

Influence of Water Quality Parameters on Zooxanthellae Density in Reef-Building Corals from Pahawang Island, Lampung, Indonesia

Nanda Rizky Anugerah^{1*}, Riris Aryawati^{1*}, Isnaini¹, Tengku Zia Ulqodry¹, Muhammad Hendri¹, Yulianto Suteja²

¹Program Studi Ilmu Kelautan, FMIPA, Universitas Sriwijaya, Inderalaya, Sumatera Selatan Indonesia;

²Program Studi Ilmu Kelautan, Jurusan Perikanan dan Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram, Indonesia;

Article History

Received : February 03th, 2026

Revised : April 06th, 2026

Accepted : April 09th, 2026

*Corresponding Author:

Riris Aryawati, Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas

Matematika dan Ilmu

Pengetahuan Alam, Universitas

Sriwijaya, Inderalaya, Sumatera

Selatan, Indonesia;

Email: riris.aryawati@unsri.ac.id

Abstract: Despite the ecological and economic significance of coral reefs, quantitative data on how water quality parameters regulate zooxanthellae density in anthropogenically impacted tropical reefs remain limited. This study investigated the influence of water quality parameters on zooxanthellae density in branching corals at Pahawang Island, Lampung, Indonesia, across four stations representing different levels of human disturbance: dock area (Station 1), floating net cages area (Station 2), recreational area (Station 3), and a relatively pristine area (Station 4). Coral fragments were collected by SCUBA diving at 2–5 m depth, and zooxanthellae were extracted by homogenization followed by centrifugation, with cell density quantified using a hemocytometer under light microscopy. Physical and chemical water quality parameters were measured in situ using a CTD profiler, while nutrient concentrations were analyzed according to SNI protocols. Zooxanthellae density ranged from 16,822 to 22,227 cells/cm², indicating a healthy symbiotic status across all stations. Principal Component Analysis (PCA) identified dissolved oxygen (5.5–6.4 mg/L), depth (2.20–4.10 m), and water clarity (2.0–3.0 m) as the primary environmental drivers of zooxanthellae density variation, while temperature, pH, and salinity remained stable and within coral-suitable ranges. Hydrodynamic conditions and oxygen availability, rather than nutrient enrichment, appear to be the dominant regulators of zooxanthellae density at this site. These findings highlight the need for site-specific management strategies that prioritize maintaining dissolved oxygen levels and water circulation, and provide a scientific basis for developing zoning policies in coral ecotourism areas of Pahawang Island to ensure long-term reef ecosystem health.

Keywords: Anthropogenic pressure, dissolved oxygen, reef-building corals, water quality parameters, zooxanthellae density.

Pendahuluan

Terumbu karang merupakan ekosistem laut yang paling produktif dan beragam secara biologis di dunia, namun sekaligus termasuk yang paling rentan terhadap tekanan antropogenik dan perubahan iklim global (Hughes *et al.*, 2017). Di Indonesia sebagai negara dengan luas terumbu karang terbesar kedua di dunia, tekanan dari aktivitas wisata bahari dan perikanan menjadi ancaman nyata yang memerlukan pemantauan berbasis data ilmiah. Pulau Pahawang yang terletak di Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung, merupakan salah satu kawasan terumbu karang

penting di Selat Sunda dengan topografi pesisir beragam, meliputi pantai berpasir, mangrove, padang lamun, dan terumbu karang yang menjadi habitat bagi berbagai spesies laut (Panalaran & Pamungkas, 2024). Meningkatnya popularitas pulau ini sebagai destinasi wisata bahari telah menimbulkan kekhawatiran akan dampak jangka panjang terhadap kesehatan ekosistem terumbu karangnya.

Ekosistem terumbu karang di Pulau Pahawang menunjukkan keanekaragaman yang tinggi, didominasi oleh genera karang utama seperti *Acropora*, *Montipora*, dan *Porites* yang hidup bersimbiosis dengan zooxanthellae

(Novriadi *et al.*, 2024). Alga dinoflagellata mikroskopis yang hidup di dalam jaringan karang ini menyediakan hingga 95% kebutuhan energi karang melalui fotosintesis, menjadikan simbiosis ini fundamental bagi produktivitas dan kesehatan terumbu (Torres *et al.*, 2021). Revisi taksonomi terkini menempatkan zooxanthellae dalam famili Symbiodiniaceae yang mencakup setidaknya 15 genus berbeda, di mana keragaman genetik antar genus menekan perbedaan kapasitas adaptasi termal dan fisiologis antarkoloni karang (LaJeunesse *et al.*, 2018). Namun, kondisi terumbu karang di wilayah ini berkisar dari sedang hingga baik, dengan degradasi yang lebih mencolok di area yang sering dikunjungi wisatawan dimana tutupan karang hidup berkisar antara 36,67% hingga 63,30% (Akbar *et al.*, 2025).

Parameter lingkungan sangat mempengaruhi simbiosis karang-zooxanthellae. Suhu air, intensitas cahaya, salinitas, pH, oksigen terlarut, dan konsentrasi nutrisi secara kolektif menentukan kepadatan zooxanthellae dan efisiensi fotosintesis (Xu *et al.*, 2020). Tekanan antropogenik dari praktik penangkapan ikan destruktif dan aktivitas wisata yang tidak terkelola dapat mengganggu keseimbangan dan berpotensi memicu pelepasan zooxanthellae (*bleaching*) dan kematian karang selanjutnya (Fu *et al.*, 2024). Studi terkini menunjukkan bahwa keragaman dan kapasitas adaptasi zooxanthellae menentukan ketahanan karang terhadap tekanan lingkungan, meskipun tidak semua spesies memiliki kemampuan untuk menukar simbiosis dengan *strain* yang lebih tahan terhadap suhu tinggi (Torres *et al.*, 2021; Woolstra & Ziegler, 2020).

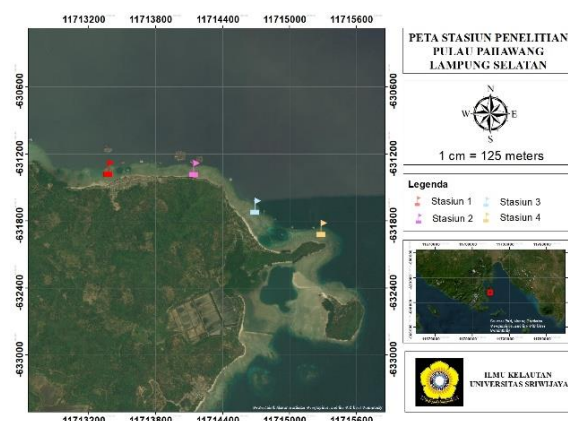
Meskipun terumbu karang Pulau Pahawang memiliki kepentingan ekologis dan ekonomis yang tinggi, kajian komprehensif yang mengkaji hubungan antara parameter kualitas perairan dengan kepadatan zooxanthellae masih terbatas. Penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi dampak antropogenik terhadap tutupan karang (Akbar *et al.*, 2025; Rakhmawati *et al.*, 2022), namun investigasi kuantitatif mengenai faktor-faktor lingkungan yang secara spesifik memengaruhi simbiosis karang-zooxanthellae di kawasan ini belum pernah dilaporkan sebelumnya. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengintegrasian analisis kepadatan zooxanthellae dengan pendekatan multivariat (PCA) untuk mengidentifikasi parameter

kualitas perairan yang paling berpengaruh pada karang branching di lokasi dengan gradien tekanan antropogenik yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kepadatan zooxanthellae pada karang *branching* di lokasi dengan tekanan antropogenik yang bervariasi dan menentukan hubungan antara parameter fisika-kimia kualitas perairan dengan kepadatan zooxanthellae di Pulau Pahawang, Kabupaten Pesawaran, Lampung.

Bahan dan Metode

Lokasi dan Desain Sampling

Penelitian ini merupakan studi deskriptif-kuantitatif dan kualitatif dengan desain survei observasional yang dilaksanakan pada bulan September 2025 di perairan Pulau Pahawang, Kabupaten Pesawaran, Lampung Selatan. Populasi penelitian adalah koloni karang *branching* yang terdapat di perairan Pulau Pahawang, dengan total sampel sebanyak 16 fragmen karang (empat ulangan per stasiun dari empat stasiun).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Empat stasiun ditetapkan menggunakan metode *purposive sampling* untuk mewakili tingkat dampak antropogenik yang bervariasi: Stasiun 1 di kawasan dermaga dengan lalu lintas kapal yang intensif; Stasiun 2 dekat keramba jaring apung untuk budidaya perikanan; Stasiun 3 di zona wisata rekreasi; dan Stasiun 4 di area yang masih alami dan jauh dari aktivitas manusia, berfungsi sebagai lokasi kontrol. Distribusi stasiun sejalan dengan penelitian sebelumnya di lokasi yang sama (Akbar *et al.*, 2025), memfasilitasi perbandingan data dan konsistensi dalam monitoring kondisi ekosistem.

Tabel 1. Titik Koordinat Stasiun Penelitian

St	Longitude	Latitude
1	105°13'22.96"E	5°39'43.78"S
2	105°13'48.77"E	5°39'42.96"S
3	105°14'5.98"E	5°39'55.21"S
4	105°14'24.25"E	5°40'2.54"S

q : Zooxanthellae yang ditemukan (sel)
 v : Luasan karang sampel (cm²)
 vt : volume sampel (larutan) hasil *sentrifuge* (ml)
 vs : volume sampel (larutan) yang dianalisis pada *hemositometer* (ml)

Pengambilan Sampel dan Parameter

Sampel karang diambil pada kedalaman 2-5 meter menggunakan peralatan penyelaman SCUBA. Fragmen karang *branching* yang sehat dipotong (1 cm) dengan hati-hati dari setiap stasiun dengan tiga ulangan pada setiap lokasi. Sampel segera diawetkan dalam botol 20 mL yang berisi air laut dan formalin 10%, kemudian disimpan dalam *cooler* berisi es selama transportasi untuk menjaga integritas biologis (Khuzma *et al.*, 2016).

Parameter kualitas perairan diukur secara triplikasi pada setiap stasiun menggunakan profiler CTD, mencatat suhu, salinitas, oksigen terlarut (DO), pH, kedalaman, dan kecerahan. Kecenderungan air ditentukan menggunakan *secchi disk*, dihitung sebagai rata-rata kedalaman hilang dan muncul kembali. Sampel air untuk analisis nutrisi diambil dalam botol PE 250 mL pada kedalaman sampling dan segera disimpan dengan *cool box*. Konsentrasi nitrat dan fosfat dianalisis di Balai Standarisasi dan Pelayanan Jasa Industri, Palembang, mengikuti protokol SNI 6989.79:2011 dan SNI 6989.31:2021.

Ekstraksi Zooxanthellae

Zooxanthellae diekstraksi dengan menghomogenisasi fragmen karang menggunakan mortar dan alu dalam larutan air laut-formalin asli. Homogenat dipindahkan ke tabung sentrifuge dan disentrifugasi pada 2500-3000 rpm selama 10 menit untuk memisahkan supernatan yang mengandung sel zooxanthellae (Lakastri *et al.*, 2018). Jumlah sel zooxanthellae dihitung menggunakan hemositometer di bawah mikroskop.

Perhitungan Kepadatan Zooxanthellae

Kepadatan dihitung menggunakan formula modifikasi Wickstead (1965):

$$D = \frac{q}{f \times v}$$

Dimana:

f (fraksi sampel) : $\frac{vs}{vt}$

Keterangan:

D : Kepadatan zooxanthellae (sel/cm²)

Analisa Data

Variabel penelitian diklasifikasikan menjadi: (1) variabel bebas (independent variables), yaitu parameter kualitas perairan meliputi suhu, salinitas, oksigen terlarut (DO), pH, kedalaman, kecerahan, nitrat, dan fosfat; serta (2) variabel terikat (dependent variable), yaitu kepadatan zooxanthellae (sel/cm²). Data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, diikuti dengan analisis deskriptif untuk mengidentifikasi pola variasi kepadatan zooxanthellae antar stasiun. *Principal Component Analysis* (PCA) dilakukan menggunakan perangkat lunak XLSTAT untuk menentukan hubungan antara parameter kualitas perairan dengan kepadatan zooxanthellae.

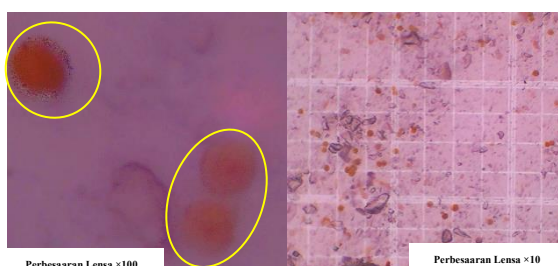
PCA mereduksi dimensi data sambil mempertahankan varians informasi maksimum, memungkinkan identifikasi faktor lingkungan utama yang mempengaruhi distribusi zooxanthellae (Dewanti *et al.*, 2018). Komponen utama yang diinterpretasikan adalah komponen dengan nilai eigen (eigenvalue) ≥ 1 (kriteria Kaiser), dan komponen yang dipilih harus mampu menjelaskan kumulatif varians $\geq 70\%$ dari total varians data. Seluruh variabel dinormalisasi sebelum analisis PCA untuk menghindari pengaruh perbedaan satuan pengukuran. Parameter kualitas perairan dibandingkan dengan standar baku mutu air laut untuk biota karang (Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021) dan standar konsentrasi nutrisi (Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004).

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Morfologi Zooxanthellae

Pemeriksaan mikroskopis mengungkapkan zooxanthellae sebagai alga dinoflagellata bersel tunggal dengan morfologi khas berbentuk bulat hingga oval dan berwarna coklat keemasan. Warna coklat keemasan berasal dari pigmen fotosintesis, terutama klorofil-a, klorofil-c2, dan peridinin yang berperan kunci dalam penangkapan energi cahaya untuk proses fotosintesis (Nangammada & Rajan, 2024). Sel yang diekstraksi menampilkan struktur yang utuh

dengan dinding sel dan sitoplasma yang terdefinisi mengandung kloroplas berwarna cokelat keemasan, mengindikasikan bahwa metode ekstraksi homogenisasi-sentrifugasi yang digunakan secara memadai menjaga integritas sel. Dari perspektif ekologis, kondisi morfologi sel yang baik ini mencerminkan status fisiologis simbiosis yang optimal, karena degradasi atau kontraksi sel zooxanthellae umumnya menjadi indikator awal stres karang mendahului terjadinya pemutihan (*bleaching*) (Mise & Hidaka, 2003). Temuan ini mengindikasikan bahwa karang yang dijadikan sampel belum mengalami gangguan fisiologis yang signifikan meskipun terpapar berbagai tingkatan tekanan antropogenik.



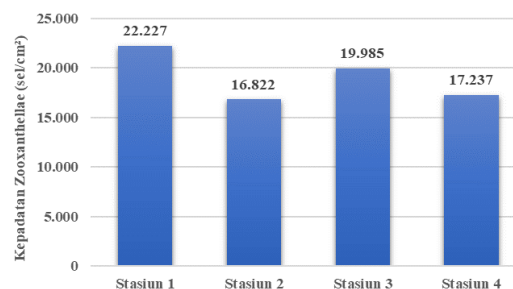
Gambar 2. Zooxanthellae Temuan

Karakteristik morfologi yang diamati selaras dengan deskripsi zooxanthellae pada karang branching dari berbagai lokasi tropis, termasuk yang dilaporkan oleh Mise & Hidaka (2003) untuk *Acropora nasuta* di Okinawa, yang menunjukkan sel berbentuk bulat dengan warna cokelat khas dan organisasi seluler yang terlihat jelas. Berdasarkan klasifikasi ini, mayoritas zooxanthellae yang ditemukan di seluruh stasiun dikategorikan sebagai zooxanthellae sehat dengan warna cokelat khas dan struktur sel yang utuh, mengindikasikan bahwa karang yang dijadikan sampel berada dalam kondisi baik.

Distribusi Kepadatan Zooxanthellae

Kepadatan zooxanthellae pada karang *branching* di Pulau Pahawang berkisar antara 16.822 hingga 22.227 sel/cm² ($1,68 \times 10^4$ hingga $2,22 \times 10^4$ sel/cm²). Kepadatan tertinggi tercatat di Stasiun 1 (kawasan dermaga) sebesar 22.227 sel/cm², diikuti oleh Stasiun 3 (kawasan rekreasi) sebesar 19.985 sel/cm², Stasiun 4 (kawasan alami) sebesar 17.237 sel/cm², dan terendah di Stasiun 2 (kawasan keramba jaring apung) sebesar 16.822 sel/cm². Pola distribusi ini menunjukkan temuan yang menarik dimana stasiun yang mengalami tekanan antropogenik tinggi seperti kawasan dermaga justru mempertahankan kepadatan zooxanthellae tertinggi, sementara stasiun kontrol

di kawasan alami tidak menunjukkan kepadatan maksimum yang diharapkan.



Gambar 3. Kepadatan Zooxanthellae

Kepadatan zooxanthellae yang tinggi di Stasiun 1 dapat dikaitkan dengan peningkatan sirkulasi air dari lalu lintas kapal, yang mengoptimalkan pasokan nutrisi untuk fotosintesis zooxanthellae tanpa menyebabkan eutrofikasi. Selain itu, kedalaman sampling yang sedang (3,20 m) memberikan kondisi cahaya optimal tidak terlalu dangkal sehingga menyebabkan stres fotoinhibisi maupun terlalu dalam sehingga membatasi ketersediaan cahaya (Zhao *et al.*, 2024). Kepadatan yang relatif tinggi di Stasiun 3 meskipun mengalami tekanan wisata mengindikasikan bahwa karang tidak dalam kondisi stres yang signifikan yang mempengaruhi kualitas zooxanthellae. Stabilitas ini kemungkinan dihasilkan dari kedalaman yang lebih dangkal (2,30 m) dengan kecerahan 2 m, menyediakan cahaya yang memadai dan konsisten untuk fotosintesis zooxanthellae.

Kepadatan terendah di Stasiun 2 mungkin terkait dengan kedalaman sampling yang paling dalam (4,10 m), yang mengurangi intensitas cahaya yang mencapai zooxanthellae, sehingga membatasi laju fotosintesis dan pada akhirnya mempengaruhi kepadatan zooxanthellae dalam jaringan karang. Penelitian oleh Lakastri *et al.* (2018) menunjukkan bahwa kedalaman berpengaruh signifikan terhadap kepadatan zooxanthellae, dimana karang pada kedalaman yang lebih besar cenderung meningkatkan kepadatan zooxanthellae untuk mengoptimalkan fotosintesis; namun, terdapat ambang batas dimana peningkatan kepadatan menjadi tidak efektif jika intensitas cahaya terlalu rendah. Kepadatan sedang di Stasiun 4 (kawasan alami), meskipun merupakan stasiun paling dangkal (2,20 m) dengan kecerahan 2 m, mungkin dihasilkan dari intensitas cahaya yang berlebihan menyebabkan stres oksidatif melalui fotoinhibisi.

Tabel 2. Komparasi Penelitian Terdahulu

Penelitian	Lokasi	Kisaran Kepadatan (sel/cm ²)
Lakastri <i>et al.</i> (2018)	Pulau Cemara Kecil, Karimunjawa	1.2×10 ⁴ - 2.5×10 ⁴
Khuzma <i>et al.</i> (2016)	Pulau Pari, Kepulauan Seribu	1.5×10 ⁴ - 3.0×10 ⁴
Xu <i>et al.</i> (2024)	South China Sea	1.0×10 ⁶ - 2.5×10 ⁶
Neely <i>et al.</i> (2024)	Florida Keys, USA	<i>Healthy</i> (1.5×10 ⁶ - 3.0×10 ⁶) <i>Heat Strees</i> (< 1.0×10 ⁶)

Zhao *et al.* (2024) menunjukkan bahwa karang di perairan dangkal biasanya mempertahankan kepadatan zooxanthellae yang lebih rendah sebagai adaptasi terhadap intensitas cahaya yang tinggi. Secara ekologis, kondisi kepadatan zooxanthellae yang terjaga di atas ambang batas di seluruh stasiun memiliki implikasi penting: Baird & Marshall (2002) mendokumentasikan bahwa penurunan drastis kepadatan zooxanthellae akibat *bleaching* pada karang *Great Barrier Reef* berkorelasi langsung dengan peningkatan mortalitas, penurunan laju pertumbuhan kerangka, dan penghambatan reproduksi sehingga kondisi kepadatan yang terpelihara di Pulau Pahawang mengindikasikan kapasitas pemulihan terumbu yang memadai apabila terjadi tekanan termal mendadak di masa mendatang.

Analisis komparatif dengan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kepadatan zooxanthellae di Pulau Pahawang berada dalam kisaran normal untuk karang branching di perairan tropis. Studi di Indonesia melaporkan kepadatan dalam orde 10⁴ sel/cm², sementara studi internasional melaporkan kepadatan dalam orde 10⁶ sel/cm². Perbedaan signifikan dalam besaran kepadatan ini kemungkinan berasal dari variasi metodologi dalam perhitungan, ukuran sampel, metode ekstraksi, dan pendekatan pengukuran luas permukaan karang. Penelitian oleh Lakastri *et al.* (2018) di Pulau Cemara Kecil, Karimunjawa, melaporkan kisaran kepadatan yang sangat mirip (1,2×10⁴ - 2,5×10⁴ sel/cm²), demikian pula dengan temuan Khuzma *et al.* (2016) di Pulau Pari (1,5×10⁴ - 3,0×10⁴ sel/cm²), mengindikasikan bahwa karang branching di perairan Indonesia umumnya mempertahankan kepadatan zooxanthellae dalam kisaran 10⁴

sel/cm². Konsistensi ini menunjukkan kondisi simbiosis yang sehat di Pulau Pahawang.

Parameter Kualitas Perairan

Parameter kualitas perairan yang diukur di empat stasiun penelitian menunjukkan kondisi yang relatif stabil dan sesuai untuk ekosistem terumbu karang. Suhu berkisar dari 29,9°C hingga 30,0°C, berada dalam kisaran optimal untuk pertumbuhan karang (28-32°C) sebagaimana ditentukan dalam standar baku mutu air laut untuk biota karang (Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021). Variasi suhu minimal (hanya 0,1°C) mengindikasikan stabilitas termal dan tidak adanya stres termal yang signifikan yang dapat memicu pelepasan zooxanthellae. Xu *et al.* (2020) menekankan bahwa suhu adalah faktor kritis yang mempengaruhi laju metabolisme karang dan aktivitas fotosintesis zooxanthellae, dengan suhu yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan stres termal yang mengarah pada *bleaching*

Tabel 3. Parameter Kualitas Perairan

Parameter	Stasiun			
	1	2	3	4
Suhu (°C)	29,9	30,0	30,0	29,9
Salinitas (psu)	32,1	32,1	32,0	32,0
DO (mg/l)	6,3	6,1	6,4	5,5
pH	7,9	7,8	7,9	7,9
Kedalaman (m)	3,20	4,10	2,30	2,20
Kecerahan (m)	2,75	3	2	2
Nitrat (mg/l)	< 0,045	< 0,045	0,1	< 0,045
Fosfat (mg/l)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02

Salinitas menunjukkan stabilitas tinggi berkisar dari 32,0 hingga 32,1 psu, sedikit di bawah kisaran optimal (33–34 ppt) namun masih dalam batas toleransi karang. Stabilitas salinitas ini mengindikasikan bahwa perairan Pulau Pahawang sedikit sekali dipengaruhi oleh masukan air tawar yang dapat menyebabkan stres osmotik pada karang dan mempengaruhi stabilitas membran sel zooxanthellae (Patty & Akbar, 2020). Salinitas yang stabil ini berinteraksi sinergis dengan pH (7,8–7,9) dalam mempertahankan keseimbangan sistem karbonat perairan yang diperlukan bagi proses kalsifikasi kerangka CaCO₃ karang dan efisiensi fotosintesis zooxanthellae. Secara fisiologis, kestabilan kedua parameter ini memastikan bahwa membran sel zooxanthellae tidak mengalami stres osmotik yang dapat mengganggu transfer energi ke inang

karang (Sheppard *et al.*, 2018). Konsentrasi oksigen terlarut (DO) berkisar dari 5,5 hingga 6,4 mg/L, semuanya melebihi standar minimum (>5 mg/L). DO bukan sekadar indikator kualitas air, melainkan berperan langsung dalam metabolisme aerobik zooxanthellae: pada kondisi hipoksia, efisiensi fotosintesis dan respirasi mitokondria simbiosis menurun, yang berujung pada penurunan transfer karbon fotosintat ke jaringan karang dan pelemahan ikatan simbiosis (Suggett *et al.*, 2021). Kondisi DO tertinggi di Stasiun 3 (6,4 mg/L) dan terendah di Stasiun 4 (5,5 mg/L) mengindikasikan bahwa sirkulasi air yang lebih aktif di kawasan wisata justru berkontribusi pada aerasi yang lebih baik—sebuah mekanisme yang menjelaskan mengapa tekanan wisata tidak selalu berkorelasi negatif dengan kepadatan zooxanthellae.

Nilai pH berkisar dari 7,8 hingga 7,9, berada dalam kisaran optimal (7-8,5) dan mendukung proses kalsifikasi karang dalam membentuk kerangka kalsium karbonat (CaCO₃) serta efisiensi fotosintesis zooxanthellae (Xu *et al.*, 2020). pH yang sedikit lebih rendah di Stasiun 2 (7,8) mungkin dipengaruhi oleh aktivitas budidaya perikanan di keramba jaring apung, dimana respirasi ikan dan dekomposisi sisa pakan menghasilkan CO₂ yang meningkatkan keasaman air. Namun demikian, penurunan pH ini tetap dalam batas toleransi karang dan tidak mengindikasikan pengasaman yang signifikan. Kecerahan air (2,0–3,0 m) dan kedalaman sampling (2,20–4,10 m) harus diinterpretasikan secara bersama sebagai satu kesatuan yang terkait dengan cahaya: kombinasi kedalaman dan kecerahan pada setiap stasiun menentukan fluks foton yang diterima zooxanthellae, yang secara langsung mengatur laju fiksasi karbon melalui reaksi fotokimia siklus Calvin. Interaksi dua variabel ini, bukan masing-masing secara mandiri menjelaskan mengapa kepadatan zooxanthellae tidak berbanding lurus dengan kecerahan maupun kedalaman secara individual (Suggett *et al.*, 2021), melainkan merupakan respons adaptif terhadap cahaya yang tersedia di setiap kedalaman.

Konsentrasi nitrat sangat rendah, dengan tiga stasiun menunjukkan nilai di bawah batas deteksi (<0,045 mg/L), sementara Stasiun 3 (kawasan rekreasi) menunjukkan konsentrasi yang sedikit lebih tinggi (0,1 mg/L), melebihi standar optimal (0,008 mg/L). Peningkatan nitrat ini kemungkinan dihasilkan dari aktivitas wisata tinggi yang menghasilkan limbah organik. Namun, konsentrasi 0,1 mg/L masih relatif rendah dan tidak mengindikasikan kondisi eutrofikasi yang dapat membahayakan ekosistem

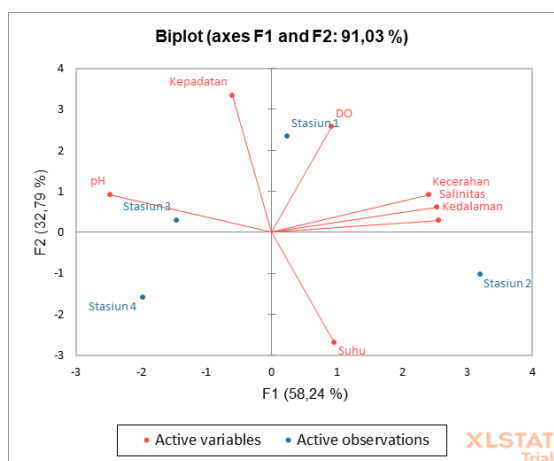
terumbu karang. Konsentrasi fosfat di semua stasiun sangat rendah (<0,02 mg/L), sedikit di atas standar optimal (0,015 mg/L), namun dengan perbedaan minimal dan masih dalam kategori aman. Konsentrasi nitrat dan fosfat yang cukup rendah mengindikasikan bahwa perairan Pulau Pahawang belum mengalami eutrofikasi dan tetap sesuai sebagai habitat terumbu karang dan zooxanthellae. Di luar nutrisi anorganik, aktivitas wisata bahari di Stasiun 3 berpotensi membawa kontaminan kimia dari produk tabir surya yang digunakan pengunjung ke badan perairan. Senyawa UV-filter seperti oxybenzone (benzophenone-3) yang umum terkandung dalam tabir surya terbukti menginduksi *bleaching*, deformasi larva planula, dan gangguan reproduksi karang bahkan pada konsentrasi serendah 62 ppb (Downs *et al.*, 2016). Risiko ini perlu dipertimbangkan dalam pengelolaan kawasan wisata Pulau Pahawang meskipun analisis kontaminan organik di luar lingkup penelitian ini. Secara sintesis, keenam parameter yang diukur (suhu, salinitas, DO, pH, kedalaman, kecerahan) membentuk matriks kondisi perairan yang saling mempengaruhi: stabilnya suhu-salinitas-pH mengeliminasi stres abiotik kronik sebagai faktor pembatas, DO yang memadai memastikan metabolisme simbiosis tetap optimal, sementara kombinasi kedalaman-kecerahan menjadi penentu utama kepadatan zooxanthellae melalui modulasi rejim cahaya yang tersedia untuk fotosintesis.

Analisis Korelasi

Principal Component Analysis (PCA) mengungkapkan bahwa dua komponen utama (F1 dan F2) dengan nilai eigen ≥ 1 mampu menjelaskan sebagian besar variasi data (diperkirakan >70% kumulatif varians berdasarkan distribusi eigenvalue), memberikan wawasan representatif tentang hubungan antara parameter kualitas perairan dan kepadatan zooxanthellae pada karang *branching* di Pulau Pahawang. Komponen utama pertama (F1) dicirikan oleh kontribusi yang relatif kuat dari parameter fisika perairan, terutama kedalaman, salinitas, suhu, dan kecerahan, merepresentasikan gradien fisik perairan yang berkaitan dengan karakteristik massa air dan kondisi pencahayaan. Komponen utama kedua (F2) lebih dipengaruhi oleh parameter oksigen terlarut (DO) dan kepadatan zooxanthellae.

Arah vektor kepadatan zooxanthellae yang searah dengan DO menunjukkan adanya korelasi positif antara kedua parameter tersebut,

mengindikasikan bahwa perairan dengan konsentrasi oksigen terlarut yang lebih tinggi cenderung mendukung kepadatan zooxanthellae yang lebih besar. Kondisi DO yang memadai mencerminkan perairan yang relatif stabil yang mendukung proses metabolisme karang dan zooxanthellae yang optimal.



Gambar 4. *Principal Component Analysis*

Stasiun 1 (kawasan dermaga) menunjukkan skor F2 positif yang tinggi dan asosiasi kuat dengan variabel kepadatan zooxanthellae dan DO, menjelaskan mengapa stasiun ini menunjukkan kepadatan zooxanthellae tertinggi meskipun berada di kawasan dengan aktivitas antropogenik yang cukup intens. Aktivitas transportasi maritim di kawasan dermaga diduga meningkatkan dinamika perairan dan sirkulasi oksigen, sehingga masih mampu menciptakan kondisi yang mendukung keberlangsungan zooxanthellae dalam jaringan karang.

Stasiun 2 (kawasan keramba jaring apung) menampilkan skor positif yang tinggi pada F1, mengindikasikan bahwa stasiun ini sangat dipengaruhi oleh faktor kedalaman dan kecerahan yang lebih besar dibandingkan stasiun lainnya. Hal ini sejalan dengan pengukuran lapangan yang menunjukkan bahwa stasiun keramba jaring apung memiliki kedalaman paling besar dan kecerahan yang relatif tinggi, sehingga membentuk karakter lingkungan yang berbeda dari stasiun lain. Kondisi ini menciptakan penetrasi cahaya yang unik yang mungkin membatasi intensitas cahaya optimal untuk fotosintesis zooxanthellae, berpotensi menjelaskan kepadatan zooxanthellae yang lebih rendah di stasiun ini.

Stasiun 3 (kawasan rekreasi) menunjukkan kondisi lingkungan yang relatif mendekati rata-rata dibandingkan stasiun lainnya,

menampilkan asosiasi lemah hingga sedang dengan beberapa parameter termasuk pH. Posisi ini mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan di kawasan rekreasi bersifat transisi, dimana pengaruh faktor fisika dan kimia tidak terlalu dominan secara individual. Kepadatan zooxanthellae di stasiun ini berada pada kisaran menengah, mencerminkan kondisi perairan yang cukup mendukung simbiosis karang-zooxanthellae meskipun mengalami tekanan aktivitas wisata.

Stasiun 4 (kawasan alami) menampilkan skor negatif pada F2 dan tidak menunjukkan keterkaitan kuat dengan variabel kepadatan zooxanthellae maupun nutrisi. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi perairan yang relatif alami dan stabil, kepadatan zooxanthellae tidak selalu mencapai nilai tertinggi. Kondisi perairan yang sangat dangkal dengan kecerahan relatif rendah diduga menyebabkan intensitas cahaya yang kurang optimal atau fluktuasi cahaya yang tinggi, sehingga zooxanthellae mempertahankan kepadatan yang lebih rendah sebagai bentuk adaptasi fisiologis.

Parameter suhu, pH, dan salinitas menunjukkan kontribusi yang relatif kecil dalam membentuk pemisahan stasiun pada PCA, disebabkan oleh variasi ketiga parameter tersebut yang tidak signifikan antar stasiun, sehingga tidak menjadi faktor pembatas utama bagi kepadatan zooxanthellae di perairan Pulau Pahawang. Kondisi ini mengindikasikan bahwa secara umum kualitas perairan masih berada dalam kisaran yang mendukung kehidupan karang dan zooxanthellae. Hasil PCA mengkonfirmasi bahwa oksigen terlarut, kedalaman, dan kecerahan merupakan faktor lingkungan utama yang mempengaruhi distribusi kepadatan zooxanthellae di lokasi studi, sementara suhu, pH, dan salinitas mempertahankan kondisi yang stabil dan optimal di seluruh stasiun.

Kesimpulan

Kepadatan zooxanthellae pada karang simbiosis tipe *branching* di perairan Pulau Pahawang berkisar antara 16.822 hingga 22.227 sel/cm², berada dalam kisaran normal untuk karang *branching* di perairan tropis dan mengindikasikan status simbiosis yang masih sehat di seluruh lokasi penelitian, terlepas dari perbedaan intensitas tekanan antropogenik. Pola distribusi kepadatan yang tidak selalu berkorelasi linear dengan tingkat gangguan manusia menunjukkan bahwa respons fisiologis karang

terhadap tekanan lingkungan bersifat multifaktorial. Analisis *Principal Component Analysis* mengungkapkan bahwa faktor hidrodinamik, khususnya oksigen terlarut dan kondisi pencahayaan yang dipengaruhi oleh kedalaman dan kecerahan perairan, merupakan penentu utama variasi kepadatan zooxanthellae di perairan Pulau Pahawang. Sebaliknya, parameter termal, kimiawi, dan nutrisi berada pada kondisi yang relatif stabil dan mendukung kehidupan karang secara keseluruhan. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya menjaga kualitas hidrodinamik perairan sebagai prioritas utama dalam pengelolaan ekosistem terumbu karang. Secara aplikatif, pengelola kawasan disarankan untuk menerapkan sistem zonasi wisata bahari yang membatasi kepadatan aktivitas di sekitar dermaga, memberlakukan regulasi budidaya perikanan berbasis daya dukung ekosistem, serta melembagakan program pemantauan berkala terhadap parameter oksigen terlarut dan kecerahan perairan sebagai indikator kesehatan terumbu karang untuk mendukung pengembangan ekowisata yang berkelanjutan di Pulau Pahawang. Data kepadatan zooxanthellae baseline yang dihasilkan penelitian ini juga dapat dimanfaatkan sebagai fondasi ilmiah untuk program restorasi aktif terumbu karang seperti transplantasi fragmen dan coral gardening; efektivitas program semacam itu sangat bergantung pada ketersediaan data fisiologis koloni donor yang memadai agar seleksi fragmen berbasis kesehatan simbiosis dapat dilakukan (Rinkevich, 2014).

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang tulus kepada pembimbing penelitian yang telah memberikan bimbingan dan masukan selama pelaksanaan studi. Apresiasi juga disampaikan kepada Jurusan Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, atas dukungan fasilitas laboratorium, serta kepada semua pihak yang membantu dalam pengumpulan data lapangan dan analisis laboratorium.

Referensi

Akbar, A., Mayaguezz, H., & Susanti, O. (2025). Struktur komunitas karang dan ikan karang di perairan Pulau Pahawang. *Marine Research*, 14(2), 234–253. <https://doi.org/10.14710/jmr.v14i2.46185>

- Baird, A. H., & Marshall, P. A. (2002). Mortality, growth and reproduction in scleractinian corals following bleaching on the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series*, 237, 133–141. <https://doi.org/10.3354/meps237133>
- Dewanti, L. P. H., Putra, I. D. N. N., & Faiqoh, E. (2018). Hubungan kelimpahan dan keanekaragaman fitoplankton dengan kelimpahan dan keanekaragaman zooplankton di Perairan Pulau Serangan, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 4(2), 324–335. <https://doi.org/10.24843/jmas.2018.v4.i02.324-335>
- Downs, C. A., Kramarsky-Winter, E., Segal, R., Fauth, J., Knutson, S., Bronstein, O., Ciner, F. R., Jeger, R., Lichtenfeld, Y., Woodley, C. M., Pennington, P., Cadenas, K., Kushmaro, A., & Loya, Y. (2016). Toxicopathological effects of the sunscreen UV filter, oxybenzone (benzophenone-3), on coral planulae and cultured primary cells and its environmental contamination in Hawaii and the US Virgin Islands. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(2), 265–288. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0227-7>
- Fu, Y., Chen, X., Liu, Y., Li, Y., & Yu, K. (2024). The effects of atmospheric nitrogen deposition in coral-algal phase shifts on remote coral reefs. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1214449. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1214449>
- 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(7656), 82–90. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- Khuzma, N. L., Suryanto, A., & Purnomo, P. W. (2016). Hubungan kandungan nitrat dengan densitas zooxanthellae pada beberapa jenis karang di reef flat Pulau Pari Kepulauan Seribu Jakarta. *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, 5(4), 293–301. <https://doi.org/10.14710/marj.v5i4.14423>
- Lakastri, L., Purnomo, P. W., & Muskananfolo, M. R. (2018). Pengaruh kedalaman

- terhadap produktivitas primer dan densitas zooxanthellae pada karang dominan di Pulau Cemara Kecil, Karimunjawa. *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, 7(4), 440–446. <https://doi.org/10.14710/marj.v7i4.22667>
- LaJeunesse, T. C., Parkinson, J. E., Gabrielson, P. W., Jeong, H. J., Reimer, J. D., Voolstra, C. R., & Santos, S. R. (2018). Systematic revision of Symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. *Current Biology*, 28(16), 2570–2580. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.07.008>
- Mise, T., & Hidaka, M. (2003). Degradation of zooxanthellae in the coral *Acropora nasuta* during bleaching. *Galaxea: Journal of Coral Reef Studies*, 5(1), 33–39. <https://doi.org/10.3755/jcrs.2003.33>
- Nangammada, S., & Rajan, R. (2024). Insights into zooxanthellae densities in corals *Porites lutea* and *Pocillopora meandrina* in Lakshadweep atolls. *Regional Studies in Marine Science*, 71, 103417. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103417>
- Neely, K. L., Nowicki, R. J., Dobler, M. A., Chaparro, A. A., Miller, S. M., & Toth, K. A. (2024). Too hot to handle? the impact of the 2023 marine heatwave on Florida Keys coral. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1489273. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1489273>
- Novriadi, Darmawan, A., Maretta, G., Prasetyo, B. A., Nurhayu, W., Gurning, A. R., Afrizal, M., & Malik, M. A. (2024). Life form identification of coral reef and genera in Pahawang Island to support ecosystem rehabilitation. *Advances in Biological Sciences Research*, 39, 113–121. <https://doi.org/10.2991/absr.k.240808.015>
- Panalaran, S., & Pamungkas, R. J. (2024). Analisis kesesuaian wisata di Pulau Pahawang, Kabupaten Pesawaran berdasarkan parameter oseanografi. *Kelautan Tropis*, 27(2), 269–276. <https://doi.org/10.14710/jkt.v27i2.22438>
- Patty, S. I., & Akbar, N. (2020). Kondisi suhu, salinitas, pH dan oksigen terlarut di perairan terumbu karang Ternate, Tidore dan sekitarnya. *Jurnal Ilmu Kelautan Kepulauan*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.33387/jikk.v1i2.891>
- Rakhmawati, I., Maulina, D., & Lengkana, D. (2022). Identification of coral reef cover and invertebrate diversity in Pahawang Island Lampung Indonesia. *Biological Environment and Pollution*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.31763/bioenvipo.v2i1.561>
- Republik Indonesia. (2004). Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang baku mutu air laut. Kementerian Lingkungan Hidup.
- Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, Lampiran VIII: Baku mutu air laut. Sekretariat Negara.
- Rinkevich, B. (2014). Rebuilding coral reefs: Does active reef restoration lead to sustainable reefs? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.018>
- Sheppard, C. R. C., Davy, S. K., Pilling, G. M., & Graham, N. A. J. (2018). *The biology of coral reefs* (2nd ed.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198787341.001.0001>
- Suggett, D. J., Smith, D. J., Bindley, K., & Warner, M. E. (2021). Coral photophysiology and photoacclimation: Linking symbiont state to reef vitality. *Annual Review of Marine Science*, 13, 371–400. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-012120-035502>
- Torres, A. F., Valino, D. A. M., & Ravago-Gotanco, R. (2021). Zooxanthellae diversity and coral-symbiont associations in the Philippine archipelago: Specificity and adaptability across thermal gradients. *Frontiers in Marine Science*, 8, 731023. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.731023>
- Voolstra, C. R., & Ziegler, M. (2020). Adapting with microbial help: Microbiome flexibility facilitates rapid responses to environmental change in reef-building corals. *BioEssays*, 42(7), 2000018. <https://doi.org/10.1002/bies.202000018>
- Wickstead, J. H. (1965). *An introduction to the study of tropical plankton*. Hutchinson Tropical Monographs.
- Xu, H., Feng, B., Xie, M., Ren, Y., Xia, J., Zhang, Y., & Li, X. (2020). Physiological

characteristics and environment adaptability of reef-building corals at the Wuzhizhou Island of South China Sea. *Frontiers in Physiology*, 11, 390. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00390>
Zhao, H., Zhang, J., Yang, H., Li, Y., Liu, X., Liu, Y., & Li, X. (2024). Coral reefs at Qiziwan

National Marine Park in 2023: Spatial variability and their relationship with environmental factors. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1407803. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1407803>