

Analisis Multitemporal Perubahan Luasan Terumbu Karang dan Kondisi Lingkungan di Perairan Pulau Tidung Kecil

Ratih Nurmasari*, Luthfi Anzani, La Ode Alam Minsaris

Program Studi Sistem Informasi Kelautan, Universitas Pendidikan Indonesia
Jl. Dr. Setiabudi No.229, Isola, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40154 Indonesia
Corresponding author, e-mail: ratihnurmasari10@gmail.com

ABSTRAK: Pulau Tidung Kecil dimanfaatkan sebagai area konservasi serta dikenal sebagai salah satu destinasi pariwisata. Kondisi tersebut dapat memengaruhi kesuburan dan sebaran ekosistem terumbu karang. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan luasan terumbu karang selama lima tahun terakhir (2020–2024) menggunakan citra Sentinel-2 melalui algoritma Lyzenga dan klasifikasi *Maximum Likelihood*, serta mengidentifikasi kondisi lapangan dengan perubahan luasan tersebut. Perubahan luasan terumbu karang di Pulau Tidung Kecil mengalami kenaikan dan penurunan sepanjang tahun 2020-2024. Luasan karang hidup pada tahun 2020 sebesar 21,01 ha, pada tahun 2021 sebesar 23,58 ha, kemudian pada tahun 2022 sebesar 23,25 ha, tahun 2023 sebesar 22,32 ha dan tahun 2024 sebesar 22,09 ha. Nilai *Overall accuracy* (OA) pada klasifikasi citra sebesar 90% dengan koefisien kappa sebesar 0,875. Penurunan luasan terumbu karang pada tahun 2021 – 2024 terjadi karena faktor antropogenik seperti aktivitas pariwisata, penangkapan ikan dengan alat tangkap yang tidak ramah lingkungan, serta pencemaran dari sampah dan limbah, sedangkan peningkatan luasan terumbu karang terjadi pada tahun 2020 – 2021 akibat berkurangnya tekanan aktivitas antropogenik selama masa pandemi COVID-19 dan adanya program rehabilitasi seperti transplantasi karang.

Kata kunci: Algoritma Lyzenga; *Maximum Likelihood*; Pulau Tidung Kecil; Sentinel-2

Multitemporal Analysis of Changes in Coral Reef Area and Environmental Condition in The Waters of Tidung Kecil Island

ABSTRACT: *Tidung Kecil Island is used as a conservation area and is known as a tourist destination. These conditions can affect the fertility and distribution of coral reef ecosystems. This study aims to analyze changes in coral reef area over the past five years (2020–2024) using Sentinel-2 imagery through the Lyzenga algorithm and Maximum Likelihood classification, as well as to identify field conditions associated with these changes in area. Changes in coral reef area on Tidung Kecil Island have shown increases and decreases throughout the years 2020–2024. The area of live coral in 2020 was 21.01 ha, in 2021 it was 23.58 ha, then in 2022 it was 23.25 ha, in 2023 it was 22.32 ha, and in 2024 it was 22.09 ha. The Overall Accuracy (OA) value for image classification was 90% with a Kappa coefficient of 0.875. The decline in coral reef area between 2021 and 2024 was due to anthropogenic factors such as tourism activities, fishing with environmentally unfriendly gear, and pollution from waste and sewage, while the increase in coral reef area occurred in 2020–2021 due to reduced anthropogenic pressure during the COVID-19 pandemic and the implementation of rehabilitation programs such as coral transplantation.*

Keywords: *Coral reef; Lyzenga algorithm; Maximum Likelihood; Sentinel-2; Tidung Kecil Island*

PENDAHULUAN

Terumbu karang adalah salah satu ekosistem dengan biodiversitas dan produktivitas tinggi, yang menjadikan peran terumbu karang penting (Nabilla & Anggriyani, 2024). Indonesia memiliki keanekaragaman jenis terumbu karang yang tinggi, dengan 590 spesies yang tersebar dalam 80

genus (Anggraini *et al.*, 2023). Terumbu karang memiliki peran ekologi yang penting, antara lain sebagai lokasi mencari makan (*feeding ground*), tempat pengasuhan (*nursery ground*), area pemijahan (*spawning ground*), dan zona pembesaran (*rearing ground*) bagi berbagai biota penting. Selain itu, terumbu karang berfungsi sebagai pelindung pantai dengan meredam terjangan ombak dan arus, serta menjaga keseimbangan ekosistem perairan (Akla *et al.*, 2022). Kondisi terumbu karang di Indonesia 6,42% dalam kondisi sangat baik, 22,38% dalam kondisi baik, 37,38% dalam kondisi cukup, dan 33,82% dalam kondisi buruk (Hadi *et al.*, 2019). Baru-baru ini, ekosistem terumbu karang menghadapi ancaman yang serius, yang dapat menyebabkan degradasi. Ancaman tersebut mengakibatkan kerusakan pada ekosistem terumbu karang di berbagai lokasi di Indonesia (Ginting, 2023).

Terumbu karang mengalami degradasi yang dapat diakibatkan oleh faktor oseanografi maupun faktor antropogenik (Putra *et al.*, 2022). Terumbu karang sensitif terhadap perubahan oseanografi, perubahan tersebut merupakan faktor yang dapat mengganggu proses pertumbuhan maupun resiliensi karang. Beberapa parameter kualitas air yang dapat mempengaruhi terumbu karang, yaitu suhu, salinitas, pH, DO, dan arus (Rajabson *et al.*, 2023). Selain itu, degradasi yang dialami terumbu karang dapat diakibatkan oleh faktor antropogenik, seperti polusi, perubahan iklim, penangkapan ikan dengan alat merusak, sedimentasi, wisata bahari, penambangan karang dan pengembangan wilayah pesisir (Suryono *et al.*, 2022).

Luas terumbu karang yang berada di Gugusan Kepulauan Seribu sebesar 4,750 ha dengan sekitar 50% kawasan tersebut mengalami kerusakan (Noviana *et al.*, 2018). Pulau Tidung yang berada di Kepulauan Seribu, merupakan lokasi dengan berbagai aktivitas padat, termasuk pemukiman penduduk, kegiatan konservasi alam, serta destinasi wisata (Hapsari *et al.*, 2022). Pulau Tidung Kecil dimanfaatkan sebagai area konservasi serta dikenal sebagai salah satu destinasi pariwisata. Kondisi tersebut dapat mempengaruhi kesuburan dan sebaran ekosistem terumbu karang (Suhaika *et al.*, 2023). Daerah pariwisata cenderung memiliki tingkat kerusakan lingkungan yang lebih besar dibandingkan dengan non-pariwisata, salah satunya terumbu karang (Fauzanabri *et al.*, 2021). Kondisi terumbu karang di Perairan Pulau Tidung Kecil dikategorikan kondisi sedang ke rusak dengan rata-rata 10,3-28,9% (Cindewiyani & Herdiansyah, 2019). Kerusakan terumbu karang dapat menyebabkan penurunan luasan karang di suatu wilayah. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan melakukan monitoring dengan cara pemetaan terumbu karang untuk mengetahui luasan terumbu karang (Muhtar *et al.*, 2019).

Teknologi yang dapat memberikan informasi mengenai perairan dangkal, seperti terumbu karang secara efektif dan efisien, yaitu penginderaan jauh (Aulia *et al.*, 2020). Penginderaan jauh merupakan teknik yang dimanfaatkan dalam pemetaan habitat bentik, dengan memanfaatkan sistem dalam mengidentifikasi objek yang berdasarkan variasi warna, bentuk dan tekstur (Afgatiani & Shinio, 2024). Kelebihan yang dimiliki oleh penginderaan jauh adalah informasi yang tersimpan, jangkauan yang luas, detail dalam mengindra objek secara efektif dan efisien serta dapat menghemat dalam waktu, biaya dan tenaga. Tersedia beberapa sensor satelit yang dapat digunakan dalam mendeteksi ekosistem perairan dangkal salah satunya yaitu citra Sentinel-2 yang dimanfaatkan dalam pemantauan memantau lautan serta pemetaan habitat bentik (Nguyen *et al.*, 2021).

Algoritma Lyzenga (*Depth Invariant Index*) digunakan untuk menajamkan citra satelit dalam mendeteksi substrat perairan dangkal, dengan mengatasi gangguan serapan dan hamburan pada permukaan air yang menghambat interpretasi langsung (Rombe *et al.*, 2024). Sementara itu, *Maximum Likelihood* adalah algoritma *supervised classification* yang mengelompokkan piksel ke dalam beberapa kelas yang sudah ditentukan sebelumnya. *Maximum Likelihood* dapat diimplementasikan dalam pemetaan dan analisis di wilayah pesisir dan laut. Akurasi yang dihasilkan baik dalam memetakan habitat bentik, sehingga sudah banyak digunakan dalam beberapa penelitian (Kurniawati *et al.*, 2025). Menggunakan algoritma Lyzenga dapat meningkatkan akurasi pemetaan lebih dari 20% serta *Maximum Likelihood* dapat mencapai akurasi tinggi hingga 90% dalam klasifikasi habitat bentik. Penerapan algoritma Lyzenga serta *Maximum Likelihood* memiliki potensi dalam meningkatkan akurasi pemetaan habitat bentik (Nguyen *et al.*, 2021).

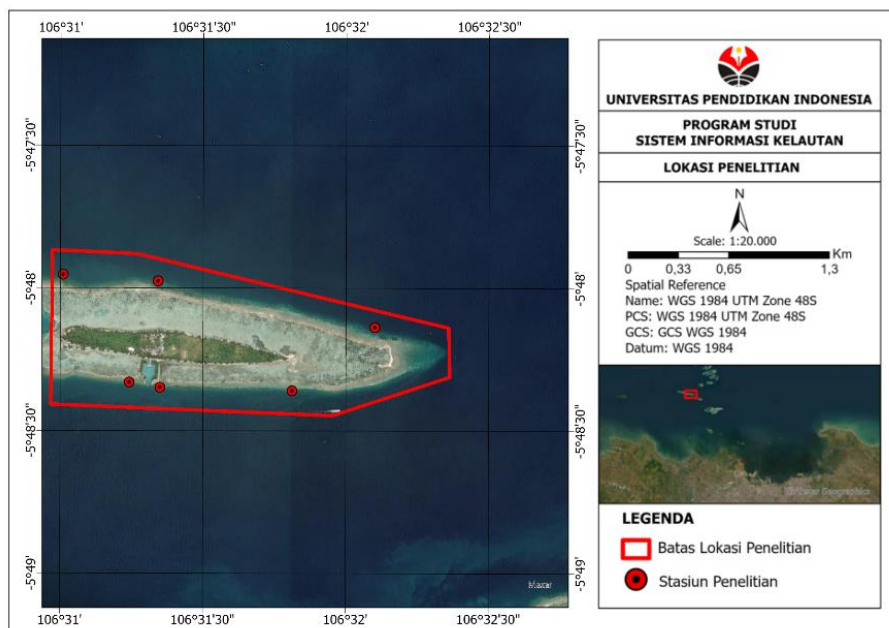
Penelitian sebelumnya telah menggunakan metode algoritma Lyzenga serta *Maximum*

Likelihood untuk pemetaan terumbu karang, seperti penelitian yang dilakukan oleh Karang *et al.* (2019), melakukan perbandingan antara citra Sentinel-2A memiliki tingkat akurasi keseluruhan sebesar 80% dan Landsat 8 sebesar 68,29% dalam klasifikasi kelas perairan. Penelitian oleh Yarmazen & Kurniawati (2024) dalam memetakan habitat bentik menggunakan Sentinel-2A dengan koreksi menunjukkan koreksi Lyzenga lebih akurat dari 76% menjadi 80% dari 4 kelas habitat bentik dengan klasifikasi *Maximum Likelihood*. Penelitian oleh Alifatri *et al.* (2022) di Kepulauan Kei Maluku Tenggara menggunakan citra Sentinel-2 dengan algoritma MLH menghasilkan uji akurasi sebesar 74,33% dengan jumlah kelas sebanyak 3 kelas klasifikasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan luasan terumbu karang di perairan Pulau Tidung Kecil dari tahun 2020 - 2024 dengan menggunakan citra satelit Sentinel-2 *Level 2A* dan mengidentifikasi kondisi lingkungan terhadap perubahan luasan terumbu karang. Pulau Tidung Kecil dipilih sebagai lokasi penelitian karena memiliki dampak antropogenik seperti aktivitas wisata Bahari dan penangkapan ikan, yang berpotensi mempengaruhi kondisi ekosistem terumbu karang.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan dalam kurun waktu 5 bulan yaitu sejak bulan Februari sampai bulan Juni 2025. Penelitian ini dilakukan di Pulau Tidung Kecil, Kepulauan Seribu, Provinsi DKI Jakarta. Sebanyak enam stasiun pengamatan digunakan dalam penelitian ini untuk memperoleh data parameter oseanografi yang mewakili kondisi lingkungan di area studi, dapat dilihat pada Gambar 1.

Pemilihan stasiun penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, meliputi stasiun 1 (utara, area *snorkeling*), stasiun 2 (utara, area inti konservasi), stasiun 3 (timur, lokasi penangkapan ikan), stasiun 4 (selatan, kebun karang area inti konservasi), stasiun 5 (dermaga, tempat sandar kapal), dan stasiun 6 (selatan, destinasi *snorkeling*). Pengambilan data parameter kualitas air dilakukan tiga kali pengulangan di setiap stasiun, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu perahu, alat selam dasar, Garmin GPSMap 78S, kamera *underwater*, Termometer, Refraktometer, pH meter, DO meter, dan alat tulis. Perangkat lunak yang dibutuhkan seperti *SNAP*, *ArcGIS 10.8*, *ArcGIS Pro* dan sedangkan bahan yang digunakan dalam tahap pengelolaan, yaitu data citra satelit Sentinel-2 *Level 2A*.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Citra Sentinel-2 *Level 2A* yang digunakan dalam penelitian ini sudah terkoreksi sampai tahap *Bottom Of Atmosphere* (BOA) yang disediakan oleh ESA (ESA, 2015). Tahap ini dilakukan proses menerapkan koreksi *sun glint* terhadap pantulan sinar matahari pada permukaan air, untuk menghapus efek refleksi sinar matahari pada permukaan air (Munawaroh *et al.*, 2021). *Cropping* citra dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses pengolahan data dengan memusatkan analisis pada area penelitian yang relevan. Tahap selanjutnya *masking*, yaitu memisahkan area daratan dan perairan guna menentukan batas wilayah penelitian (Putra *et al.*, 2023).

Pemilihan citra dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi awan yang minimal agar tampak jelas. Citra Sentinel-2 yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh pada tanggal 28 Juni 2020, 18 Juli 2021, 8 Juli 2022, 20 Desember 2023, dan 27 Juli 2024.

Algoritma ini diimplementasikan pada tiga komposit band, yaitu RGB (*red, green, blue*) sealami mungkin untuk menghasilkan komposit *true color*, dalam menganalisis habitat benthik perairan dangkal (Yarmazen & Kurniawati, 2024). Menurut BIG (2014) kombinasi band terbaik untuk mengidentifikasi kelas habitat dasar perairan dangkal yaitu *true color composite*, karena hasil band tersebut mempunyai tingkat penetrasi ke dalam perairan yang cukup baik, namun tingkat gangguan atmosferik yang tinggi merupakan kelemahan dari komposit ini.

Menurut Lyzenga (1978) pantulan pada dasar perairan tidak bisa langsung diamati oleh citra satelit karena tereduksi oleh penyerapan dan penyebaran di kolom air. Pengaruh tersebut dapat dihitung dengan mengetahui kedalaman dan karakteristik setiap titik pada suatu wilayah. Menurut Lyzenga (1981) metode yang dikembangkan oleh Lyzenga dapat mengurangi dampak dari kolom air pada citra satelit. Metode yang digunakan yaitu *Depth Invariant Index* (DII) atau metode koreksi kolom air di perairan dangkal, metode tersebut digunakan untuk meningkatkan ketelitian informasi yang terdapat di perairan dangkal. Rumus yang diterapkan dalam Algoritma Lyzenga:

$$DII = \ln(L_i) - \left(\frac{k_i}{k_j} \right) \cdot \ln(L_j)$$

Cara menentukan nilai dari koefisien atenuasi (k_i/k_j), digunakan perhitungan pada rumus di bawah ini:

$$\frac{k_i}{k_j} = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 1}$$

Cara memperoleh nilai α dengan persamaan:

$$\alpha = \frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2\sigma_{ij}}$$

Keterangan: k_i/k_j adalah koefisien atenuasi dua kanal reflektan. σ_{ii} merupakan varian dari perhitungan nilai reflektan pada band i , σ_{jj} merupakan varian dari perhitungan nilai reflektan pada band j , dan σ_{ij} adalah kovarian dari perhitungan nilai reflektan antara band i dan band j .

Klasifikasi citra pada tahap awal menggunakan metode *supervised classification* (klasifikasi terbimbing) dengan dilakukan *training area* terlebih dahulu, untuk dikelompokkan berdasarkan beberapa piksel yang memiliki warna sama, dilakukan dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood* (Dimara *et al.*, 2020). Warna laut dalam lebih gelap dibandingkan dengan warna di perairan dangkal (Nuha *et al.*, 2019). Karang hidup umumnya berada pada sisi luar perairan dangkal serta cenderung berwarna gelap. Lamun akan terlihat gelap atau berwarna hijau karena objek tersebut berklorofil. Sedangkan untuk pasir dan *rubble* (patahan karang) terlihat lebih cerah, karena memantulkan gelombang elektromagnetik (Nandika *et al.*, 2023).

$$P = \ln(Ac) - 0.5 \ln \left(\left| \sum c \right| \right) - 0.5 \left[(X - \mu c)^T \left(\sum c^{-1} \right) (X - \mu c) \right]$$

Keterangan: P adalah bobot jarak likelihood, C merupakan indeks kelas, dan X adalah nilai piksel dari calon kelas. μ_c merupakan rata-rata data training untuk kelas c, A_c menyatakan persentase pengetahuan pada kelas c, $|\Sigma_c|$ adalah determinan dari matriks ragam kelas c, Σ_c^{-1} merupakan invers dari matriks kelas c, dan T adalah putaran matriks.

Pengambilan sampel data dilaksanakan dengan metode *stop and go*. Ground check dilakukan pada lima kelas dengan jumlah total 100 titik sampling. Pengambilan titik sampel secara *random sampling* sebanyak 20 titik per kelas yang akan mewakili tiap kelasnya. Menurut BIG (2014) metode ini dapat digunakan sebagai validasi lapangan, dengan mengambil titik sampel dari setiap kelas, secara *purposive random sampling*. Peralatan lapangan yang dibutuhkan, yaitu *skin dive*, GPS dan kamera *underwater*. Upayakan setiap kelas harus memiliki setidaknya 15 hingga 30 sampel di lapangan. Hal tersebut didasari dari beberapa pertimbangan seperti efektivitas waktu, biaya, dan sulitnya medan di lapangan saat pengambilan sampel. Metode *stop and go* merupakan metode efektif dan simple, dikarenakan implementasi peneliti observasi keadaan di wilayah yang diteliti dengan membandingkan hasil klasifikasi (Semedi *et al.*, 2019).

Menurut Congalton & Green (2009) data yang diperoleh dari pengolahan citra dan hasil lapangan, diuji menggunakan *confusion matrix*, yaitu perhitungan *Overall Accuracy* (OA), *Producer Accuracy* (PA), *User Accuracy* (UA), dan koefisien kappa.

$$\begin{aligned}
 \text{Producer accuracy} &= \frac{X_{ii}}{X_{i+}} 100\% \\
 \text{User accuracy} &= \frac{X_{ii}}{X_{+i}} 100\% \\
 \text{Overall accuracy} &= \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N} 100\% \\
 \text{Kappa} &= \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot X_{+i})} 100\%
 \end{aligned}$$

Keterangan: N adalah total seluruh piksel dalam pengamatan. X_{ii} merupakan elemen diagonal pada matriks konfusi yang menunjukkan jumlah piksel pada baris ke-i dan kolom ke-i. X_{i+} menyatakan jumlah total piksel pada kolom ke-i, sedangkan X_{+i} menyatakan jumlah total piksel pada baris ke-i.

Menurut Viera & Garrett (2005) kesesuaian nilai kappa terdapat beberapa kategori, dilihat pada Tabel 1. Penelitian ini menggunakan wawancara semi terstruktur, yaitu wawancara dilakukan oleh peneliti dengan panduan pertanyaan yang telah disiapkan sebelumnya, namun pelaksanaannya tidak selalu mengikuti urutan pertanyaan secara ketat, melainkan disesuaikan dengan alur percakapan yang berkembang selama wawancara berlangsung (Putri & Setiawan, 2024). Wawancara dilakukan kepada dua kelompok informan utama, yaitu pihak konservasi dan nelayan. Pihak konservasi dipilih karena berperan langsung dalam pengelolaan dan pemantauan terumbu karang, sedangkan nelayan dipilih karena memiliki pengetahuan lokal tentang kondisi perairan. Informasi dari keduanya diharapkan memberikan sudut pandang yang saling melengkapi terhadap perubahan luasan terumbu karang dan kondisi lingkungan di wilayah perairan Pulau Tidung Kecil.

Tabel 1. Kategori Kesesuaian Akurasi Kappa

Nilai Kappa (%)	Tingkat Kesesuaian
<0	Lebih rendah dari kesesuaian acak
1-20	Kesesuaian sangat rendah
21-40	Kesesuaian rendah
41-60	Kesesuaian sedang
61-80	Kesesuaian tinggi
81-99	Kesesuaian hampir sempurna

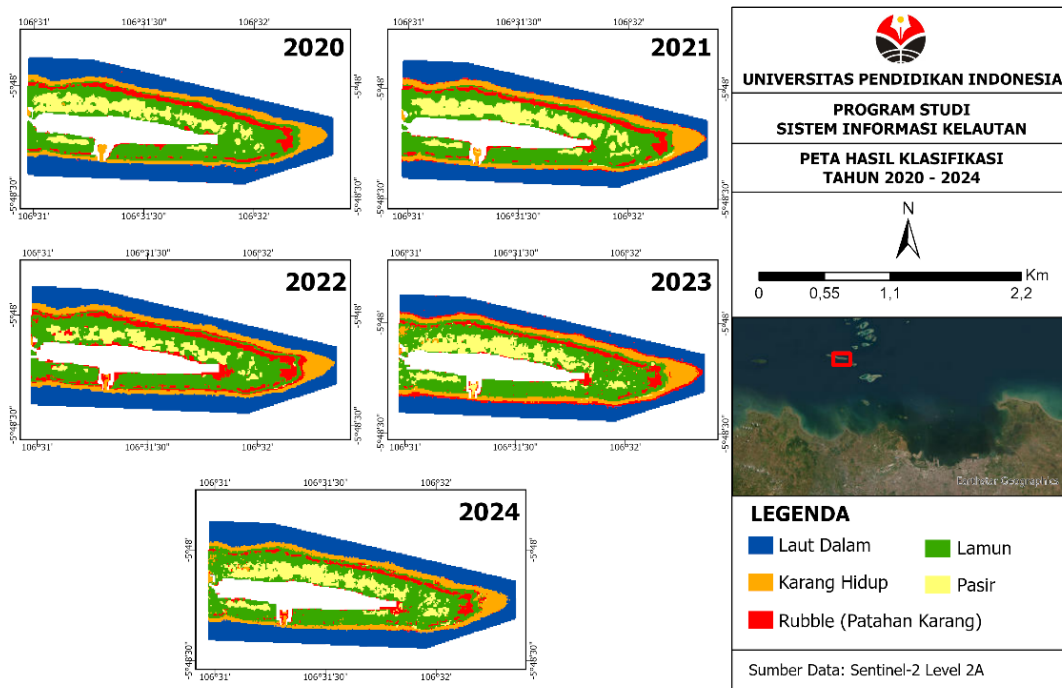
Studi literatur merupakan metode mengumpulkan data dan informasi dengan cara mencari dari beberapa sumber seperti buku, karya tulis, serta dari beberapa sumber lainnya yang memiliki hubungannya dengan objek penelitian (Ansori & Martoyo, 2024). Penelitian ini menggunakan studi literatur untuk mendukung analisis multitemporal perubahan luasan terumbu karang berdasarkan kondisi lingkungan di Perairan Pulau Tidung Kecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan klasifikasi, ditemukan bahwa hasil klasifikasi dibagi menjadi 5 kelas habitat, yaitu laut dalam diwakilkan oleh warna biru, karang hidup dengan warna *orange* yang tersebar di sekeliling pulau. Selanjutnya, terdapat kelas *rubble* (patahan karang) dengan warna merah, lamun dengan warna hijau dan pasir dengan warna kuning. Gambar 2 menyajikan peta sebaran dari tahun 2020-2024 berdasarkan hasil klasifikasi citra satelit Sentinel-2 *Level 2A*. Perubahan hasil pengelolaan klasifikasi citra dari tahun 2020, 2021, 2022, 2023 dan 2024 di perairan Pulau Tidung Kecil dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perubahan Luasan Hasil Klasifikasi Tahun 2020-2024

Kelas (ha)	Tahun				
	2020	2021	2022	2023	2024
Laut Dalam (ha)	68,44	63,94	64,77	62,39	70,52
Karang Hidup (ha)	21,01	23,58	23,25	22,32	22,09
<i>Rubble</i> (ha)	12,42	15,03	22,23	18,57	10,80
Lamun (ha)	57,03	53,23	55,86	55,96	56,60
Pasir (ha)	19,46	23,68	13,09	20,94	19,82



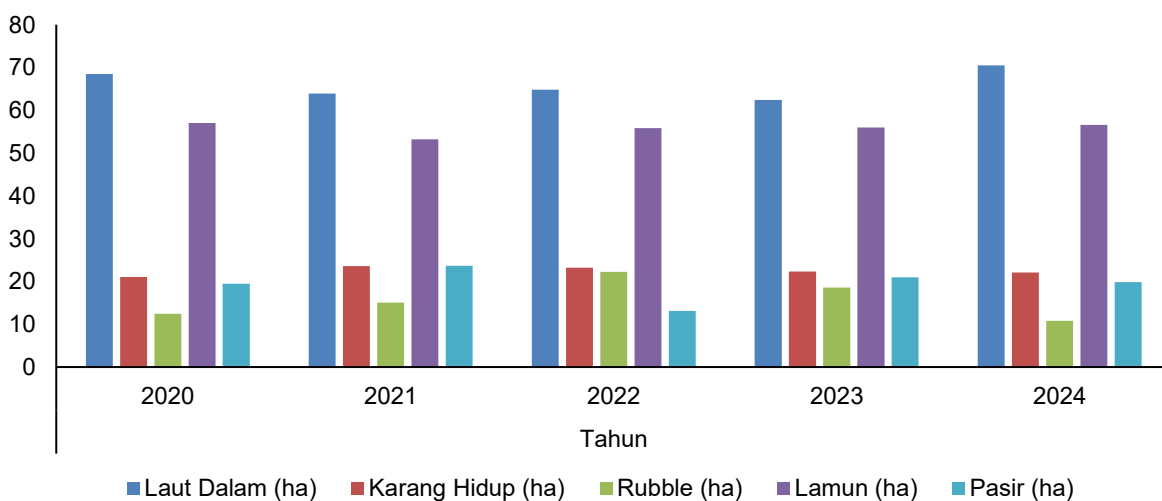
Gambar 2. Peta sebaran terumbu karang di perairan Pulau Tidung Kecil Tahun 2020 – 2024

Berdasarkan Tabel 2, perubahan luasan hasil klasifikasi menunjukkan dinamika yang bervariasi pada setiap kelas selama periode 5 tahun (2020–2024). Laut dalam dan rubble cenderung mengalami fluktuasi dengan tren peningkatan pada tahun-tahun tertentu, sedangkan karang hidup menunjukkan kecenderungan menurun. Lamun relatif stabil, sementara pasir mengalami peningkatan pada awal periode kemudian menurun hingga tahun 2024. Perubahan luasan karang hidup tahun 2020 hingga tahun 2024 di wilayah perairan Pulau Tidung Kecil cenderung mengalami penurunan dibandingkan dengan kenaikan. Secara keseluruhan, terjadi peningkatan sebesar 2,57 ha dan penurunan luasan sebesar 1,49 ha dalam rentang 5 tahun. Tahun 2020 merupakan luasan terendah karang hidup sebesar 21,01 ha serta luasan tertinggi karang hidup di tahun 2021 sebesar 23,58 ha.

Berdasarkan diagram perubahan luasan dalam periode 5 tahun (2020-2024) pada Gambar 3., luasan karang hidup mengalami peningkatan sebesar 12,23% pada periode 2020–2021, kemudian mengalami penurunan sebesar 1,40% pada periode 2021–2022, serta kembali menurun sebesar 4,00% pada periode 2022–2023 dan 1,03% pada periode 2023–2024. Sementara itu, kelas rubble dan pasir menunjukkan tren yang fluktuatif dengan kecenderungan menurun. Secara keseluruhan, perubahan ini mengindikasikan adanya dinamika kondisi ekosistem perairan di wilayah penelitian. Temuan ini sejalan dengan penelitian Hadi *et al.*, (2019) yang menyampaikan terdapatnya tekanan terhadap lingkungan di pesisir Indonesia. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan yang terjadi tidak hanya bersifat lokal, melainkan bagian dari kejadian yang lebih luas, meskipun faktor lokal tetap mempengaruhi tingkat perubahan yang terjadi.

Tabel 3. Change Detection Matrix tahun 2020 – 2024

2020 Area dalam ha	Class	2024 Area dalam ha					Total
		Laut Dalam	Karang Hidup	Rubble	Lamun	Pasir	
Laut Dalam		66,35	4,01	0,14	0,00	0,00	70,50
Karang Hidup		1,89	15,09	0,82	3,99	0,12	21,91
Rubble		0,19	0,67	4,21	4,79	0,17	10,03
Lamun		0,00	0,98	6,84	41,34	5,66	54,83
Pasir		0,00	0,10	0,02	6,11	13,51	19,74
Total		68,43	20,85	12,03	56,24	19,46	177,01



Gambar 3. Diagram perbandingan luas kelas klasifikasi

Analisis *Change Detection Matrix* dilakukan dengan membandingkan kondisi luasan bentik pada tahun 2020 dan 2024 untuk mengidentifikasi perubahan selama periode 2020 – 2024 yang disajikan pada Tabel 3. Total luasan seluas 177,01 ha dimana menampilkan perubahan yang bervariasi antar kelas. Laut dalam dan lamun memiliki tingkat luasan tertinggi, masing-masing sebesar 66,35 ha dan 41,34 ha. Akan tetapi, terjadi penurunan luasan karang hidup dari 21,91 ha menjadi 20,85 ha, yang sebagian besar terdegradasi menjadi *rubble* sebesar 0,82 ha dan teralihan menjadi lamun sebesar 3,99 ha. Sedangkan, kelas *rubble* mengalami peningkatan dari 9,84 ha menjadi 12,03 ha, terutama akibat perubahan dari kelas lamun sebesar 6,84 ha. Kelas lamun dan pasir terdeteksi mengalami ketidakstabilan, masing-masing sebesar 5,66 ha dan 6,11 ha, yang menunjukkan perubahan luasan bentik.

Hasil pengukuran parameter kualitas Perairan Pulau Tidung Kecil dilaksanakan secara langsung di lapangan, dilaksanakan di 6 stasiun pengamatan serta pengambilan dilakukan masing-masing 3 kali pengulangan. Hasil pengukuran parameter kualitas air yang disajikan pada Tabel 4.

Suhu perairan berperan dalam menentukan persebarannya serta menjadi faktor laju metabolisme, reproduksi, dan perubahan morfologi karang (Nayyiroh & Muhsoni, 2022). Hasil pengukuran suhu di perairan Pulau Tidung Kecil berkisar 30-30,67°C. Menurut KepMen LH (2004), suhu optimal untuk pertumbuhan karang sekitar 28 – 30°C, seperti pada penelitian Fauzanabri *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa kondisi suhu dalam penelitian tersebut ideal dalam mendukung pertumbuhan karang di perairan Pulau Tidung sebesar 29 - 31,3°C. Jika terjadi kenaikan suhu air laut sebesar 1-2°C di atas nilai rata-rata, serta berlangsung dengan jangka lama maka dapat menghambat pertumbuhan karang dan dapat menyebabkan *bleaching* massal (Rajabson *et al.*, 2023).

Tabel 4. Hasil Pengukuran Parameter Kualitas Air di Perairan Pulau Tidung Kecil

Stasiun	Pengulangan	Suhu (°C)	Salinitas (‰)	pH	DO (mg/l)
1	1	30	31	8,26	7,2
	2	30	30	8,26	7,3
	3	30	30	8,26	7,4
	Rata-rata	30	30,33	8,26	7,3
2	1	30	31	8,24	7,2
	2	31	32	8,24	7,2
	3	31	31	8,24	7,2
	Rata-rata	30,67	31,33	8,24	7,2
3	1	31	30	8,40	6,2
	2	30	30	8,45	6,2
	3	30	32	8,45	6,2
	Rata-rata	30,33	30,67	8,43	6,2
4	1	30	31	8,30	8,2
	2	31	30	8,30	8,0
	3	31	31	8,40	7,9
	Rata-rata	30,67	30,67	8,33	8,03
5	1	31	32	8,04	6,4
	2	30	32	8,03	6,5
	3	31	32	8,03	6,4
	Rata-rata	30,67	32	8,03	6,47
6	1	31	32	8,18	7,8
	2	31	32	8,18	7,8
	3	30	32	8,14	7,7
	Rata-rata	30,67	32	8,17	7,77

Ekosistem karang tergolong sebagai organisme *stenohalin*, organisme tersebut hanya mampu bertahan dengan perubahan salinitas yang tidak signifikan. Perubahan salinitas dapat mengganggu keseimbangan elektrokimia sel, yang pada akhirnya dapat mengurangi aktivitas metabolisme organisme laut (Sifa *et al.*, 2021). Hasil pengukuran salinitas di perairan Pulau Tidung Kecil berkisar 30,33 - 32‰, jika dibandingkan dengan baku mutu menurut KepMen LH (2004) salinitas rentang 33 - 34‰, maka nilai salinitas yang diperoleh tergolong sedikit lebih rendah. Namun demikian, nilai tersebut masih stabil untuk terumbu karang karena masih dapat hidup dengan baik di batas toleransi (Nadiansyah *et al.*, 2022). Terumbu karang akan terancam jika terjadi penurunan pH air laut yang dapat mengurangi kemampuan karang dalam membentuk rangka kalsium karbonatnya (Rajabson *et al.*, 2023). Nilai hasil rata-rata pH perairan setiap per stasiun dengan kisaran 8,03 – 8,43. Menurut KepMen LH (2004) pH optimal untuk pertumbuhan terumbu karang dalam kisaran 7 - 8,5. Kisaran tersebut masih dalam batas optimal untuk pertumbuhan karang di Perairan Pulau Tidung Kecil. Oksigen terlarut merupakan salah satu faktor yang dapat menentukan keberlangsungan biota laut (Nayyiroh & Muhsoni, 2022). Hasil dari pengukuran rata-rata oksigen terlarut setiap per stasiun berada di kisaran 6,2 - 8,03 mg/l. Nilai optimal oksigen terlarut menurut KepMen LH (2004) berada di kisaran > 5 mg/l. Sehingga, oksigen terlarut masih dalam nilai optimal untuk pertumbuhan karang di Pulau Tidung Kecil dalam kondisi baik. Kondisi parameter oseanografi yang baik akan memberikan peluang terumbu karang untuk tumbuh dan berkembang (Rajabson *et al.*, 2023).

Kenaikan luasan terumbu karang pada tahun 2020-2021 tersebut akibat dari diberlakukannya *lockdown* dan pembatasan sosial di beberapa tempat dan memiliki dampak positif terhadap keanekaragaman hayati flora dan fauna (Suryani, 2020). Berkurangnya jumlah wisatawan memberikan dampak positif pada alam, salah satunya ekosistem terumbu karang. Dampak dari pandemi COVID-19 tersebut memberikan rehabilitasi kepada ekosistem terumbu karang dan dapat memulihkan ekosistem terumbu karang (Suryatini & Rai, 2020). Studi yang dilakukan oleh Akmal *et al.*, (2024) luasan karang hidup di temukan di Perairan Pulau Pari pada tahun 2020 sebesar 331,11 ha, mengalami kenaikan pada tahun 2021 menjadi 337,23 ha. Hal tersebut dikarenakan pandemi COVID-19 seluruh kegiatan ditutup dan terumbu karang dapat pulih dengan baik tanpa gangguan aktivitas manusia. Pulau Tidung Kecil memiliki daerah konservasi, seperti terdapat program transplantasi karang. Kegiatan tersebut berkontribusi pada peningkatan luasan terumbu karang, seperti pada studi Ruban & Saiful (2023) bahwa transplantasi karang dapat dimanfaatkan sebagai upaya rehabilitasi terumbu karang yang dapat meningkatkan luasan terumbu karang. Memperbanyak koloni karang pada saat transplantasi karang dapat mempercepat regenerasi terumbu karang yang sudah rusak dan dapat dimanfaatkan kembali sebagai kawasan terumbu karang yang baru (Muzaki *et al.*, 2023). Jenis karang yang umum digunakan yaitu karang *Acropora spp.* dan *Pocillopora sp.* Menurut penelitian Kusuma *et al.* (2023) jenis karang *branching* seperti *Acropora sp.* dan *Pocillopora sp.* memiliki laju pertumbuhan lebih cepat sebesar 6 – 8 cm/tahun dengan laju pertumbuhan dari transplantasi fragmen karang sekitar 0-0,02 cm/minggu.

Penurunan luasan terumbu karang mengalami penurunan dari tahun 2021-2024 secara bertahap, dikarenakan meningkatnya kunjungan pengunjung pariwisata ke Pulau Tidung. Penurunan luasan terumbu karang secara ekologis mencerminkan degradasi habitat laut yang berdampak pada menurunnya keanekaragaman hayati, terganggunya rantai makanan, dan hilangnya fungsi karang sebagai pelindung pesisir. Kerusakan karang juga berdampak pada penurunan populasi ikan, kerugian ekonomi masyarakat pesisir, serta meningkatnya kerentanan lingkungan terhadap perubahan iklim dan aktivitas manusia (Arifin & Nasruddin, 2022). Pelemparan jangkar kapal serta kegiatan *snorkeling* oleh wisatawan tanpa pengawasan dari profesional maupun penduduk lokal berpengalaman. Dampak untuk terumbu karang di zona tersebut mengalami kerusakan, baik karena terinjak secara langsung atau kontak fisik secara langsung yang menyebabkan karang patah (Ekel *et al.*, 2021). Aktivitas *snorkeling* di Pulau Tidung dengan perbandingan jumlah pemandu dan wisatawan tidak seimbang seperti 30 wisatawan dan 1 pemandu, idealnya adalah 1 pemandu mendampingi maksimal 5 orang agar pemandu tidak kesulitan mengarahkan para wisatawan (Darmawan *et al.*, 2023). Penurunan luasan karang hidup di temukan dalam penelitian Akmal *et al.* (2024) di Perairan Pulau Pari, temuan tersebut luasan karang pada tahun 2021 sebesar 337,23 ha, mengalami penurunan pada tahun 2022 menjadi 331,83 ha. Penurunan tersebut dikarenakan aktivitas pariwisata.

Aktivitas beberapa nelayan dari luar pulau dalam menangkap ikan dengan cara tidak ramah lingkungan dapat merusak ekosistem terumbu karang dan masih dijumpai di perairan Pulau Tidung Kecil, mereka menangkap ikan tersebut di tempat area terumbu karang yang masih baik (Suhaika *et al.*, 2023). Menurut Yulianto *et al.*, (2021) menggunakan jaring ikan karang dapat merusak ekosistem terumbu karang. Mayoritas spesies ikan hias laut yang ditangkap di daerah terumbu karang dapat menjadi ancaman degradasi terumbu karang, karena alat tidak ramah lingkungan tersebut (Andriyono *et al.*, 2024). Ikan yang diambil terus menerus akan terjadi *overfishing* dapat menyebabkan populasi spesies ikan berkurang dalam ekosistem karang, sehingga dapat mengakibatkan ketidakseimbangan ekosistem (Nabilla & Anggriyani, 2024). Temuan lain dalam penelitian Kurniawati *et al.* (2025) di perairan Desa Pengudang, Bintan mendapatkan hasil data luasan karang hidup dari tahun 2018 sebesar 138 ha dan 2023 mengalami penurunan sebesar 43 ha, penurunan tersebut dikarenakan aktivitas antropogenik yang tinggi, salah satunya aktivitas penangkapan ikan tidak ramah lingkungan oleh nelayan.

Hasil *ground check* menunjukkan adanya kerusakan fisik terumbu karang pada area pariwisata dan sekitar dermaga, berupa patahan karang, indikasi bleaching, serta keberadaan sampah. Kerusakan juga lebih dominan ditemukan di bagian selatan dibandingkan utara, yang dipengaruhi oleh intensitas lalu lintas kapal yang lebih tinggi di area tersebut. Kerusakan terumbu karang yang disebabkan oleh pencemaran sampah dan limbah sering ditemui di beberapa pulau di Kepulauan Seribu. Umumnya sampah dan limbah tersebut berasal dari daratan Jakarta, dan sampai ke pulau-pulau kecil (Utami & Anggoro, 2021). Keberadaan sampah di perairan wilayah penelitian menunjukkan terdapatnya tekanan antropogenik terhadap ekosistem terumbu karang (Husmayani *et al.*, 2024). Sampah laut (*marine debris*) memiliki dampak negatif yang dapat merusak struktur karang, menurunkan intensitas cahaya sehingga menghambat proses fotosintesis di terumbu karang, hal tersebut dapat membuat matinya karang dan merusak karang (Husmayani *et al.*, 2024). Temuan dalam penelitian Isdianto *et al.*, (2024) mendapatkan temuan bahwa sampah laut di Taman Alam Pulau Sempu sebesar 84,65% menyebabkan kerusakan terumbu karang seperti penyakit karang, yang menghambat pertumbuhan terumbu karang.

Keberadaan kapal nelayan yang melintasi area ekosistem terumbu karang dan kapal wisata yang membawa pengunjung untuk melakukan *snorkeling* yang berpotensi memberikan tekanan tambahan. Meskipun tidak terdeteksi secara langsung adanya pembuangan limbah, aktivitas kapal dapat menimbulkan tumpahan minyak atau bahan pencemar lainnya yang dapat merusak ekosistem terumbu karang (Ardalina *et al.*, 2024). Studi oleh Widiastiti *et al.*, (2021) menunjukkan dampak dari pencemaran seperti tumpahan minyak dari beberapa kapal di lokasi perairan Tanjung Benoa yang merupakan daerah wisata bahari, dampak tersebut menyebabkan gangguan kesehatan karang bahkan mematikan karang. Temuan ini menunjukkan bahwa terdapat tekanan antropogenik berupa sampah dan limbah menjadi salah satu faktor pembatas dalam pertumbuhan ekosistem terumbu karang di lokasi penelitian. Sedangkan parameter kualitas air secara umum masih berada dalam kisaran yang dapat ditoleransi oleh terumbu karang, sehingga tidak menunjukkan hubungan langsung dengan penurunan luasan terumbu karang. Uji akurasi menggunakan *confusion matrix* dari hasil klasifikasi dan *ground check* menggunakan metode *stop and go*, diperoleh nilai akurasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Uji akurasi menggunakan *confusion matrix* pada Tabel 5, laut dalam memiliki nilai *Producer Accuracy* (PA) dan *User Accuracy* (UA) yang tinggi terbesar yaitu 100%, yang menunjukkan bahwa laut dalam diidentifikasi dengan sangat baik dari sisi PA maupun UA. Hal ini menunjukkan bahwa kesalahan klasifikasi pada laut dalam rendah. Nilai *Producer Accuracy* (PA) dan *User Accuracy* (UA) karang hidup sebesar 95%, yang mengindikasikan tingkat kesesuaian sangat baik. Kelas *rubble* dan lamun menunjukkan nilai UA yang lebih rendah sebesar 80,95% dibandingkan PA sebesar 85%, yang mengindikasikan adanya kesalahan komisi pada kelas tersebut. Sedangkan, pasir memiliki nilai UA sebesar 94,44% dengan PA lebih rendah 85%, yang mengindikasikan adanya kesalahan omisi. Diperoleh nilai *Overall Accuracy* (OA) sebesar 90%, hasil ini sudah memenuhi standar yang sudah ditetapkan oleh Badan Informasi Geospasial (2014) hasil minimal harus mencapai lebih dari 60%. Sedangkan nilai koefisien kappa sebesar 0.875 atau setara dengan 87,5%, hasil ini sudah termasuk kategori "Kesesuaian hampir sempurna" (Viera & Garrett, 2005).

Tabel 5. Confusion Matrix

Kelas	Producer Accuracy	User Accuracy
Laut Dalam	100%	100%
Karang Hidup	95%	95%
Rubble	85%	80,95%
Lamun	85%	80,95%
Pasir	85%	94,44%
OA	90%	
Kappa	0,875	

Hasil akurasi yang cukup tinggi ini disebabkan salah satunya yaitu rendahnya tutupan awan (Fuad *et al.*, 2022). Kesalahan klasifikasi terjadi setiap kelas disebabkan terjadi pada saat proses segmentasi, jika segmentasi melebihi objek maka akan terjadi *over segmentation*. Selain itu kesalahan pada klasifikasi juga terjadi pada proses mempertimbangkan visual warna yang berkesinambungan dengan informasi spektral (Rahmani *et al.*, 2022). Faktor lainnya yang dapat mengurangi nilai akurasi yaitu perbedaan waktu pada saat *ground check* dan perekaman citra yang dapat mengubah informasi spektral, terdapat kesalahan pada saat mengambil *training area* tiap kelasnya, dan kesalahan proses penentuan terhadap objek habitat bentik di perairan dangkal (Karang *et al.*, 2019).

KESIMPULAN

Perubahan luasan terumbu karang di Pulau Tidung Kecil mengalami kenaikan dan penurunan sepanjang tahun 2020-2024. Luasan karang hidup pada tahun 2020 sebesar 21,01 ha, pada tahun 2021 sebesar 23,58 ha, kemudian pada tahun 2022 sebesar 23,25 ha, tahun 2023 sebesar 22,32 ha dan tahun 2024 sebesar 22,09 ha. Nilai *Overall accuracy* (OA) pada klasifikasi citra sebesar 90% dengan koefisien kappa sebesar 0,875. Berdasarkan pengamatan parameter kualitas air di perairan Pulau Tidung Kecil pengambilan sampel pada 6 stasiun, menunjukkan bahwa kondisi lingkungan perairan Pulau Tidung Kecil dalam kondisi baik. 2. Berdasarkan pengamatan parameter kualitas air di perairan Pulau Tidung Kecil pengambilan sampel pada 6 stasiun, menunjukkan bahwa kondisi lingkungan perairan Pulau Tidung Kecil dalam kondisi baik. Penurunan luasan terumbu karang disebabkan oleh faktor antropogenik, seperti aktivitas pariwisata, penangkapan ikan dengan alat tangkap yang tidak ramah lingkungan, serta pencemaran dari sampah dan limbah, sedangkan peningkatan luasan terumbu karang terjadi pada periode tertentu yang diduga akibat berkurangnya tekanan aktivitas antropogenik selama masa pandemi COVID-19 dan adanya program rehabilitasi seperti transplantasi karang.

DAFTAR PUSTAKA

- Afgatiani, P.M. & Shinio, R. 2024. Comparative analysis multispatial imagery for coral and seagrass distribution mapping. *2024 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)*: 1–5. DOI: 10.1109/ICARES64249.2024.10768084.
- Akla, C.M.N., Erlangga, E., Sembiring, R.T.L., Erniati, E. & Imanullah, I. 2022. Hubungan tutupan karang terhadap kelimpahan ikan karang menggunakan metode LIT (Line Intercept Transect) di Keude Bungkaih, Aceh Utara. *Jurnal Kelautan Nasional*, 17(3): 199–208. DOI: 10.15578/jkn.v17i3.10985.
- Akmal, F., Semedi, B. & Ulfa, A. 2024. Spatio-temporal analysis of changes in coral reef area using Landsat 8 satellite imagery on Pari Island, Kepulauan Seribu, DKI Jakarta. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 21(1): 83–95.

- Alifatri, L.O., Prayudha, B. & Anggraini, K. 2022. Klasifikasi habitat bentik berdasarkan citra Sentinel-2 di Kepulauan Kei, Maluku Tenggara. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(3): 372–384. DOI: 10.18343/jipi.27.3.372.
- Andriyono, S., Kartika, G.R.A., Syarif, A.F. & Alam, M.J. 2024. Management challenges of marine ornamental fish and their utilization as the sustainable potential marine resources. *Journal of Aquaculture Science*, 9(2): 55–62. DOI: 10.24073/joas.v9i2.56567.
- Anggraini, D.P., Anis Syafitri, Tedy Putra & Titin Rahmayanti Rambe. 2023. Pengenalan ekosistem terumbu karang pada mahasiswa Program Studi Pendidikan IPA STKIP Al Maksum Langkat. *Jurnal Abdimas Maduma*, 2(2): 68–74. DOI: 10.52622/jam.v2i2.205.
- Ansori, A. & Martoyo, M. 2024. Mencari tambah ilmu. *Pengertian: Jurnal Pendidikan Indonesia (PJPI)*, 2(1): 137–144. DOI: 10.61930/pjpi.v2i1.
- Ardalina, D.O., Amelia, R. & Nopiani, N. 2024. Pola regulasi pemerintah daerah dalam memitigasi tumpahan minyak di wilayah pesisir Pantai Kabupaten Bangka Tengah berdasarkan prinsip Sustainable Development Goals. *AKADEMIK: Jurnal Mahasiswa Humanis*, 4(3): 1267–1276. DOI: 10.37481/jmh.v4i3.1074.
- Arifin, A.N. & Nasruddin. 2022. Kerusakan lingkungan laut pada ekosistem terumbu karang di Kabupaten Maluku Tenggara akibat faktor alam dan aktivitas manusia (physico natural features environmental analysis). *Jurnal Penelitian Multidisiplin*, 1(2): 56–60.
- Aulia, Z.S., Ahmad, T.T., Ayustina, R.R., Hastono, F.T., Hidayat, R.R., Mustakin, H., Fitrianto, A. & Rifanditya, F.B. 2020. Shallow water seabed profile changes in 2016–2018 based on Landsat 8 satellite imagery (case study: Semak Daun Island, Karya Island and Gosong Balik Layar). *Omni-Akuatika*, 16(3): 26–32. DOI: 10.20884/1.oa.2020.16.3.848.
- Cindewiyani & Herdiansyah, H. 2019. The health of coral reefs and underwater ecosystems in shallow waters: study on Tidung Island. *AIP Conference Proceedings*, 2120: 1–7. DOI: 10.1063/1.5115655.
- Congalton, R.G. & Green, K. 2009. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices, second edition. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(6): 448–449. DOI: 10.1016/j.jag.2009.07.002.
- Darmawan, R., Abidin, J., Agustin, R., Sahara, L.S. & Fedrina, R. 2023. Pelatihan safety management bagi tour guide dan local tour operator dalam pengelolaan wisata edukasi bahari Pulau Tidung. *Satwika: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(2): 121–129. DOI: 10.21009/satwika.020207.
- Dimara, A., Hamuna, B. & Lisiard Dimara, D. 2020. Pemanfaatan citra satelit Sentinel-2A untuk pemetaan habitat dasar perairan dangkal (studi kasus: Teluk Humboldt, Kota Jayapura). *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan Papua*, 3(1): 25–31. DOI: 10.31957/acr.v3i1.1213.
- Ekel, J.R., Manembu, I.S., Manengkey, H.W.K., Roeroe, K.A., Ompi, M. & Sambali, H. 2021. Diversity of coral genus Scleractinia in Tidung Island waters, Seribu Islands, DKI Jakarta Province. *Jurnal Ilmiah PLATAX*, 9(2): 157. DOI: 10.35800/jip.9.2.2021.34917.
- ESA. 2015. Sentinel-2 user handbook. European Space Agency (issue 1).
- Fauzanabri, R., Manembu, I.S., Schaduw, J.N.W., Manengkey, H.W.K., Sinjal, C.A.L. & Ngangi, E.L.A. 2021. Status of coral reefs in the waters of Tidung Island Kepulauan Seribu DKI Jakarta Province based on underwater photo transect analysis. *Jurnal Ilmiah PLATAX*, 9(2): 247. DOI: 10.35800/jip.9.2.2021.34902.
- Fuad, M.A.Z., Ramadhani, M.F.N., Dewi, C.S.U., Fikri, M.A. & Herdikusuma, E.B. 2022. Pemetaan terumbu karang dengan citra satelit Sentinel-2 dan analisis kondisi karang di kawasan Pantai Pasir Putih, Situbondo Jawa Timur. *Jurnal Pendidikan Geografi*, 27(1): 73–87. DOI: 10.17977/um017v27i12022p73-87.
- Ginting, J. 2023. Analisis kerusakan terumbu karang dan upaya pengelolaannya. *Jurnal Kelautan dan Perikanan Terapan (JKPT)*, 1: 53–59. DOI: 10.15578/jkpt.v1i0.12066.
- Hadi, T.A., Abrar, M., Giyanto, Prayudha, B., Johan, O., Budiyanto, A., Dzumalek, A.R., Alifatri, L.O., Sulha, S. & Suharsono, S. 2019. The status of Indonesian coral reefs 2019. Research Center for Oceanography.

- Hapsari, L.P., Anthonny Djari, A. & Ghifara, T.A. 2022. Pemodelan hidrodinamika pola arus dan pasang surut di perairan Pulau Tidung. *Maspari Journal*, 14(2): 79–89.
- Husmayani, W.O., Zamani, N.P., Ismet, M.S., Natih, N.M.N. & Sallatu, M.A. 2024. Analisis karakteristik marine debris terhadap persentase tutupan terumbu karang di perairan Wangi-Wangi Taman Nasional Wakatobi. *Jurnal Kelautan Tropis*, 27(2): 357–368. DOI: 10.14710/jkt.v27i2.23052.
- Isdianto, A., Pangestu, W.S., Yamindago, A., Dewi, C.S.U., Aliviyanti, D., Luthfi, O.M., Setyoningrum, D., Fathah, A.L., Putri, B.M. & Puspitasari, I.D. 2024. The occurrence of marine debris and its impacts on coral reefs in the Sempu Island Nature Reserve, Malang, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 25(9): 70–80. DOI: 10.12911/22998993/190514.
- Karang, I.W.G.A., Nagendra, I.W.M.D., Astaman, I.D.M.K.P. & Hendrawan, I.G. 2019. Pemetaan habitat perairan dangkal di kawasan padat wisata Tanjung Benoa Bali menggunakan data remote sensing. *ECOTROPIC: Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science)*, 13(2): 227–237. DOI: 10.24843/EJES.2019.v13.i02.p10.
- Kurniawati, E., Apdillah, D. & Safitri, J. 2025. Pemetaan habitat bentik menggunakan citra Sentinel-2A dengan algoritma Maximum Likelihood Classification di Desa Pengudang. *Journal of Marine Research*, 14(2): 263–276. DOI: 10.14710/jmr.v14i2.48946.
- Kusuma, A.H., Arifin, T. & Kusumantoro, B.W. 2023. Growth rate of coral transplantation of *Acropora formosa* in Tidung Island, Kepulauan Seribu Regency, Province of DKI Jakarta. *Jurnal Biologi Tropis*, 23(4): 164–170. DOI: 10.29303/jbt.v23i4.5485.
- Lyzenga, D.R. 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3): 379–383. DOI: 10.1364/ao.17.000379.
- Lyzenga, D.R. 1981. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(1): 71–82. DOI: 10.1080/01431168108948342.
- Menteri Negara Lingkungan Hidup. 2004. Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut. Jakarta.
- Muhtar, F., Armijon, A., Murdapa, F. & Fadly, R. 2019. Analisa luasan terumbu karang di perairan Pulau Tegal Lampung dengan teknologi penginderaan jauh. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 5(2): 55–67.
- Munawaroh, Rudiastuti, A.W., Dewi, R.S., Ramadhani, Y.H., Rahadiati, A., Sutrisno, D., Ambarwulan, W., Pujawati, I., Suryanegara, E., Wijaya, S.W. & Hartini, S. 2021. Benthic habitat mapping using Sentinel 2A: a preliminary study in image classification approach in an absence of training data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 750(1): 012029. DOI: 10.1088/1755-1315/750/1/012029.
- Muzaki, F.K., Syahroni, N., Saptarini, D., Wisesa, I.N.S.B., Budiman, K.F. & Pratama, A.R. 2023. Rangka baja bersalut pasir sebagai media transplantasi untuk rehabilitasi terumbu karang rusak di Pagerungan Besar, Sumenep. *Sewagati*, 8(2): 1285–1294. DOI: 10.12962/j26139960.v8i2.653.
- Nabilla, N. & Anggriyani, F.C.W. 2024. Kerusakan lingkungan akibat aktivitas manusia pada ekosistem terumbu karang. *Jurnal Pendidikan dan Ilmu Sosial*, 2(2): 169–172. DOI: 10.22146/mgi.15626.
- Nadiansyah, N., Idiawati, N. & Nurrahman, Y.A. 2022. Struktur komunitas terumbu karang di bagian selatan Pulau Kabung, Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat. *Jurnal Laut Khatulistiwa*, 5(3): 116–124. DOI: 10.26418/lkuntan.v5i3.56449.
- Nandika, M.R., Ulfa, A., Ibrahim, A. & Purwanto, A.D. 2023. Assessing the shallow water habitat mapping extracted from high-resolution satellite image with multi classification algorithms. *Geomatics and Environmental Engineering*, 17(2): 69–87. DOI: 10.7494/geom.2023.17.2.69.
- Nayyiroh, D.Z. & Muhsoni, F.F. 2022. Evaluasi kondisi terumbu karang di Pulau Gili Labak Kabupaten Sumenep. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 3(4): 125–133. DOI: 10.21107/juvenil.v3i4.17511.
- Nguyen, T., Liquet, B., Mengersen, K. & Sous, D. 2021. Mapping of coral reefs with multispectral satellites: a review of recent papers. *Remote Sensing*, 13(21): 4470. DOI: 10.3390/rs13214470.

- Noviana, L., Arifin, H.S., Adrianto, L. & Kholil, K. 2018. Studi ekosistem terumbu karang di Taman Nasional Kepulauan Seribu. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 9(2): 352–365. DOI: 10.29244/jpsl.9.2.352-365.
- Nuha, M.U., Basith, A., Asriningrum, W., Winarso, G. & Setiawan, K.T. 2019. Hubungan konstanta atenuasi dengan konstituen air pada perairan Pelabuhan Karimunjawa. *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 2(1): 63–70. DOI: 10.14710/elipsoida.2019.4858.
- Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial. 2014. Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 8 Tahun 2014: Pedoman teknis pengumpulan dan pengolahan data geospasial habitat dasar perairan laut dangkal (vol. 1).
- Putra, I.G.P.B.A., Putra, I.D.N.N. & Putra, I.N.G. 2023. Pemetaan sebaran habitat dasar perairan laut dangkal menggunakan citra Sentinel-2A di Teluk Gilimanuk. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 9(1): 18–28. DOI: 10.24843/jmas.2023.v09.i01.p03.
- Putra, M.G.A., Zamani, N.P., Natih, N.M.N. & Yuliardi, A.Y. 2022. Potensi sumber dan sebaran sampah laut di ekosistem terumbu karang perairan Pulau Kelapa, Pulau Kelapa Dua, dan Pulau Harapan, DKI Jakarta. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(2): 244–253. DOI: 10.24843/jmas.2022.v08.i02.p09.
- Putri, K.A. & Setiawan, B. 2024. Analisis partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah di kawasan wisata bahari Pantai Tanjung Pasir. *Jurnal Pariwisata dan Perhotelan*, 2(1): 1–12. DOI: 10.47134/pjpp.v2i1.3321.
- Rahmani, E., Karang, I.W.G.A. & Nurweda Putra, I.D.N. 2022. Pemetaan habitat benthik menggunakan citra Sentinel-2A dan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) di perairan Pemuteran, Bali. *Journal of Marine Research and Technology*, 5(1): 29. DOI: 10.24843/JMRT.2022.v05.i01.p06.
- Rajabson, M.H.S., Rachmayani, R. & Sarasvati, P.N. 2023. Kesesuaian kondisi oseanografi dalam mendukung ekosistem terumbu karang di Pantai Mengiat, Nusa Dua Bali. *Applied Environmental Science*, 1(1): 12–18. DOI: 10.61511/aes.v1i1.2023.60.
- Rombe, K.H., Patta, T., Surachmat, A., Amiluddin, M., Arafat, Y., Mustafa, M. & Hawati, H. 2024. Pemetaan luasan sebaran lamun di Desa Barugaia Kecamatan Bontomanai Kabupaten Kepulauan Selayar. *Jurnal Salamata*, 6(2): 59–63. DOI: 10.15578/salamata.v6i2.13723.
- Ruban, A. & Saiful, S. 2023. Transplantasi terumbu karang untuk pemanfaatan berkelanjutan. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara*, 4(4): 51–58. DOI: 10.55338/jpkmn.v4i4.1798.
- Semedi, B., Rofiq Syukron, B.A. & Lutfi, O.M. 2019. Pemanfaatan data citra satelit Sentinel-2 untuk asesmen habitat dasar perairan Pantai Selatan Sempu Kabupaten Malang. *JFMR-Journal of Fisheries and Marine Research*, 3(2): 155–161. DOI: 10.21776/ub.jfmr.2019.003.02.19.
- Sifa, Z.F., Purnomo, P.W. & Ayuningrum, D. 2021. Pelepasan densitas zooxanthellae karang *Acropora sp.* pada beberapa tingkat salinitas. *Saintek Perikanan: Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology*, 17(2): 151–156. DOI: 10.14710/ijfst.17.2.151-156.
- Suhaika, N.Q., Martanto, R., Azriel, M., Nurazizah, M., Salsabilla, L.F., Fikri, M., Sriwijaya, L.M.A., Auliansyah, D., Firdaus, E.D. & Suryanda, A. 2023. Condition of coral cover area in the northern region of Tidung Kecil Island, Thousand Islands. *Biological Environment and Pollution*, 3(1): 25–31. DOI: 10.31763/bioenvipo.v3i1.629.
- Suryani, A.S. 2020. Dampak pandemi Covid-19 terhadap lingkungan global. *Bidang Kesejahteraan Sosial*, 12(13): 13–18.
- Suryatini, K.Y. & Rai, G.A. 2020. Potential for recovery of coral reef ecosystem: positive impact of the Covid-19 pandemic on the environment. *Jurnal Emasains: Jurnal Edukasi Matematika dan Sains*, 9(2): 206–215. DOI: 10.5281/zenodo.4301137.
- Suryono, S., Ambariyanto, Munasik, Ario, R., Pratikto, I., Taufiq-SPJ, N., Canavaro, S.V., Anggita, T., Prayogi, P. & Supryhatun, E. 2022. Perubahan luas terumbu karang di Pulau Panjang, Jepara. *Jurnal Kelautan Tropis*, 25(3): 337–344. DOI: 10.14710/jkt.v25i3.10249.
- Utami, R.T. & Anggoro, A. 2021. Status kondisi terumbu karang di perairan Bengkulu dan Kepulauan Seribu, Jakarta. *Jurnal Enggano*, 6(1): 188–200. DOI: 10.31186/jenggano.6.1.188.

- Viera, A.J. & Garrett, J.M. 2005. Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. *Family Medicine*, 37(5): 360–363.
- Widiastiti, N.M.A., Arthana, I.W. & Astarini, I.A. 2021. Strategi pengelolaan ekosistem terumbu karang di daerah wisata air Tanjung Benoa dan Jemeluk Amed, Bali. *ECOTROPHIC: Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science)*, 15(1): 36. DOI: 10.24843/EJES.2021.v15.i01.p04.
- Yarmazen, N. & Kurniawati, E. 2024. Benthic habitat classification using Sentinel-2A image with and without water column correction in Pengudang Village, Bintan Regency. *Aurelia: Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Indonesia*, 3(1): 82–93. DOI: 10.57235/aurelia.v3i1.1299.
- Yulianto, E.S., Prpto, I.P., Rihmi, M.K., Rahman, M.A., Sukandar, S., Wiadnya, D.G.R., Muntaha, A. & Sunardi, S. 2021. Rancang bangun dan uji hidrostatis bubu multifunnel untuk penangkapan ikan karang. *Journal of Innovation and Applied Technology*, 7(1): 1138–1144. DOI: 10.21776/ub.jiat.2021.007.01.3.