

Penilaian Potensi Resiliensi Relatif Terumbu Karang di Perairan Sekitar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton, Kabupaten Probolinggo

Berlania Mahardika Putri¹, Bachtiar W. Mutaqin^{2,3*}, dan Priyaji Agung Pambudi¹

¹Magister Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

²Coastal and Watershed Research Group, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia; email: mutaqin@ugm.ac.id

³Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin, China

ABSTRAK

Penelitian ini menilai potensi resiliensi relatif terumbu karang di perairan sekitar PLTU Paiton, Kabupaten Probolinggo berdasarkan data lapangan pada hari survei di empat stasiun: Mercusuar (MR), Water Intake (WI), *Water Discharge* Timur (WDT), dan *Water Discharge* Barat (WDB). Sebanyak 12 indikator biotik-abiotik dikumpulkan menggunakan *Underwater Photo Transect* (70 m), *Underwater Visual Census* (70 m), *Belt Transect* (70 m), serta pengukuran suhu permukaan. Indikator yang didapatkan kemudian dilakukan indeks komposit untuk membandingkan nilai resiliensi relatif antar stasiun dengan pembobotan yang sama. Hasil menunjukkan MR memiliki resiliensi relatif tertinggi (Final = 1,000; kategori *medium-high*) yang ditopang fungsi herbivori kuat; diikuti WI (0,926; *medium-high*) didukung tutupan karang dan proporsi karang resisten yang tinggi. Stasiun *discharge* lebih rendah, terutama WDT (0,315; *low*) dan WDB (0,741; *medium-low*), ditandai pelemahan herbivori dan tekanan gangguan/kompetisi yang lebih besar. Perbedaan suhu menunjukkan stasiun *discharge* lebih hangat daripada stasiun kontrol. Studi ini memberikan nilai yang merupakan perbandingan internal antar stasiun, sehingga tidak menginterpretasikan kategori mutu ekologis secara absolut. Hasil ini memberikan gambaran awal mengenai indikator yang dapat menjadi prioritas untuk pemantauan resiliensi terumbu karang di sekitar PLTU Paiton.

Kata kunci: potensi resiliensi relatif, stres termal, fungsi herbivori, gangguan kesehatan dan kompetisi, PLTU Paiton

ABSTRACT

This study developed a snapshot resilience profile of reefs near the Paiton coal-fired power plant using field data collected on a single survey occasion at four stations: Lighthouse (MR), Water Intake (WI), East *Discharge* (WDT), and West *Discharge* (WDB). Twelve biotic-abiotic indicators were measured using a 70-m underwater photo transect, 70-m *Underwater Visual Census*, 70-m *Belt Transect*, and in situ surface temperature measurements. Indicator scores were calculated to compare stations using equal weighting. Results showed the highest relative resilience potential at MR (Final = 1.000; high category) which was characterized by strong herbivory function, followed by WI (0.926; medium-high), supported by high coral cover and a high proportion of stress-tolerant corals. *Discharge* stations displayed lower relative resilience potential, particularly WDT (0.315; low) and WDB (0.741; medium-low), associated with weakened herbivory and higher disturbance and competition signals. Surface temperature patterns indicated warmer conditions at *discharge* stations relative to control sites. These findings provide an initial, site-specific identification of limiting indicators to inform monitoring priorities. These findings provide an initial profile of indicators that may be prioritized for further monitoring of coral reef resilience around the Paiton power plant.

Keywords: relative resilience potential, thermal stress, herbivore function, health and competition, Paiton Powerplant

Citation: Putri, B., M., Mutaqin, B., W., dan Pambudi., P., A. (2026). Penilaian Potensi Resiliensi Relatif Terumbu Karang di Perairan Sekitar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton, Kabupaten Probolinggo. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(4), 938-947, doi:10.14710/jil.24.4.938-947

1. PENDAHULUAN

Resiliensi menentukan kemampuan sistem untuk menahan gangguan, pulih, dan tetap mempertahankan fungsi pada kondisi tekanan meningkat. Secara konseptual, resiliensi juga

dipahami sebagai konsep yang beragam definisi dan metriknya, sehingga pengukuran yang kuat biasanya menggabungkan beberapa indikator dan membedakan resiliensi sebagai kemampuan pulih secara cepat (*engineering resilience*) dan kemampuan

menghindari pergeseran dominansi suatu taksa (*ecological resilience*) (Chambers *et al.*, 2020; Dakos & Kéfi, 2022; O'Leary *et al.*, 2017). Dalam konteks terumbu, resiliensi biasanya digambarkan oleh pergeseran rezim dari dominasi karang ke dominasi makroalga setelah gangguan (*algae-phase shift*) (Bellwood *et al.*, 2004), dengan dua komponen kunci berupa resistensi (kemampuan menahan dampak) dan pemulihan (kecepatan kembali ke kondisi semula) (McClanahan *et al.*, 2012). Penilaian dengan multi-indikator telah diterapkan pada berbagai skala, termasuk pada terumbu karang di Indonesia (Bachtar *et al.*, 2011). Indikator yang sering dikaitkan dengan potensi resiliensi mencakup kondisi komunitas karang, rekrutmen, fungsi herbivori, tekanan penyakit, kompetisi alga, kondisi kesesuaian substrat, serta kondisi lingkungan (Maynard *et al.*, 2015, 2017). Kondisi ekosistem karang yang diamati dalam satu waktu belum secara langsung mengukur resiliensi aktual, namun dapat menggambarkan potensi resiliensi relatif ketika diukur bersama indikator lainnya.

Perairan sekitar PLTU Paiton telah menjadi lokasi sejumlah penelitian untuk menilai komponen ekologis dan lingkungan termasuk pemutihan karang, penyakit karang, suhu perairan, kondisi terumbu karang setelah dan sesudah pemutihan, serta monitoring komunitas ikan karang (Indra, 2016; Jaelani & Afifi, 2016; Kristian, 2019; Muchlisin, 2015; Muzaki & Saptarini, 2012; Riznawati, 2015). Namun, informasi tersebut belum secara langsung memberikan perbandingan terintegrasi mengenai indikator pendukung atau pembatas resiliensi pada lokasi penelitian.

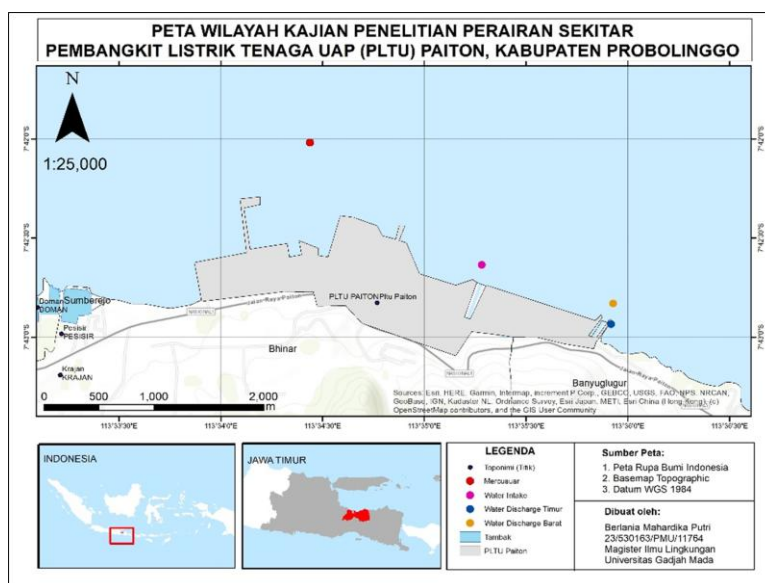
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengisi kesenjangan dengan mengintegrasikan 12 indikator ke dalam lima kelompok penilaian yaitu:

kondisi karang, fungsi herbivori, gangguan dan kompetisi, kesesuaian substrat, dan kondisi lingkungan. Pertanyaan penelitian dalam studi ini adalah: (1) bagaimana variasi 12 indikator potensi resiliensi antar stasiun di sekitar PLTU Paiton? dan (2) bagaimana peringkat potensi resiliensi relatif berdasarkan indeks komposit? Tujuan penelitian yaitu mendeskripsikan variasi indikator potensi resiliensi pada keempat stasiun serta menyusun peringkat potensi resiliensi relatif antar stasiun melalui indeks komposit. Sehingga dari hasil tersebut dapat melihat profil indikator setiap stasiun dan urutan potensi resiliensi relatif. Batasan penelitian ini adalah tidak menguji pengaruh sebab-akibat air bahang PLTU dikarenakan penelitian bersifat satu waktu dan tidak mencakup pengendalian seluruh faktor lingkungan yang dapat berbeda antar stasiun.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan 17-22 Agustus 2025 di empat stasiun sekitar perairan PLTU Paiton mencakup Mercusuar (MR), *Water Intake* (WI), *Water Discharge* Timur (WDT) dan *Water Discharge* Barat (WDB). Survei dilakukan pada kedalaman 5-6 m. MR diposisikan sebagai stasiun pembanding yang tidak berada langsung pada struktur bangunan PLTU; WI merupakan stasiun *intake*, sedangkan WDT dan WDB merupakan stasiun terkait dengan pembuangan air bahang/*discharge*. Pengelompokan tersebut digunakan untuk menjelaskan posisi stasiun terhadap infrastruktur. Batasan penelitian ini tidak menjelaskan luas plume termal, arah hidrodinamika, dan durasi paparan air bahang. Koordinat stasiun ditunjukkan pada Tabel 1 dan lokasi penelitian pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Tabel 1. Titik Koordinat Pengambilan Data

Stasiun Penelitian	X	Y
Mercusuar	113.573424	-7.700553
Water Intake	113.586837	-7.711675
Water Discharge Timur	113.598795	-7.716052
Water Discharge Barat	113.596571	-7.714675

2.2. Pengumpulan Data

Sebanyak 12 indikator biotik-abiotik dikumpulkan pada empat stasiun menggunakan unit survei yang sama yaitu menggunakan satu jalur survei sepanjang 70 m. Indikator ini mewakili kondisi karang, fungsi herbivori, gangguan dan kompetisi, kesesuaian substrat, serta kondisi suhu sebagai stressor termal di lokasi penelitian. Metode setiap indikator dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Metode, Unit Sampel, Indikator, dan Satuan Pengukuran

Metode	Indikator	Satuan
Underwater Photo Transect (UPT) 1x1 m; 70 m; 70 foto per stasiun	Persentase tutupan karang	%
	Keanekaragaman karang	Indeks Shannon-Wiener
	Kepadatan rekrutmen	ind/m ²
	Prevalensi penyakit karang	%
	Persentase tutupan makroalga	%
	Spesies karang resisten	%
	Proporsi kesesuaian substrat	unitless
Underwater Visual Census (UVC) dengan transek garis sepanjang 70 m	Biomassa ikan herbivora	kg/ha
	Keanekaragaman ikan herbivora	Indeks Shannon-Wiener
Belt Transect dengan transek garis sepanjang 70 m	Biomassa makroinvertebrata herbivora	kg/ha
	Keanekaragaman makroinvertebrata herbivora	Indeks Shannon-Wiener
In-situ replikasi dengan pengulangan 3	Suhu permukaan laut saat survei	°C

2.3. Analisis Data Indikator

a. Indikator Berbasis Presentase (%)

Tutupan karang resisten, tutupan karang total, tutupan makroalga, dan kesesuaian substrat dihitung sebagai proporsi luas kategori terhadap total luas area yang dianalisis. Dengan L_i sebagai luas kategori i dan L_{total} sebagai total luas area pengamatan yang dihitung dengan Rumus 1:

$$P_i(\%) = \frac{\sum L_i}{\sum L_{total}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Prevalensi penyakit karang dihitung sebagai persentase koloni yang menunjukkan tanda penyakit terhadap seluruh koloni karang yang diamati yang dihitung menggunakan Rumus 2:

$$PP(\%) = \frac{\sum \text{Jumlah koloni sakit}}{\sum \text{Total koloni}} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

b. Indikator Berbasis Kepadatan

Kepadatan rekrutmen karang dihitung sebagai jumlah individu rekrutmen karang per luas area yang diamati, sebagaimana disajikan pada Rumus 3:

$$D (\text{ind}/\text{m}^2) = \frac{N_{\text{rekrut}}}{A} \dots \dots \dots (3)$$

c. Indikator Berbasis Keanekaragaman (H')

Keanekaragaman karang, ikan dan makroinvertebrata herbivora dihitung menggunakan persamaan dari Shannon-Wiener. Keterangan dalam Rumus 4 menerangkan bahwa p_i adalah proporsi individu takson i terhadap jumlah seluruh individu dan n adalah jumlah takson yang tercatat yang ditunjukkan pada Rumus 4:

$$H' = - \sum_{i=1}^n (P_i) \ln (P_i) \dots \dots \dots (4)$$

d. Indikator berbasis biomassa

Biomassa herbivora yang terdiri dari ikan dan makroinvertebrata (khusus *echinoidea*) dihitung menggunakan persamaan berat dengan Rumus 5 sebagai berikut:

$$W = aL^b \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan:

W = Berat (kg)

L = Panjang total per spesies

a dan b = Indeks spesifik spesies

Parameter L pada ikan herbivora adalah panjang total (cm) dengan nilai indeks spesifik spesies diperoleh dari FISHBASE (2000). Sedangkan, untuk *echinoidea* L merujuk pada *diameter test* (mm) dan nilai indeks spesifik mengacu pada pendekatan Burhanuddin *et al.* (2025). Kemudian perhitungan biomassa dilakukan dengan membagi dengan area unit sampling (Rumus 6).

$$\text{Biomassa} = \frac{W}{A} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

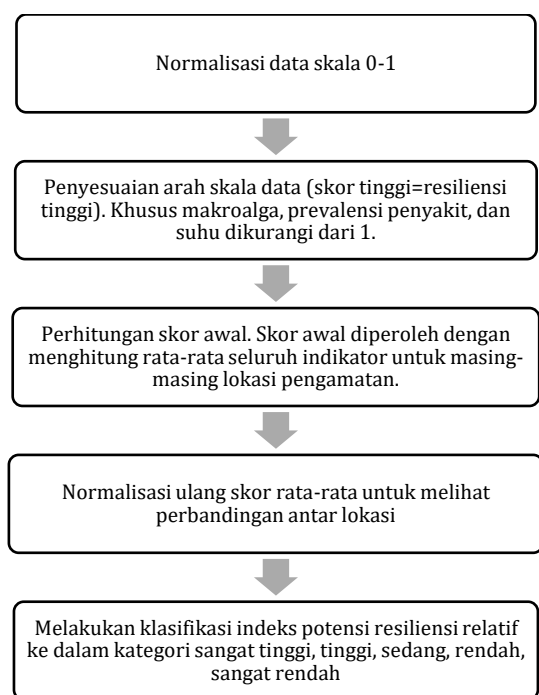
W = Biomassa per unit sampling

A = Area unit sampling

2.4. Perhitungan Indeks Potensi Resiliensi Relatif

Indeks komposit dihitung di Microsoft Excel dengan memodifikasi pendekatan penilaian resiliensi relatif yang mengacu pada Maynard *et al.* (2017). Setiap indikator dinormalisasi terhadap nilai maksimum dari empat stasiun dengan persamaan $N_{ij} = X_{ij}/X_{\text{max}}$. Indikator dengan hubungan negatif terhadap potensi resiliensi seperti prevalensi penyakit, tutupan makroalga, dan suhu, arah skor dibalik menggunakan persamaan $U_{ij} = 1 - N_{ij}$. Seluruh indikator diberi bobot yang sama, kemudian dirata-rata untuk mendapat skor komposit setiap stasiun. Skor potensi resiliensi relatif selanjutnya dibandingkan dengan nilai maksimum dari empat stasiun sehingga menghasilkan nilai 1,00 yang

menunjukkan skor relatif tertinggi di antara stasiun yang dibandingkan. Hasil indeks selanjutnya disajikan dalam bentuk skor dan peringkat relatif antar stasiun. Langkah-langkah perhitungan indeks ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perhitungan Skor Resiliensi Relatif

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Profil Indikator Resiliensi

Indikator resiliensi dalam penelitian ini terdiri dari profil kondisi karang, fungsi herbivori, gangguan kesehatan dan kompetisi, kesesuaian substrat dan profil distribusi suhu permukaan laut saat survei. Nilai pada hasil menggambarkan kondisi yang teramati dalam satu periode survei sehingga tidak diinterpretasikan sebagai laju perubahan dari waktu ke waktu.

3.1.1. Profil Karang

Profil biotik karang terdiri dari persentase karang resisten, persentase tutupan karang keseluruhan, keanekaragaman karang, dan kepadatan rekrutmen. Indikator ini penting untuk melihat *state* karang ketika penelitian. Distribusi indikator ditunjukkan pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3, stasiun *Water Intake* (WI) memiliki tutupan karang total tertinggi (79,18%) dan proporsi karang resisten tertinggi (65,70%), sedangkan nilai H' karang di WI relatif sedang (1,03), dan kepadatan rekrutmen yang cukup tinggi (0,60 ind/m²). Pola ini mengindikasikan bahwa nilai tinggi pada satu indikator tidak selalu diikuti oleh indikator lainnya, sehingga indikator tutupan,

keanekaragaman, dan rekrutmen perlu diperhatikan sebagai komponen yang saling melengkapi, bukan hanya sebagai ukuran kondisi terumbu karang yang berdiri sendiri,

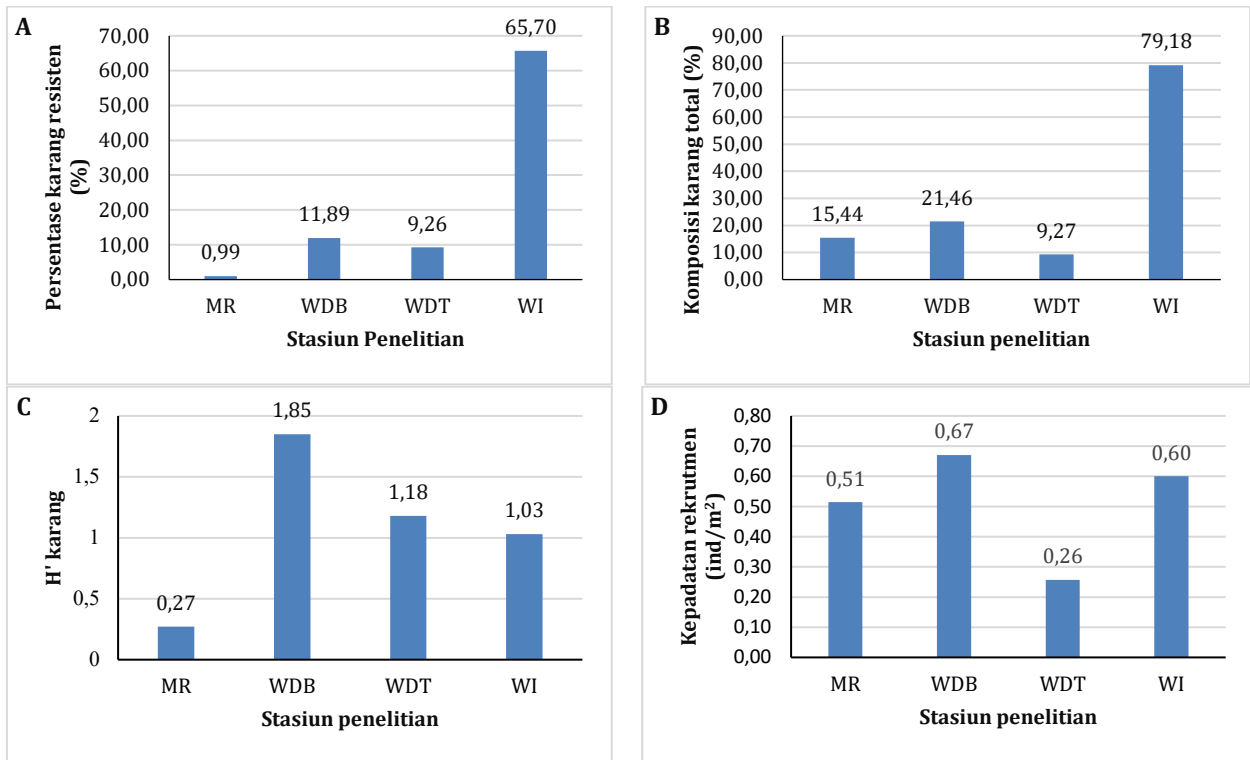
Sebaliknya pada stasiun *Water Discharge Barat* (WDB) memperlihatkan pola yang menunjukkan meskipun persentase tutupan karang keseluruhan sebesar 21,46%, stasiun ini memiliki keanekaragaman tertinggi ($H' = 1,85$) dan kepadatan rekrutmen tertinggi (0,67 ind/m²), yang menunjukkan kapasitas pemulihan atau regenerasi karang muda yang paling baik.

Mercusuar (MR) menunjukkan genus resisten sangat rendah (0,99%) dan keanekaragaman karang dewasa terendah ($H' = 0,27$), tetapi rekrutmen masih cukup tinggi (0,51 ind/m²). *Water Discharge Timur* (WDT) merupakan stasiun paling rentan, ditandai oleh tutupan total karang terendah (9,27%) dan rekrutmen terendah (0,26 ind/m²). Meskipun tutupan karang di stasiun WDT hampir seluruhnya dibentuk oleh karang yang resisten, pola ini lebih mencerminkan komunitas tersaring (*environmental filtering*) yang bertahan sebagai taksa toleran, bukan menggambarkan kondisi “sehat” karena tutupan total dan suplai karang muda tetap rendah (Devantier *et al.*, 2020). Secara keseluruhan, bahwa tinggi rendahnya potensi resiliensi sangat ditentukan kombinasi struktur komunitas (tutupan dan keanekaragaman) dan proses pemulihan (rekrutmen), di mana masing-masing stasiun memiliki karakteristik terumbu karang yang berbeda-beda (Maynard *et al.*, 2017).

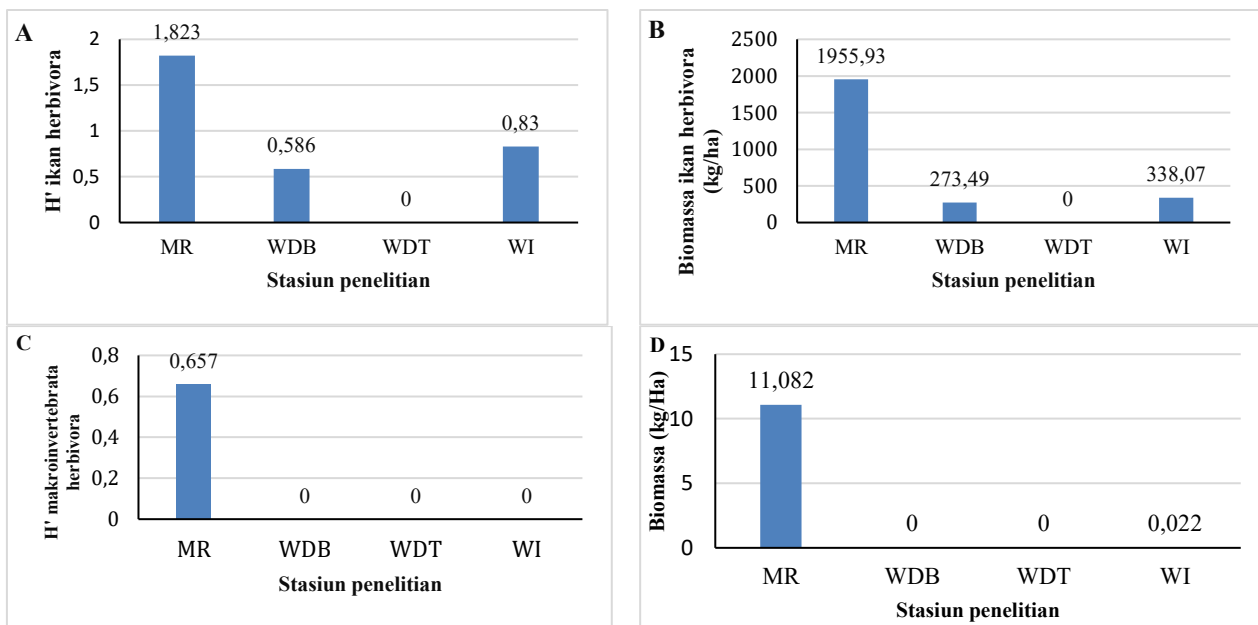
3.1.2. Profil Fungsi Herbivori

Fungsi herbivori direpresentasikan oleh keanekaragaman dan biomassa ikan dan makroinvertebrata herbivora. Indikator ini digunakan untuk menilai kestabilan komunitas ikan herbivori dan fungsi *grazing*. Biomassa dalam penelitian ini diinterpretasikan sebagai pendekatan potensi fungsi herbivori, bukan pengukuran langsung terhadap laju *grazing*. Distribusi keempat indikator herbivora ditunjukkan pada Gambar 4.

MR memiliki H' ikan herbivora tertinggi ($H'=1,823$) dan biomassa ikan herbivora tertinggi (1.955,93 kg/ha). WI menunjukkan H' ikan 0,83 dan biomassa ikan 338,07 kg/ha. Sebaliknya, WDB menunjukkan pelemahan fungsi herbivori (H' ikan 0,586; biomassa ikan 237,49 kg/ha) serta tidak ada ikan herbivora yang tercatat pada WDT selama survei. Adapun nilai makroinvertebrata herbivora memiliki nilai H' tertinggi pada stasiun MR (0,657) dengan biomassa 11,082 kg/ha dan 0,022 kg/ha pada stasiun WI. Sedangkan pada stasiun WDB dan WDT tidak tercatat adanya makroinvertebrata herbivora selama survei.



Gambar 3. Indikator Kondisi Karang. (A) Komposisi Genus Karang Resisten; (B) Tutupan Karang Total; (C) Keanekaragaman Karang; (D) Kepadatan Rekrutmen



Gambar 4. Indikator Herbivori. (A) Keanekaragaman Ikan Herbivora; (B) Biomassa Ikan Herbivora; (C) Keanekaragaman Makroinvertebrata Herbivora; (D) Biomassa Makroinvertebrata Herbivora

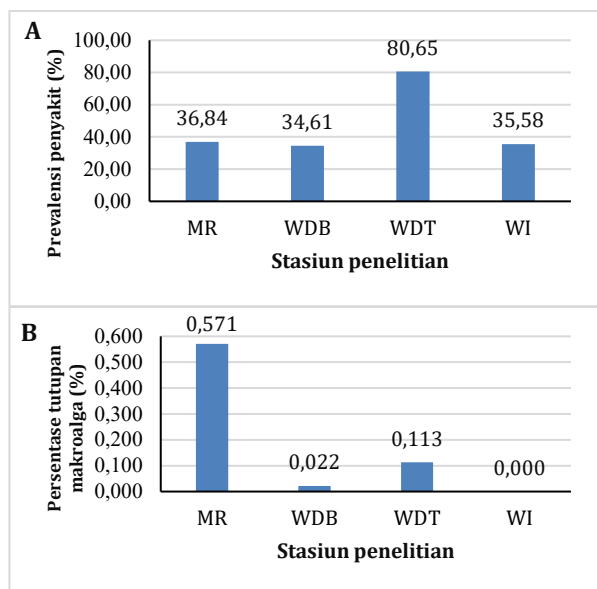
Perbedaan biomassa menunjukkan variasi yang berbeda antar stasiun, namun penelitian ini tidak menjelaskan intensitas *grazing*. Efektivitas herbivori dipengaruhi oleh takson, ukuran tubuh, kelompok fungsi, perilaku mencari makan, ketersediaan alga, dan struktur habitat. Sehingga tingginya biomassa di MR menunjukkan potensi fungsi herbivori yang lebih besar secara relatif.

Kedua stasiun *discharge* memiliki fungsi herbivori yang lemah, di mana fungsi herbivori seimbang sangat

penting untuk menjaga stabilitas ekosistem dan mencegah dominasi makroalga (Chung *et al.*, 2019; Neilson *et al.*, 2018; Sheppard *et al.*, 2023). Tekanan lingkungan selain stres termal, penurunan visibilitas dan turbiditas serta rendahnya kompleksitas struktur substrat dapat menekan perilaku mencari makan dan efektivitas fungsi herbivori serta menurunkan performa komunitas (Mills *et al.*, 2023; Newport *et al.*, 2021).

3.1.3. Profil Gangguan dan Kompetisi

Gangguan direpresentasikan oleh prevalensi penyakit karang, yang mencerminkan kondisi kesehatan koloni dan respons terhadap stres lingkungan, sedangkan kompetisi direpresentasikan oleh tutupan makroalga (>1 cm) sebagai kompetitor ruang. Prevalensi penyakit karang dan persentase tutupan makroalga ditunjukkan oleh Gambar 5.



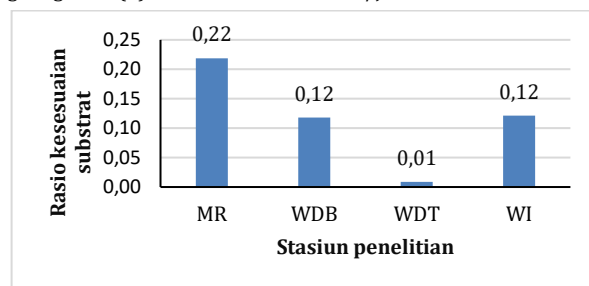
Gambar 5. Indikator Gangguan dan Kompetisi: (A) Prevalensi Penyakit Karang dan (B) tutupan Makroalga

WDT menunjukkan prevalensi penyakit karang tertinggi (80,65%), jauh di atas MR (36,84%), WDB (34,61%), dan WI (35,58%). Hal ini menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi dapat berkaitan dengan peningkatan risiko penyakit yang dapat diperburuk oleh stresor lokal seperti kualitas air (Burke *et al.*, 2023; Greene *et al.*, 2020). Dalam penelitian ini, suhu dan tingginya prevalensi penyakit pada stasiun WDT diperlakukan sebagai sinyal pemantauan dan tidak menjelaskan hubungan sebab-akibat.

Adapun tutupan makroalga tercatat rendah pada seluruh stasiun dengan nilai tertinggi pada MR (0,571%), diikuti oleh WDT (0,113%); WDB (0,022%); WI (0,000%). Secara ekologis, makroalga dapat menekan karang melalui kontak/kompetisi ruang dan efek tidak langsung melalui perubahan kondisi mikroba/lingkungan di sekitar koloni, sedangkan dinamika makroalga sendiri sangat dipengaruhi oleh kekuatan herbivori dan kondisi awal komunitas (Clements & Hay, 2023; Fabricius *et al.*, 2023).

3.1.4. Profil Kesesuaian Substrat

Kesesuaian substrat menggambarkan proporsi permukaan yang berpotensi sebagai penyedia media rekrutmen yang mendukung pemilihan ekosistem karang. Distribusi antar stasiun ditunjukkan pada Gambar 6.



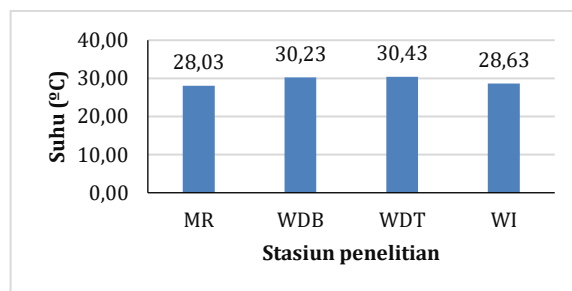
Gambar 6. Kesesuaian Substrat

Rasio kesesuaian substrat menunjukkan bahwa ketersediaan tempat menempel untuk rekrutmen karang di lokasi penelitian umumnya rendah, karena sebagian besar area didominasi substrat tidak sesuai (DCA, rubble, sand, sponge), di mana MR relatif paling baik (rasio 0,22), WDB dan WI sedang (masing-masing 0,12), sedangkan WDT paling buruk (rasio 0,01) sehingga peluang keberhasilan rekrutmen karang cenderung rendah pada lokasi ini.

Substrat mendukung rekrutmen seperti adanya biofilm dan *crustose coralline algae* (CCA), dapat menginduksi *settlement* larva karang (Jorissen *et al.*, 2021). Adapun substrat stabil, permukaan kasar, seperti batuan dan memiliki celah, turut membantu keberhasilan penempelan larva karang pada substrat (Oli *et al.*, 2022). Artinya, ketika proporsi CCA atau permukaan stabil rendah seperti di stasiun WDT, sinyal dan ruang potensi keberhasilan penempelan bagi larva karang pun rendah pula.

3.1.5. Profil Suhu

Distribusi perbedaan suhu antar stasiun saat survei ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Suhu Permukaan Laut

Dua lokasi *hotspot Water Discharge* Timur (30,43 °C) dan *Water Discharge* Barat (30,23 °C) secara konsisten lebih hangat daripada stasiun kontrol yaitu Mercusuar (28,03 °C) dan *Water Intake* (28,63 °C). Secara kuantitatif, perbedaan rata-rata suhu mencapai kurang lebih +2°C antara stasiun *hotspot* dan kontrol (Gambar 7). Namun nilai ini masih dalam suhu optimal menurut PP No 22/2021 tentang baku mutu air laut untuk biota laut dan tidak lebih dari 40°C berdasarkan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 08/2009 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal.

Pola suhu yang lebih tinggi pada area terkait pembuangan air bahang secara umum searah dengan

observasi sebelumnya di Paiton (Kristian, 2019). Masuknya panas ke badan air dapat dibagi menjadi dua zona: *near-field* di sekitar mulut kanal dan *far-field* yang lebih jauh di perairan terbuka. Area *hotspot* dekat sumber buangan, air bahang masih bersuhu relatif tinggi meskipun sudah terdilusi oleh turbulensi, sedangkan di zona yang lebih jauh suhu menurun karena panas tersebar oleh arus alami, difusi turbulen, dan pertukaran panas dengan atmosfer; aliran dari kanal yang penampangnya sempit menuju perairan yang lebih luas juga mempercepat penyebaran panas dari konsentrasi tinggi ke rendah (Astuti, 2021).

3.2. Peringkat potensi resiliensi relatif

Secara umum, indeks resiliensi menunjukkan resiliensi terumbu karang relatif dari stasiun kontrol ke stasiun *hotspot* dekat buangan air bahang dengan melihat nilai *final resilience*. Secara berurutan, lokasi dengan nilai potensi resiliensi relatif terumbu karang tertinggi berada pada stasiun Mercusuar (1,000), *Water Intake* (0,926). *Water Discharge* Barat (0,741) dan terendah pada *Water Discharge* Timur (0,315). Tabel *heatmap* per indikator di setiap stasiun ditujukan pada Tabel 3 serta peta penilaian resiliensi ditunjukkan pada Gambar 8.

Mercusuar (MR) memiliki indeks potensi resiliensi relatif tertinggi (1,000) menunjukkan fungsi herbivori, rekrutmen karang, dan kesesuaian substrat yang baik meskipun nilai struktur komunitas karang relatif lemah. Fungsi herbivori yang baik di stasiun ini berpotensi menahan kompetisi ruang dari makroalga selama fungsi herbivori tetap stabil (Pattiasina *et al.*, 2020). *Water Intake* (WI) menunjukkan indeks tertinggi setelah MR, ditunjukkan oleh kombinasi tutupan karang hidup dan proporsi spesies resisten yang paling tinggi. Namun, tutupan tinggi saja tidak cukup dikarenakan pemulihan tetap bergantung pada komponen lain seperti rekrutmen dan tekanan kompetisi makroalga, sehingga interpretasi WI diinterpretasikan sebagai kuat secara “struktur”

bukan jaminan pemulihan pasca gangguan (Bachtiar *et al.*, 2011; Hoey *et al.*, 2011). Perbedaan pola stasiun kontrol WI–MR dibanding beberapa lokasi penelitian lainnya (seperti di Haina dan West Harbor MMT) dapat muncul dari perbedaan skema pembobotan normalisasi indikator, tetapi konsisten dengan konsep bahwa herbivora dapat memediasi dinamika alga-karang (IUCN, 2011; Maynard *et al.*, 2015).

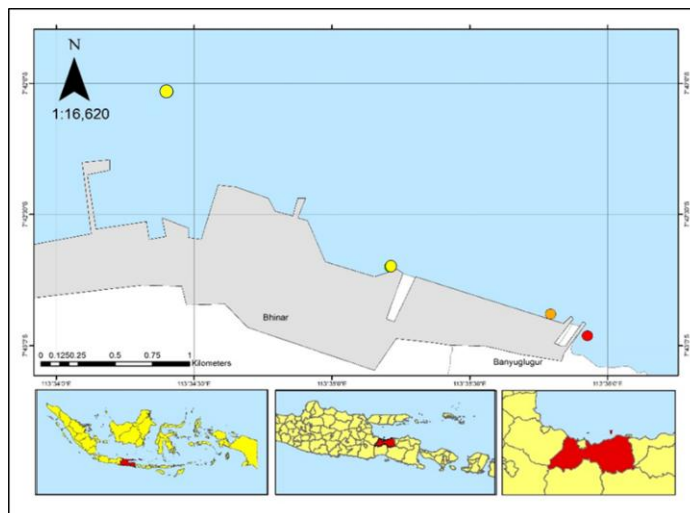
Stasiun *hotspot* yaitu *Water Discharge* Barat (WDB) memiliki keanekaragaman karang dan kepadatan rekrutmen yang paling tinggi, namun nilai potensi resiliensi relatif tetap rendah karena fungsi herbivori lemah, sehingga lebih rentan terhadap dominasi makroalga (Hughes *et al.*, 2007). Adapun *Water Discharge* Timur (WDT) didukung oleh keanekaragaman genus karang yang tertinggi kedua namun nilai ini tetap terendah, mengindikasikan adanya faktor pembatas yang lebih kuat seperti penyakit, kesesuaian substrat, lemahnya herbivori, dan turbiditas. Kedua stasiun ini juga memiliki skor suhu terendah (1-normalisasi) yang artinya secara konsisten lebih tinggi dibanding kedua stasiun kontrol.

Pola perbedaan kondisi komunitas bentik antara stasiun dekat *outlet* air bahang (WDB, WDT) dan stasiun kontrol (MR, WI) sejalan dengan hasil Leng *et al.* (2024) mengenai dampak buangan panas pembangkit listrik terhadap ekosistem bentik, di mana kenaikan suhu sekitar $\pm 4^{\circ}\text{C}$ di area pembuangan umumnya diikuti penurunan keanekaragaman dan kelimpahan bentos, serta pergeseran komunitas yang lebih toleran terhadap stres termal. Temuan tersebut mendukung indikasi di Paiton bahwa tekanan termal dari buangan PLTU kemungkinan berasosiasi terhadap rendahnya keanekaragaman dan biomassa khususnya pada stasiun *Water Discharge* dibandingkan stasiun kontrol yang relatif bebas pengaruh air bahang. Selain itu hal ini dikonfirmasi oleh banyaknya *life form* karang berupa *massive* yang umumnya lebih toleran terhadap stres termal.

Tabel 3. Hasil Skor Komposit Potensi Resiliensi Relatif Terumbu Karang di Sekitar PLTU Paiton

Lokasi	MR	WI	WDT	WDB
Suhu	0,079	0,059	0,000	0,007
Kesesuaian substrat	1,000	0,545	0,045	0,545
Persentase tutupan karang	0,195	1,000	0,117	0,271
Spesies karang resisten	0,015	1,000	0,141	0,181
Keanekaragaman karang	0,146	0,557	0,638	1,000
Prevalensi penyakit	0,543	0,559	0,000	0,571
Kepadatan rekrutmen karang	0,766	0,896	0,383	1,000
Tutupan makroalga	0,000	1,000	0,802	0,961
Keanekaragaman ikan herbivora	1,000	0,455	0,000	0,321
Biomassa ikan herbivora	1,000	0,173	0,000	0,140
Keanekaragaman makroinvertebrata herbivora	1,000	0,000	0,000	0,000
Biomassa makroinvertebrata herbivora	1,000	0,002	0,000	0,000
Skor awal (rata-rata)	0,562	0,521	0,177	0,416
Skor potensi resiliensi relatif (NIR)	1,000	0,926	0,315	0,741
Kategori relatif	Medium-High	Medium-High	Low	Medium-Low
Peringkat	1	2	4	3

Skor indikator resiliensi dinormalisasi (0–1) untuk tiap *site*. Indikator relatif (penyakit karang, tutupan makroalga, dan suhu permukaan laut) dibalik menjadi skor unidireksional (UNI) dengan rumus $UNI = 1 - \text{norm}$, sehingga nilai tinggi bermakna lebih baik. Skor awal dihitung sebagai rata-rata skor UNI indikator resiliensi per *site* dan skor potensi resiliensi relatif (NIR) = Skor awal (rata-rata) ÷ Skor awal (rata-rata) maksimum. Kategori relatif ditentukan berdasarkan rata-rata ± 1 SD dari *final resilience score*: Low ($< \text{mean} - 1 \text{ SD}$), Medium-Low ($\text{mean} - 1 \text{ SD}$ hingga $< \text{mean}$), Medium-High (mean hingga $\text{mean} + 1 \text{ SD}$), dan High ($> \text{mean} + 1 \text{ SD}$). Warna menunjukkan klasifikasi relatif per indikator (merah = rendah → hijau = tinggi).



Gambar 8. Sebaran Nilai Indeks Potensi Resiliensi Relatif pada Keempat Stasiun Penelitian

Dalam konteks manajemen, memulihkan fungsi herbivori (seperti pembatasan tangkap, zona buffer, atau *Herbivore Management Area*) relevan untuk mempertahankan kapasitas pemulihan di WI-MR dan terutama untuk memperbaiki fungsinya di stasiun WDB-WDT (Chung *et al.*, 2019; Maynard & McLead, 2012). Adapun apabila herbivori ikan rendah, makroinvertebrata herbivora (*echinoid*) dapat berperan sebagai “*remnant herbivores*” dan secara praktis lebih mudah dikelola untuk meningkatkan kontrol makroalga (Dang *et al.*, 2020; Fong *et al.*, 2024; Williams, 2020). Dengan demikian, hasil ini dapat digunakan untuk menetapkan prioritas pemantauan dan dapat dijadikan sebagai pertimbangan.

3.3. Keterbatasan dan Prioritas Pemantauan

Penelitian ini memiliki keterbatasan utama. Pertama, setiap stasiun direresentasikan dalam satu periode, sehingga tidak mempertimbangkan perubahan musiman dan tidak mengukur kemampuan pemilihan setelah mengalami gangguan. Kedua, suhu hanya diukur saat survei sehingga belum menggambarkan durasi serta fluktuasi paparan termal. Ketiga, faktor oseanografi seperti arus, turbiditas, kompleksitas habitat, dan tekanan oleh aktivitas penangkapan ikan belum dihitung secara kuantitatif. Pemantauan lanjutan perlu memprioritaskan replikasi transek, pengulangan secara temporal (antar musim), menggunakan *logger* suhu secara kontinu, mengukur tingkat kekeruhan secara langsung, menilai rugositas sebagai kompleksitas habitat, serta menambahkan data tekanan penangkapan.

4. KESIMPULAN

Indeks potensi resiliensi relatif terumbu karang di sekitar PLTU Paiton ini bersifat sebagai *baseline* awal karena seluruh indikator dihitung dari data lapangan pada 17-22 Agustus 2025, sehingga hasilnya menggambarkan kondisi saat pengamatan, bukan tren jangka panjang. Indeks potensi resiliensi relatif menunjukkan urutan MR (1,000; *medium-high*) > WI

(0,926; *medium-high*) > WDB (0,741; *medium-low*) > WDT (0,315; *low*). WI memiliki kondisi paling kuat karena ditopang indikator komunitas karang (tutupan dan proporsi karang resisten) yang tinggi, sedangkan MR relatif tinggi terutama karena fungsi herbivori yang kuat. Dua stasiun *discharge* menunjukkan resiliensi lebih rendah, dengan pembatas utama yang konsisten berupa pelemahan herbivori dan meningkatnya sinyal gangguan kesehatan dan kompetisi, serta menunjukkan suhu yang lebih tinggi dibanding stasiun kontrol. sehingga WDT menjadi lokasi paling rentan pada saat survei. Hasil ini dapat digunakan sebagai dasar awal untuk memprioritaskan pemantauan dan tindakan pengelolaan (misalnya menjaga fungsi herbivori dan menekan tekanan lokal), sementara evaluasi perubahan resiliensi dari waktu ke waktu memerlukan pemantauan berulang.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, L. (2021). *Deteksi Coral Reef Bleaching Menggunakan Citra Satelit Multisensor Resolusi Menengah di Perairan PLTU Paiton, Probolinggo*. Universitas Brawijaya. Skripsi.
- Bachtiar, I., Damar, A., Suharsono, & Zamani, N. P. (2011). Assessing Ecological Resilience of Eastern Indonesian Coral Reefs. *Journal of Indonesia Coral Reefs*, 1(2), 91–98.
- Bellwood, D. R., Hughes, T. P., & Nystrom, M. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429, 827–833. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nature02691>
- Burhanuddin, A., Omar, S. B. A., & Zainuddin, E. N. (2025). Population structure and growth patterns of *Diadema setosum* (Echinodermata: Diadematidae) in the coastal ecosystems of Buru Island, Maluku, Indonesia. 26(6), 2936–2945. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d260636>
- Burke, S., Pottier, P., Lagisz, M., Macartney, E. L., Ainsworth, T., Drobnik, S. M., & Nakagawa, S. (2023). The impact of rising temperatures on the prevalence of coral diseases and its predictability: A global meta-analysis. *January*, 1466–1481.

- <https://doi.org/10.1111/ele.14266>
- Chambers, J. C., Allen, C. R., & Cushman, S. A. (2020). Editorial: Operationalizing the Concepts of Resilience and Resistance for Managing Ecosystems and Species at Risk. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8(168), 1–4. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00168>
- Chung, A. E., Wedding, L. M., Green, A. L., Friedlander, A. M., Goldberg, G., Meadows, A., & Hixon, M. A. (2019). Building Coral reef resilience through spatial herbivore management. *Frontiers in Marine Science*, 6(98), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00098>
- Clements, C. S., & Hay, M. E. (2023). Disentangling the impacts of macroalgae on corals via effects on their microbiomes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11(June), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1083341>
- Dakos, V., & Kéfi, S. (2022). Ecological resilience: What to measure and how. *Environmental Research Letters*, 17(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5767>
- Dang, V. D. H., Cheung, P. Y., Fong, C. L., Mulla, A. J., Shiu, J. H., Lin, C. H., & Nozawa, Y. (2020). Sea Urchins Play an Increasingly Important Role for Coral Resilience Across Reefs in Taiwan. *Frontiers in Marine Science*, 7(December), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.581945>
- Devantier, L., Turak, E., & Szava-kovats, R. (2020). *Species Richness and Abundance of Reef-Building Corals in the Indo-West Pacific: The Local – Regional Relation Revisited*. 7(July), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00487>
- Fabrizius, K. E., Crossman, K., Jonker, M., Mongin, M., & Thompson, A. (2023). Macroalgal cover on coral reefs: Spatial and environmental predictors, and decadal trends in the Great Barrier Reef. *PLoS ONE*, 18(1), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279699>
- Fong, C. R., Smith, N., Catalan, E., Caraveo, B. A., Barber, P. H., & Fong, P. (2024). Herbivorous sea urchins (*Echinometra mathaei*) support resilience on overfished and sedimented tropical reefs. *Scientific Reports*, 14, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52222-0>
- Greene, A., Donahue, M. J., Caldwell, J. M., Heron, S. F., Geiger, E., & Raymundo, L. J. (2020). *Coral Disease Time Series Highlight Size-Dependent Risk and Other Drivers of White Syndrome in a Multi-Species Model*. 7(December), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.601469>
- Hoey, A. S., Pratchett, M. S., & Cvitanovic, C. (2011). High Macroalgal Cover and Low Coral Recruitment Undermines the Potential Resilience of the World's Southernmost Coral Reef Assemblages. *PLoS ONE*, 6(10), 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025824>
- Hughes, T. P., Rodrigues, M. J., Bellwood, D. R., Ceccarelli, D., Hoegh-Guldberg, O., McCook, L., Moltschaniwskyj, N., Pratchett, M. S., Steneck, R. S., & Willis, B. (2007). Phase Shifts, Herbivory, and the Resilience of Coral Reefs to Climate Change. *Current Biology*, 17(4), 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.12.049>
- Indra, Z. A. (2016). *Prevalensi Penyakit Band Diseases pada Karang Bercabang di Perairan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton, Probolinggo*. Institut Teknologi Sepuluh November. Skripsi.
- IUCN. (2011). *Coral Reef Resilience Assessment of the Bonaire National Marine Park, Netherlands Antilles*. IUCN. <http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/2011-008.pdf>
- Jaelani, L. M., & Afifi, Z. (2016). Studi Pemetaan Pemutihan Terumbu Karang dengan Citra Resolusi Tinggi (Studi Kasus: Perairan PLTU Paiton, Probolinggo). *Geoid*, 11(2), 144. <https://doi.org/10.12962/j24423998.v11i2.1258>
- Jorissen, H., Galand, P. E., Bonnard, I., Meiling, S., Raviglione, D., Meistertzheim, A. L., Hédouin, L., Banaigs, B., Payri, C. E., & Nugues, M. M. (2021). Coral larval settlement preferences linked to crustose coralline algae with distinct chemical and microbial signatures. *Scientific Reports*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94096-6>
- Kristian, T. D. (2019). *Pemodelan Sebaran Suhu Air Bahang dan Analisis Korelasi Suhu Perairan Terhadap Kelimpahan Fitoplankton di Perairan PLTU Paiton*. Universitas Brawijaya. Skripsi.
- Leng, Q., Mohamat-Yusuff, F., Mohamed, K. N., Zainordin, N. S., & Hassan, M. Z. (2024). Impacts of thermal and cold discharge from power plants on marine benthos and its mitigation measures: a systematic review. *Frontiers in Marine Science*, 11(December). <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1465289>
- Maynard, J. A., Marshall, P. A., Parker, B., Mcleod, E., Ahmadi, G., van Hooidek, R., Planes, S., William, G. J., Raymundo, L., Beeden, R., & Tamelander, J. (2017). *Coral Reef Resilience For decision support*. UN Environment.
- Maynard, J. A., Mckagan, S., Raymundo, L., Johnson, S., Ahmadi, G. N., Johnston, L., Houk, P., Williams, G. J., Kendall, M., Heron, S. F., Hooidek, R. Van, Mcleod, E., Tracey, D., & Planes, S. (2015). Assessing relative resilience potential of coral reefs to inform management. *BIOC*, 192, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.09.001>
- Maynard, J., & McLeod, L. (2012). How to guide for conducting resilience assessment. In *The Nature Conservancy*.
- McClanahan, T. R., Donner, S. D., Maynard, J. A., MacNeil, M. A., Graham, N. A. J., Maina, J., Baker, A. C., Alemu I., J. B., Beger, M., Campbell, S. J., Darling, E. S., Eakin, C. M., Heron, S. F., Jupiter, S. D., Lundquist, C. J., McLeod, E., Mumby, P. J., Paddock, M. J., Selig, E. R., & van Woesik, R. (2012). Prioritizing Key Resilience Indicators to Support Coral Reef Management in a Changing Climate. *PLoS ONE*, 7(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042884>
- Mills, M. S., Schils, T., Olds, A. D., & Leon, J. X. (2023). Structural Complexity of Coral Reefs in Guam, Mariana Islands. *Remote Sensing*, 15(23), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs15235558>
- Muchlisin, C. (2015). *Struktur Komunitas Ikan Karang Di Perairan Terdampak Air Bahang PLTU Paiton Probolinggo*. Institut Teknologi Sepuluh November. Skripsi.
- Muzaki, F., & Saptarini, D. (2012). Status of coral reefs before and after mass bleaching event 2010 in coastal water of PLTU Paiton. *IBOC (International Biology Conference)*.
- Neilson, B. J., Wall, C. B., Mancini, F. T., & Gewecke, C. A. (2018). Herbivore biocontrol and manual removal successfully reduce invasive macroalgae on coral reefs. *PeerJ*, 2018(8), 1–27. <https://doi.org/10.7717/peerj.5332>

- Putri, B., M., Mutaqin, B., W., dan Pambudi, P., A. (2026). Penilaian Potensi Resiliensi Relatif Terumbu Karang di Perairan Sekitar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton, Kabupaten Probolinggo. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 938-947, doi:10.14710/jil.24.4.938-947
- Newport, C., Padgett, O., & de Perera, T. B. (2021). High turbidity levels alter coral reef fish movement in a foraging task. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84814-5>
- O’Leary, J. K., Micheli, F., Airoidi, L., Boch, C., De Leo, G., Elahi, R., Ferretti, F., Graham, N. A. J., Litvin, S. Y., Low, N. H., Lummis, S., Nickols, K. J., & Wong, J. (2017). The resilience of marine ecosystems to climatic disturbances. *BioScience*, 67(3), 208–220. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw161>
- Oli, A. P., Roeroe, K. A., Paruntu, C. P., Kusen, J. D., Indri, S., & Mandagi, S. V. (2022). Study Of Hard Coral (Scleractinia) Recruitment In The Molas Waters, Manado City. *Jurnal Ilmiah Platax*, 10(June). <https://doi.org/10.35800/jip.v10i1.37489>
- Pattiasina, T. F., Sartimbul, A., Herawati, E. Y., Krey, M., & Simatauw, F. F. (2020). Assessing functional diversity and biomass of herbivorous fish as resilience indicators of coral reef ecosystems in Doreri Bay , Manokwari Regency , Indonesia. *AACL Bioflux*, 13(3), 1522–1534. <https://bioflux.com.ro/docs/2020.1522-1534.pdf>
- Riznawati, A. E. (2015). *Prevalensi White Syndrome Pada Karang Masif di Perairan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton, Probolinggi*. Institut Teknologi Sepuluh November. Skripsi.
- Sheppard, C. E., Williams, G. J., Extton, D. A., & Keith, S. A. (2023). Co-occurrence of herbivorous fish functional groups correlates with enhanced coral reef benthic state. *Global Ecology and Biogeography*, 32(3), 435–449. <https://doi.org/10.1111/geb.13638>
- Williams, S. M. (2020). *The control of algal abundance on coral reefs through the reintroduction of Diadema antillarum* (Vol. 2020).