasan zona inti atau buffer zone untuk mengurangi tekanan antropogenik dari aktivitas penangkapan ikan dan wisata bahari (Darling *et al.*, 2022; Paxton *et al.*, 2024). Penguatan peraturan alat tangkap perlu dilakukan dengan hanya memperbolehkan alat ramah lingkungan seperti pancing ulur dan bubu, serta menetapkan ukuran minimum ikan yang boleh ditangkap, yakni $e \geq 20$ cm untuk spesies herbivora (*Scarus spp.*, *Acanthurus spp.*) dan $e \geq 30$ cm untuk spesies karnivora (*Lutjanus spp.*, *Epinephelus spp.*), untuk menjaga keseimbangan populasi dan fungsi ekologis herbivora dalam mengendalikan alga kompetitor (Cinner *et al.*, 2020; Hughes *et al.*, 2024). Pemantauan berbasis teknologi, seperti citra satelit resolusi tinggi dan sensor bawah laut (IoT reef monitoring), perlu diintegrasikan ke dalam program monitoring rutin (2–4 kali per tahun) untuk mendeteksi perubahan ekosistem secara dini dan menyesuaikan strategi konservasi (González-Rivero *et al.*, 2016). Selain itu, pemantauan khusus penyakit karang diperlukan mengingat beberapa stasiun dengan tutupan karang tinggi tetap mengalami penurunan CHI akibat prevalensi penyakit, seperti *White Syndrome* dan *Black Band Disease* (Work & Aeby, 2021). Strategi konservasi juga harus mengakomodasi adaptasi terhadap perubahan iklim dengan melindungi *thermal*

refugia di PIEC 33 dan PIEC 28 yang relatif tahan terhadap pemutihan massal dan gangguan fisik akibat gelombang ekstrem (McLeod *et al.*, 2019). Pendekatan ini, mendukung keberlanjutan ekosistem terumbu karang di TWP Pieh dapat dipertahankan, mendukung biodiversitas laut, serta meningkatkan ketahanan ekosistem terhadap perubahan lingkungan dan tekanan antropogenik.

PERSANTUNAN

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Kementerian Kelautan dan Perikanan, Badan Penyuluhan dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Kelautan dan Perikanan, dan Loka Kawasan Konservasi Perairan Nasional Pekanbaru serta kepada Kepala Loka Riset Kerentanan dan Sumber Daya Pesisir yang telah memfasilitasi dan membantu selama pengumpulan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprilian, R., Bengen, D. G., Erlania, E., Johan, O., & Idris, I. (2021). Coral reef health index on Sangiang Island. *Indonesian Journal of Marine Sciences*, 26(4), 271–281. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.26.4.271-281>
- Bahri, A. S. (2019). Strategi pengelolaan kawasan konservasi laut Pulau Pieh untuk mendukung pariwisata berkelanjutan. *Prosiding Seminar Nasional Kelautan dan Perikanan*, 7(1), 123–135. <https://doi.org/10.32528/sw.v2i2.2684>
- Cinner, J. E., Huchery, C., MacNeil, M. A., Graham, N. A. J., McClanahan, T. R., Maina, J., ... Mouillot, D. (2020). Bright spots among the world's coral reefs. *Nature*, 535(7612), 416–419. <https://doi.org/10.1038/nature18607>
- Comeau, S., Edmunds, P. J., Lantz, C. A., & Carpenter, R. C. (2019). Ocean acidification accelerates dissolution of experimental coral reef communities. *Biogeosciences*, 16(4), 847–861. <https://doi.org/10.5194/bg-16-847-2019>
- Darling, E. S., McClanahan, T. R., Maina, J., Gurney, G. G., Graham, N. A. J., Januchowski-Hartley, F., Cinner, J. E., Mora, C., Hicks, C. C., Maire, E., Puotinen, M., Skirving, W. J., Adjeroud, M., Ahmadi, G., Arthur, R., Bauman, A. G., Beger, M., Berumen, M. L., Bigot, L., ... Wilson, S. K. (2022). Social–ecological resilience informs coral reef conservation strategies under climate change. *Global Change Biology*, 28(2), 522–536. <https://doi.org/10.1111/gcb.15983>

- Erez, J., Reynaud, S., Silverman, J., Schneider, K., & Allemand, D. (2021). Coral calcification under ocean acidification and global change. *Oceanography*, 34(3), 108–119. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2021.303>
- Fauzan, R., Widianingsih, W., & Endrawati, H. (2024). Distribusi klorofil-a dan suhu permukaan laut terhadap kelimpahan ikan *Cephalopholis argus* dan *Cephalopholis miniata* di Pulau Pieh, Sumatera Barat. *Jurnal Penelitian Kelautan*, 13(2), 328–336. <https://doi.org/10.14710/jmr.v13i2.43988>
- Komala R., Noer I., Miarsyah M., Widyartini D.S., (2024) Assess the level of damage to the coral reef ecosystem based on substrate coverage on Bira Island, Kepulauan Seribu, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 25(3):971-977. DOI: 10.13057/biodiv/d250309
- Giyanto, Abrar, M., Hadi, T. A., Budiyo, A., & Suharsono. (2017). *Status terumbu karang Indonesia 2017*. Pusat Penelitian Oseanografi – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). <https://www.researchgate.net/publication/317933816>
- González-Rivero, M., Ferrari, R., Schönberg, C. H. L., Mumby, P. J., & Roelfsema, C. (2016). Linking remote sensing and ecology for monitoring coral reefs: A critical review. *Ecological Indicators*, 62, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.052>
- Hadi, T. A., Giyanto, Siringoringo, R. M., Budiyo, A., Johan, O., Souhoka, J., ... Suharsono. (2020). Potential stock of stony corals in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 441(1), 012111. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/441/1/012111>
- Hanbury, S. 2025. Studi: Pemutihan karang global saat ini mencapai 84 persen. *Mongabay Indonesia*. <https://www.mongabay.co.id/2025/04/27/studi-pemutihan-karang-global-saat-ini-mencapai-84-persen/>. Diakses pada 23 Mei 2025 pukul 18.54 WIB
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., ... & Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(7656), 82-90. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- Hughes, T. P., Anderson, K. D., Connolly, S. R., Heron, S. F., Kerry, J. T., Lough, J. M., Baird, A. H., Baum, J. K., Berumen, M. L., ... & Wilson, S. K. (2018). Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359(6371), 80-83. <https://doi.org/10.1126/science.aan8048>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., ... & Wilson, S. K. (2023). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 620, 541–550. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06186-7>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Dietzel, A., Eakin, C. M., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Liu, G., McWilliam, M. J., Pears, R. J., Pratchett, M. S., Skirving, W. J., Stella, J. S., Torda, G., & Wilson, S. K. (2024). Catastrophic bleaching events in 2023–2024 marine heatwave. *Limnology and Oceanography Letters*. <https://doi.org/10.1002/lol2.10456>
- Jones, N., & Smith, R. (2023). Offshore wave climate of the Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 42(3), 567–579. <https://doi.org/10.1007/s00338-023-02377-5>
- Khan, A., Murray, J., & Thompson, G. (2022). Nutrient supplying ocean currents modulate coral bleaching susceptibility. *Science Advances*, 8(15), eabc5493. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc5493>
- Komala R., Noer I., Miarsyah M., Widyartini D.S., (2024) Assess the level of damage to the coral reef ecosystem based on substrate coverage on Bira Island, Kepulauan Seribu, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 25(3):971-977. DOI: 10.13057/biodiv/d250309
- Leichter, J. J., Paytan, A., & Hench, J. L. (2021). Ocean currents magnify upwelling and deliver nutritional subsidies to reef-building corals during El Niño heatwaves. *Science Advances*, 7(35), eadd5032. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add5032>
- Lei, X., Liu, C., Yu, X., Luo, Y., Zhang, Y., Yang, J., ... Huang, H. (2024). The impact of macroalgae on reef-building corals depends on their species, density, and contact status. *Global Ecology and Conservation*, 54, e03201. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03201>
- McLeod, E., Anthony, K. R. N., Mumby, P. J., Maynard, J., Beeden, R., Graham, N. A. J., ... Tamelander, J. (2019). The future of resilience-based management in coral reef ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 233, 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.034>

- Morais, J., Tebbett, S. B., Morais, R. A., & Bellwood, D. R. (2024). Natural recovery of corals after severe disturbance. *Ecology Letters*, 27(1), 102–111. <https://doi.org/10.1111/ele.14332>
- Nelson, H. R., & Altieri, A. H. (2019). Oxygen: The unappreciated parameter in coral reef resilience. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(7), 539–548. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.02.014>
- Obura, D. O., Aeby, G., Amorntammarong, N., Appeltans, W., Bax, N., Bishop, J., ... Wongbusarakum, S. (2021). Coral reef restoration in the Anthropocene: Challenges and opportunities for global action. *PLOS Biology*, 19(10), e3001466. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001466>
- Paxton, A./ B., Foxfoot, I./ R., Cutshaw, C., Steward, D./ N., Poussard, L., Riley, T./ N., Swannack, T./ M., Piercy, C./ D., Altman, S., Puckett, B./ J., Storlazzi, C./ D., & Viehman, T./ S. (2024). Evidence on the ecological and physical effects of built structures in shallow, tropical coral reefs: A systematic map. *Environmental Evidence*, 13, Article 12. <https://doi.org/10.1186/s13750-024-00336-3>
- Prakash, S., & Verma, A. K. (2022). Anthropogenic activities and biodiversity threats. *International Journal of Biological Innovations*, 4(1), 94–103. <https://doi.org/10.46505/IJBI.2022.4110>
- Priya, A. K., Muruganandam, M., Rajamanickam, S. S., Sivarethinamohan, S. S., Gaddam, M. K. R., Velusamy, P., ... Muniasamy, S. K. (2023). Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystem – A review. *Environmental Research*, 238(2), 117233. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117233>
- Razak, T. B., Boström-Einarsson, L., Alisa, C. A. G., Vida, R. T., & Lamont, T. A. C. (2022). Coral reef restoration in Indonesia: A review of policies and projects. *Marine Policy*, 137, 104940. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104940>
- Ritonga, A. R., Ruswanti, C. D., Jaka, F., Putri, N. P., Muharam, M. R., & Kurniawan, D. (2022). Indeks kesehatan terumbu karang di perairan Siantan Selatan, Kabupaten Kepulauan Anambas. *Jurnal Akuatik Lestari*, 6(1), 22–32. <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v6i1.5512>
- Rugebregt, M. J., Arfah, H., & Pattipeilohy, F. (2020). Correlation between macroalgae diversity and water quality in Southwest Maluku waters. *Marine Research in Indonesia*, 45(1), 25–32. <https://doi.org/10.14203/mri.v45i1.387>
- Sebastian, C. A., & Kaaya, L. T. (2018). Dampak pemanasan suhu laut dan sedimentasi terhadap penurunan tutupan karang hidup (HC) di ekosistem terumbu karang. *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan*, 10(2), 67–82. <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000253>
- Silaban, R., & Kadmaer, E. M. Y. (2020). Pengaruh parameter lingkungan terhadap kepadatan makroalga di pesisir Kei Kecil, Maluku Tenggara. *Jurnal Badan Penelitian dan Pengembangan Kelautan dan Perikanan*, 15(1), 7619. <https://doi.org/10.15578/jkpi.v15i1.7619>
- Shinzato, C., Iguchi, A., & Inoue, M. (2022). Temperature thresholds of coral species: Implications for restoration. *Biology*, 11(3), 436. <https://doi.org/10.3390/biology11030436>
- Sinaga, R. R. K., Al-wira'i, R. M., Kurniawan, F., Roni, S., & Hidayati, J. R. (2023). Kondisi kesehatan terumbu karang di Taman Wisata Perairan Kepulauan Anambas. *Jurnal Akuatiklestari*, 6(1), 85–91. <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v6i1.5010>
- Siregar, W., Lestari, P., & Wijaya, F. (2021). Anthropogenic impact on Indonesian coastal water and ecosystems: Current status and future opportunities. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112345>
- Suggett, D. J., Edwards, M., Cotton, D., Hein, M., & Camp, E. F. (2023). An integrative framework for sustainable coral reef restoration. *One Earth*, 6(6), 666–681. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.05.007>
- Utami, D., Wibowo, E., & Siregar, A. (2022). Analisis tutupan karang hidup dan komunitas bentik menggunakan perangkat lunak CPCe di perairan Kepulauan Seribu. *Jurnal Ilmu Kelautan*, 20(2), 112–125. <https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v11i1.43337>
- Wilson, S. K., Babcock, R. C., Fisher, R., Holmes, T. H., Moore, J. A. Y., & Thomson, D. P. (2019). Relative roles of biological and physical processes influencing coral recruitment during the lag phase of reef recovery. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46447-7>

- Woodhead, A. J., Hicks, C. C., Norström, A. V., Williams, G. J., & Graham, N. A. J. (2019). Coral reef ecosystem services in the Anthropocene. *Functional Ecology*, 33(6), 1023–1034. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13331>
- Work, T. M., & Aeby, G. S. (2021). Coral disease research in the Anthropocene. *Frontiers in Marine Science*, 8, 675. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.675>
- Wulandari, S., Pratiwi, R., & Siregar, V. P. (2022). Karakterisasi kerusakan habitat karang berdasarkan tutupan karang hidup dan rubble serta dampaknya terhadap pertumbuhan makroalga. *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan*, 14(2), 95–110. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230217>
- Xu, Y., Zhou, T., Su, Y., Fang, L., Naidoo, A. R., Lv, P., Lv, S., & Meng, X.-Z. (2023). How anthropogenic factors influence the dissolved oxygen in surface water over three decades in eastern China? *Journal of Environmental Management*, 326 (Part B), 116828. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116828>