

Spatial Analysis of Shallow Sea Benthic Habitats Based on Sentinel-2A Imagery in the Southern Waters of Manado Bay

Analisis Spasial Habitat Bentik Laut Dangkal Berbasis Citra Sentinel-2A di Perairan Teluk Manado Bagian Selatan

Kevin J. P. Antou, Ari B. Rondonuwu, Unstain N. J. W. Rembet, Lusia Manu, Kurniati Kemer, Vivanda O. J. Modaso.

Program Studi Ilmu Perairan, Pascasarjana, Universitas Sam Ratulangi Manado.

Corresponding author: kjean1572@gmail.com

Manuscript received: 19 Nov. 2025. Revision accepted: 19 Jan. 2026

Abstract. The southern coastal region of Manado Bay is experiencing intensive development pressure alongside increasing tourism activities and marine space utilization. These conditions have the potential to cause degradation of shallow-water benthic habitats, which play a vital ecological role. This study aims to map and analyze the spatio-temporal changes of shallow-water benthic habitats in southern Manado Bay using Sentinel-2A satellite imagery as the primary data source. Analysis was conducted using Sentinel-2A imagery from the 2017-2023 period through stages of image pre-processing, water column correction, and unsupervised classification using the K-means algorithm. Evaluation of the classification results was performed using an error matrix to obtain overall accuracy and Kappa coefficient values. The results indicate that the overall accuracy ranged from 72-78% with Kappa coefficients between 0.60-0.71. Spatio-temporal analysis indicates a significant decline in live coral cover from 41.09% to 28.17% during the 2017-2023 period, accompanied by an increase in dead coral area and sand substrates. These findings demonstrate that Sentinel-2A imagery can be effectively utilized for monitoring the dynamics of shallow-water benthic habitats at a regional scale and has the potential to support sustainable coastal zone planning and management.

Keywords: *Change Detection, Coastal Management, Sentinel-2A, Benthic Habitat.*

Abstrak. Wilayah pesisir selatan Teluk Manado mengalami tekanan pembangunan yang intensif seiring dengan meningkatnya aktivitas pariwisata dan pemanfaatan ruang laut. Kondisi ini berpotensi menyebabkan degradasi habitat bentik perairan dangkal, yang memainkan peran ekologis vital. Studi ini bertujuan untuk memetakan dan menganalisis perubahan spasial-temporal habitat bentik perairan dangkal di selatan Teluk Manado menggunakan citra satelit Sentinel-2A sebagai sumber data utama. Analisis dilakukan menggunakan citra Sentinel-2A dari periode 2017-2023 melalui tahapan pra-pemrosesan citra, koreksi kolom air, dan klasifikasi tanpa pengawasan menggunakan algoritma K-means. Evaluasi hasil klasifikasi dilakukan menggunakan matriks kesalahan untuk mendapatkan akurasi keseluruhan dan nilai koefisien Kappa. Hasil menunjukkan bahwa akurasi keseluruhan berkisar antara 72-78% dengan koefisien Kappa antara 0,60-0,71. Analisis spasial-temporal menunjukkan penurunan signifikan pada tutupan karang hidup dari 41,09% menjadi 28,17% selama periode 2017-2023, disertai dengan peningkatan luas karang mati dan substrat pasir. Temuan ini menunjukkan bahwa citra Sentinel-2A dapat dimanfaatkan secara efektif untuk memantau dinamika habitat bentik perairan dangkal pada skala regional dan berpotensi mendukung perencanaan dan pengelolaan zona pesisir yang berkelanjutan.

Kata kunci: *Deteksi Perubahan, Pengelolaan Pesisir, Sentinel-2A, Habitat Bentik*

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir dan laut merupakan kawasan dengan tingkat pemanfaatan yang tinggi karena menyediakan sumber daya alam yang produktif, baik sebagai sumber pangan, mineral dan energi, media transportasi, maupun kawasan rekreasi dan pariwisata. Karakteristik wilayah pesisir yang beragam menjadikannya sebagai kawasan strategis namun rentan terhadap tekanan akibat aktivitas manusia, seperti permukiman, pariwisata bahari, perikanan tangkap, konservasi, budidaya, reklamasi, serta pembangunan infrastruktur pendukung (Djunarsjah et al., 2009; Bagen, 2000; Opa, 2011; Hudha et al., 2019a).

Perubahan tutupan lahan di wilayah pesisir, khususnya akibat kegiatan reklamasi dan pembangunan pesisir, berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap keseimbangan ekosistem. Perubahan tersebut dapat mengganggu struktur dan fungsi ekosistem pesisir, menurunkan daya dukung lingkungan, serta mengurangi kemampuan ekosistem dalam menyimpan karbon dan melakukan pemulihan alami (Rudianto, 2014; Novianti, 2012; Siripanji, 2013). Oleh karena itu, pengelolaan wilayah pesisir membutuhkan perencanaan yang terpadu dan berbasis data spasial yang akurat.

Dalam rangka menjamin keberlanjutan pengelolaan wilayah pesisir, Pemerintah

Provinsi Sulawesi Utara menetapkan Peraturan Daerah Nomor 1 Tahun 2017 tentang Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K) Provinsi Sulawesi Utara Tahun 2017–2037. RZWP3K merupakan instrumen pengelolaan ruang laut yang mengatur arah pemanfaatan sumber daya pada setiap satuan perencanaan, termasuk penetapan kegiatan yang diperbolehkan, dibatasi, atau dilarang sesuai dengan Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2014 (Kasworo, 2017).

Kawasan Teluk Manado merupakan kawasan pesisir yang bersifat dinamis dan strategis, khususnya sejak ditetapkan sebagai bagian dari Kawasan Super Prioritas Nasional (KSPN) melalui Peraturan Presiden Nomor 3 Tahun 2016. Pengembangan kawasan ini, terutama pada bagian selatan Teluk Manado, ditujukan untuk mendukung sektor pariwisata bahari. Namun demikian, pelaksanaan pembangunan pesisir di kawasan ini dinilai belum sepenuhnya memperhatikan karakteristik ekologis dan kesesuaian dengan fungsi zonasi yang telah ditetapkan (Hudha, 2019b).

Sebagian wilayah Teluk Manado bagian selatan masih memiliki ekosistem terumbu karang yang tergolong baik dan berperan penting sebagai habitat bentik laut dangkal, yang mendukung aktivitas wisata bahari, konservasi, dan penelitian. Akan tetapi, pembangunan pesisir yang terus berlangsung memunculkan berbagai kritik dan penolakan dari masyarakat akibat dugaan dampak terhadap ekosistem tersebut. Keterbatasan kegiatan pemetaan sumber daya laut dangkal di perairan Sulawesi Utara menyebabkan minimnya ketersediaan data spasial habitat bentik laut dangkal, sehingga menyulitkan evaluasi perubahan lingkungan dan pengambilan keputusan pengelolaan wilayah pesisir.

Penyediaan data spasial tutupan habitat bentik laut dangkal yang akurat dan berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak sebagai dasar perencanaan, pengendalian pemanfaatan ruang laut, serta evaluasi kesesuaian pembangunan pesisir dengan rencana zonasi. Data tersebut diharapkan dapat menjadi data dasar (baseline) dalam mendukung pengelolaan ekosistem pesisir Teluk Manado secara berkelanjutan.

Tujuan Penelitian

- Melakukan analisis tutupan habitat bentik laut dangkal Teluk Manado Bagian Selatan Tahun 2017-2023.
- Melakukan analisis spasial tutupan habitat bentik laut dangkal Teluk Manado bagian Selatan Tahun 2024.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Teluk Manado bagian Selatan Provinsi Sulawesi Utara dengan beberapa tahapan penelitian meliputi pengumpulan data primer dan pengumpulan data sekunder analisis data. Waktu penelitian akan dilaksanakan pada bulan juni - juli 2024.

Koreksi Kolom Air

Koreksi kolom air dilakukan pasca-koreksi sunglint melalui dua tahapan utama: (1) masking citra menggunakan metode Depth Invariant Index (DII) pada perangkat lunak SNAP Sen2Cor, dan (2) transformasi Lyzenga (1978). Algoritma ini memproses nilai piksel dari Region of Interest (ROI) pada citra Sentinel-2 untuk meminimalisir pengaruh kedalaman terhadap reflektansi dasar perairan. Persamaan yang digunakan adalah:

$$DII = Ln(RBi) - ((ki/kj) \times Ln(RBj))$$

Keterangan :

DII = Invarian indeks kedalaman bawah air (Lyzenga)

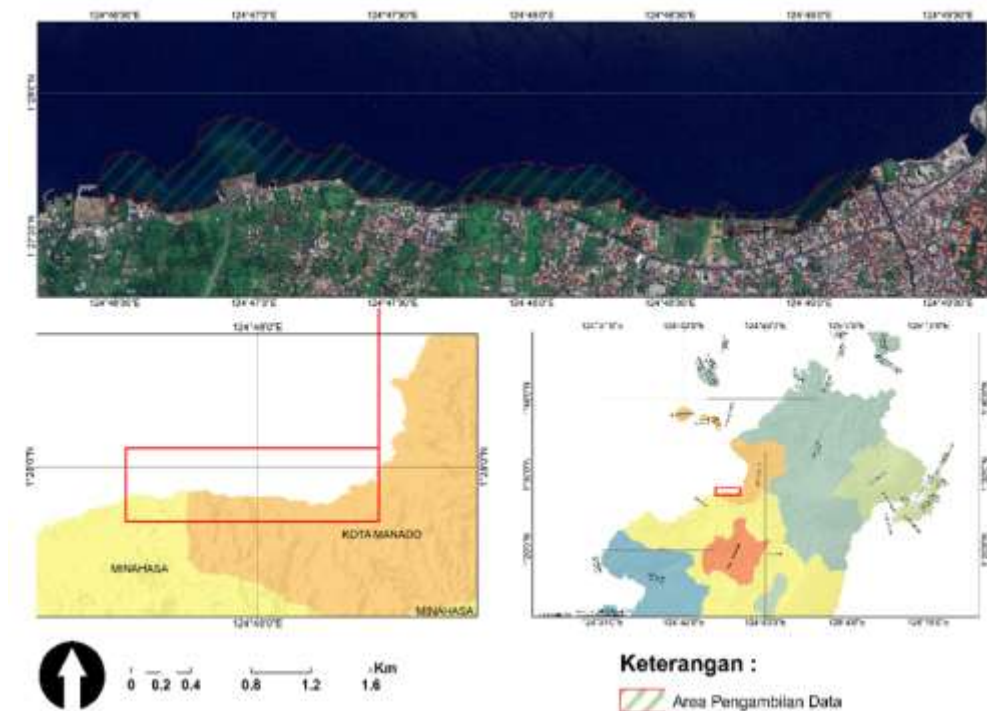
RB = Band dengan panjang gelombang pendek (Atenuasi air rendah)

RBj = Band dengan panjang gelombang lebih panjang (Atenuasi air lebih tinggi)

k_i/k_j = Rasio koefisien atenuasi saluran yang dibandingkan
 σ_i = ragam atau varian band I (saluran dengan panjang gelombang lebih pendek)
 σ_j = ragam atau varian band j (saluran dengan panjang gelombang lebih panjang)
 σ_{ij} = peragam atau covarian band i dan j

k_i/k_j diperoleh dengan rumus :

$$k_i/k_j = a - \sqrt{(a^2 + 1)} \text{ sementara } a = (\sigma_i - \sigma_j) / (2 \times \sigma_{ij})$$



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

Klasifikasi Tak terbimbing

Algoritma K-Means clustering merupakan metode pengelompokan data non-hierarki yang bersifat partisi, yang pertama kali diperkenalkan oleh MacQueen (1967) dan dikenal karena efisiensi serta kesederhanaan prosedurnya. Prinsip kerja metode ini berfokus pada pengelompokan data ke dalam satu atau lebih kluster berdasarkan kemiripan karakteristiknya, di mana setiap data diupayakan memiliki variasi internal yang minimal dalam satu kelompok namun memiliki variasi maksimal dibandingkan dengan data di kluster lainnya. Secara teknis, algoritma ini bekerja dengan meminimalkan dispersi intra-kluster dan memaksimalkan divergensi antar-kluster guna memastikan setiap anggota dalam kelompok yang sama memiliki homogenitas yang tinggi, sementara antar kelompok memiliki heterogenitas yang jelas.

Uji Akurasi

Validasi hasil klasifikasi penginderaan jauh dilakukan melalui analisis matriks kesalahan (error matrix) untuk mengukur tingkat ketepatan tematik secara komprehensif. Uji ini mencakup perhitungan Overall Accuracy untuk merepresentasikan ketepatan klasifikasi secara umum berdasarkan perbandingan data terklasifikasi dengan data acuan, serta Producer's Accuracy dan User's Accuracy untuk mengevaluasi keandalan pada setiap kelas habitat. Selain itu, Koefisien Kappa digunakan sebagai parameter tambahan untuk mengukur tingkat kesepakatan antara hasil klasifikasi dan data acuan secara lebih objektif dengan

mempertimbangkan unsur kesesuaian yang terjadi secara kebetulan.

Table 1. Klasifikasi tingkat kesepakatan koefisien Kappa menurut Landis & Koch (1997).

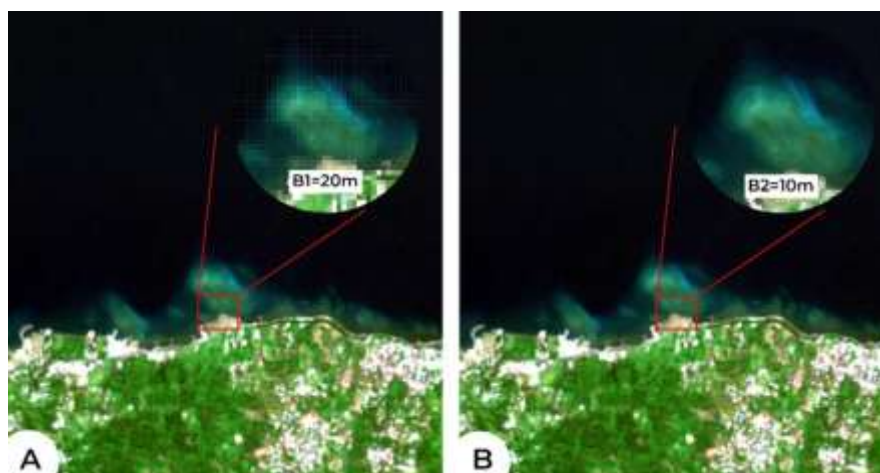
ilai Koefisien Kappa	Tingkat Kesepakatan (Strength of Agreement)
< 0.00	Poor (Sangat buruk)
0.00 - 0.20	Slight (Rendah)
0.21 - 0.40	Fair (Cukup)
0.41 - 0.60	Moderate (Sedang)
0.61 - 0.80	Substantial (Baik)
0.81 - 1.00	Almost Perfect (Sangat baik / Hampir sempurna)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Resampling Citra

Proses resampling dilakukan pada seluruh band citra Sentinel-2A untuk menyeragamkan perbedaan resolusi spasial (10 m, 20 m, dan 60 m) menjadi satu database dengan resolusi 10 m menggunakan perangkat lunak SNAP (SPA,

2019; ESA, 2025). Penyeragaman ini penting untuk mempermudah integrasi data serta meningkatkan representasi visual habitat perairan dangkal, sebagaimana ditunjukkan pada perbandingan resolusi 20 m dan 10 m (Gambar 4).



Gambar 2. Pengaruh perbedaan resolusi spasial citra Sentinel-2A terhadap representasi habitat perairan dangkal, resolusi 20 m (a) dan 10 m (b)

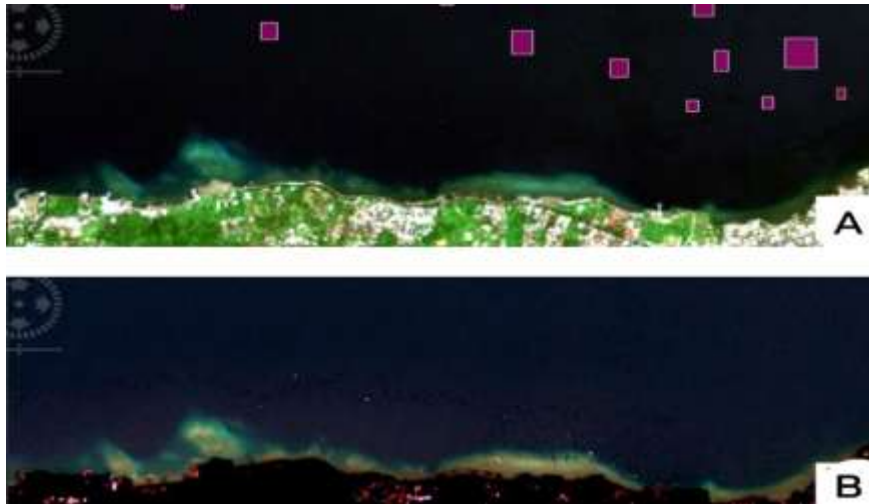
Di antara berbagai metode seperti bilinear interpolation dan cubic convolution, metode nearest neighbor dipilih karena kemampuannya dalam mempertahankan nilai spektral asli tanpa perubahan signifikan (Fagundes et al., 2025; Major et al., 2025; Roy et al., 2016). Selain aspek visual, pemilihan metode resampling dalam transformasi geometris sangat krusial karena berdampak langsung pada tingkat akurasi luaran klasifikasi akhirnya (Adiwijoyo & Danoedoro, 2014; Afwani & Danoedoro, 2019).

Koreksi Sunglint

Fenomena kilauan matahari (sunglint) merupakan kendala utama dalam penginderaan jauh perairan dangkal karena pantulan spekular pada antarmuka udara-air dapat mendistorsi reflektansi kolom air dan objek dasar laut (Kay et al., 2009). Gangguan ini menyebabkan degradasi nilai spektral, terutama pada ekosistem sensitif seperti terumbu karang dengan

kedalaman kurang dari 2 m (Kutser et al., 2009). Untuk mengatasi hal tersebut, algoritma penghapusan kilauan berbasis persamaan Hedley et al. (2005) diimplementasikan melalui perangkat lunak

SNAP guna meningkatkan visibilitas fitur dasar laut (ESA, 2019). Hasil koreksi menunjukkan peningkatan homogenitas reflektansi perairan serta kejelasan identifikasi objek bawah air dibandingkan dengan kondisi sebelum koreksi (Gambar 5).



Gambar 3. Perbandingan hasil koreksi reflektansi cahaya matahari a). Sebelum di koreksi b). Setelah di koreksi.

Koreksi sunglint menjadi tahapan krusial yang tidak dapat diabaikan dalam pengolahan citra satelit resolusi tinggi seperti Sentinel-2A, mengingat karakteristik pantulannya sangat dipengaruhi oleh resolusi spasial dan temporal citra (Cui et al., 2022; Paulino et al., 2025). Penerapan metode ini terbukti secara signifikan meningkatkan kualitas spektral citra dan akurasi pemetaan habitat bentik maupun batimetri, sehingga data satelit dapat dimanfaatkan secara optimal untuk kajian kelautan dan pesisir (Yen & Hieu, 2017; Paulino et al., 2025).

Masking Daratan, Awan, dan Buih Gelombang.

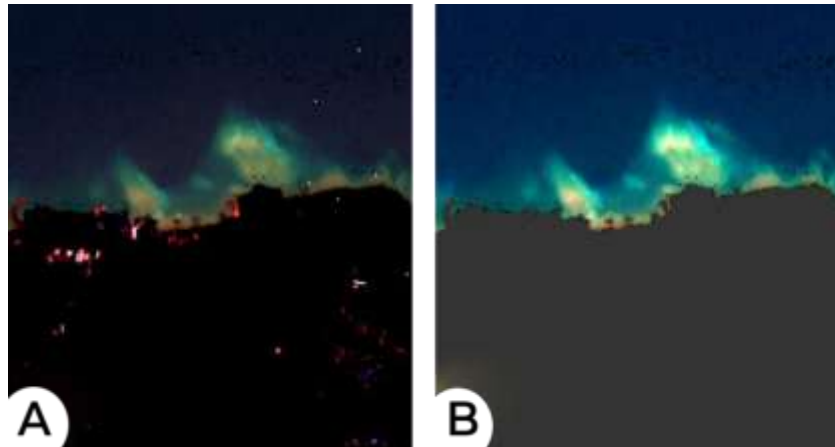
Proses masking daratan, awan, dan buih gelombang merupakan tahapan krusial dalam pengolahan citra perairan dangkal untuk meminimalisir bias spektral. Masking daratan memanfaatkan perbedaan reflektansi pada kanal Near-Infrared (NIR) dan Short-Wave Infrared (SWIR), di mana karakteristik serapan air yang tinggi pada panjang gelombang tersebut memungkinkan pemisahan objek terestrial secara efektif (Gambar 6).

Selain itu, penggunaan Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) terbukti lebih unggul dibandingkan NDWI konvensional dalam menonjolkan fitur perairan terbuka dan menekan gangguan dari lahan terbangun di wilayah pesisir (Xu, 2006). Penerapan MNDWI dengan resolusi 10 m melalui penajaman kanal SWIR pada citra Sentinel-2A mampu meningkatkan ketelitian pemetaan badan air serta menghasilkan detail perairan yang lebih halus dibandingkan resolusi 20 m (Du et al., 2016). Dengan mengeliminasi piksel daratan dan gangguan atmosfer seperti awan, konsistensi spektral citra perairan dapat ditingkatkan sehingga identifikasi parameter biofisik dan habitat perairan dangkal menjadi lebih akurat.

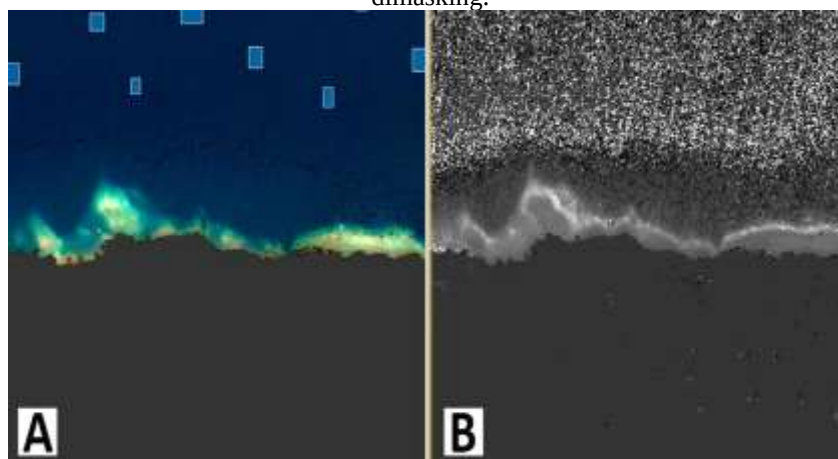
Koresksi Kolam Air

Perhitungan Depth Invariant Index (DII) merupakan tahapan krusial dalam koreksi kolom air untuk meminimalisir pengaruh kedalaman terhadap nilai reflektansi spektral dasar perairan. Mengadopsi algoritma Lyzenga (1978) dan Green et al. (2000), metode ini

mentransformasikan hubungan antara kedalaman dan reflektansi menjadi linier dengan menyesuaikan nilai piksel terhadap reflektansi air dalam (R_{deep}) melalui pemilihan Region of Interest (ROI) yang homogen (Gambar 7). Pada citra Sentinel-2A, penggunaan pita spektral dengan daya penetrasi tinggi, khususnya pita 1 hingga 3, menjadi fokus utama untuk merekam karakteristik dasar laut secara efektif melalui rasio koefisien atenuasi antar pita.



Gambar 4. Hasil pemisahan daratan dan perairan dangkal (a). Citra sebelum dimasking (b). Citra setelah dimasking.



Gambar 5. Koreksi kolom air menggunakan region perairan dangkal dan perairan dalam.

Penerapan koreksi kolom air sangat esensial karena redaman cahaya dalam air merupakan hambatan utama yang dapat menurunkan akurasi pemetaan bentik (Holden & LeDrew, 2002). Penggunaan algoritma yang presisi dan metode yang mutakhir mampu mereduksi gangguan radiometrik secara signifikan, sehingga meningkatkan ketelitian dalam pemetaan ekosistem kompleks seperti terumbu karang (Zoffoli et al., 2014). Dengan demikian, pendekatan ini menghasilkan informasi spektral yang lebih konsisten dan representatif untuk analisis habitat perairan dangkal yang lebih akurat.

Klasifikasi Citra

Klasifikasi citra Sentinel-2A dalam studi ini menggunakan algoritma tak terbimbing (unsupervised) K-Means untuk mengelompokkan piksel berdasarkan kemiripan spektral pada data multi-temporal. Untuk meningkatkan presisi dan relevansi analisis, proses klasifikasi dibatasi pada Region of Interest (ROI) perairan dangkal guna menjamin keseragaman cakupan spasial antar waktu (Gambar 14). Penentuan jumlah kelas dilakukan secara empiris mengingat belum adanya pedoman baku untuk analisis multi-temporal, di mana jumlah kelas sangat

dipengaruhi oleh kompleksitas objek dan resolusi spasial citra (Faqih & Mailoa, 2025; Paradis, 2022).

Hasil analisis menunjukkan bahwa lima kelas substrat utama karang hidup, rubble, pasir, pasir berlumpur, dan kelas campuran merupakan jumlah optimal untuk menjaga konsistensi dan keterbandingan data antar periode pengamatan (Gambar 15). Penggunaan lima kelas ini mampu menangkap variasi substrat tanpa menghasilkan kelas yang tidak stabil akibat dinamika temporal. Kehadiran kelas campuran (mixed class) pada resolusi 10 m menjadi indikator penting dalam mencerminkan dinamika perubahan substrat benthik, meskipun memerlukan interpretasi yang hati-hati terkait komposisi pikselnya.

Uji Akurasi Klasifikasi

Pengujian akurasi hasil klasifikasi habitat benthik dilakukan menggunakan 250 titik sampel uji sesuai rekomendasi Congalton & Green (2009), di mana setiap kelas diwakili minimal 50 titik untuk meningkatkan reliabilitas hasil evaluasi. Sampel tersebut didistribusikan secara merata menggunakan metode random sampling guna memperoleh estimasi akurasi yang tidak bias dan menjaga konsistensi evaluasi multi-temporal (Tyukavina et al., 2025). Hasil uji akurasi tahun 2017 menunjukkan Overall Accuracy (OA) sebesar 78% dan nilai Kappa 0,69 yang termasuk kategori substantial. Kelas habitat mix memiliki (UA) tertinggi sebesar 100% dan pasir lumpur (PL) sebesar 93%. Namun demikian, kelas rubble (R) memiliki UA rendah sebesar 55% akibat kesalahan klasifikasi dengan kelas pasir (P) dan karang hidup (KH) yang dipengaruhi oleh kemiripan respons spektral serta pengaruh kolom perairan (Tabel 2).

Tabel 2. Matriks kesalahan pemetaan habitat perairan dangkal tahun 2017

<i>Ground Truth Habitat (GTH) & virtual ground truth (VGT)</i>							
Klasifikasi	MIX	R	PL	P	KH	Total	UA (%)
MIX	12	0	0	0	0	12	1.00
R	0	31	0	20	5	56	0.55
PL	0	0	14	0	1	15	0.93
P	1	4	4	53	3	65	0.82
KH	2	2	1	13	83	101	0.82
Total	15	37	19	86	92	250	
OA (%)							0.78
Kappa (%)							0.69

Pada tahun 2018, nilai OA sebesar 77% dan Kappa 0,68, yang masih berada pada kategori substantial. Akurasi ini menunjukkan konsistensi hasil klasifikasi antar tahun, di mana kelas mix kembali menunjukkan akurasi sempurna (UA) 100%, sedangkan pasir lumpur (PL) dan pasir (P) menunjukkan nilai (UA) tinggi masing-masing 86%. Hal ini menandakan bahwa objek dengan karakteristik spektral homogen relatif lebih mudah dikenali. Sebaliknya, kelas rubble (R) memiliki (UA) 65%, yang menunjukkan masih terjadinya

misklasifikasi dengan kelas pasir dan karang hidup akibat variasi kondisi perairan, kedalaman, serta keterbatasan resolusi spasial Sentinel-2A (Tabel 7). Beberapa kelas habitat dasar seperti pasir dan habitat peralihan berpotensi mengalami transisi ke kelas lain akibat karakteristiknya yang homogen, sehingga membatasi keberadaan kelas habitat dasar lainnya (Leon et al., 2020).

Hasil klasifikasi tahun 2019 menunjukkan penurunan dengan (OA) sebesar 73% dan Kappa 0,63, yang masih termasuk kategori substantial namun lebih rendah dibanding tahun sebelumnya. Kelas pasir (P) menunjukkan (UA) cukup tinggi (85%), sedangkan pasir lumpur (PL) mengalami penurunan signifikan dengan (UA) 53%, yang mengindikasikan adanya

tumpang tindih spektral akibat perubahan kondisi perairan atau tutupan epifit. Kelas rubble (R) juga memiliki (UA) rendah sebesar 58% (Tabel 8). Secara umum, peningkatan kedalaman menurunkan sensitivitas spektral akibat penyerapan cahaya di kolom air, sehingga hubungan reflektansi dasar dan permukaan menjadi tidak linier dan perubahan reflektansi benthik menghasilkan respons permukaan yang lebih besar pada perairan dalam (Goodman et al., 2020).

Tabel 3. Matriks kesalahan pemetaan habitat perairan dangkal tahun 2018.

<i>Ground Truth Habitat (GTH) & virtual ground truth (VGT)</i>							
Klasifikasi	R	MIX	PL	KH	P	Total	UA (%)
R	51	0	2	1	25	79	0.65
MIX	0	3	0	0	0	3	1.00
PL	1	0	6	0	0	7	0.86
KH	1	9	4	78	5	97	0.80
P	1	1	3	4	55	64	0.86
Total	54	13	15	83	85	250	
OA (%)							0.77
Kappa (%)							0.68

Tabel 4. Matriks kesalahan pemetaan habitat perairan dangkal tahun 2019.

<i>Ground Truth Habitat (GTH) & virtual ground truth (VGT)</i>							
Klasifikasi	MIX	P	PL	R	KH	Total	UA (%)
MIX	9	1	1	0	0	11	0.82
P	1	50	1	5	2	59	0.85
PL	5	2	8	0	0	15	0.53
R	1	34	0	50	1	86	0.58
KH	5	8	0	1	65	79	0.82
Total	21	95	10	56	68	250	
OA (%)							0.73
Kappa (%)							0.63

Pada tahun 2020, hasil uji akurasi menunjukkan peningkatan dengan (OA) sebesar 75% dan Kappa 0,65. Kelas pasir (P) mencatat (UA) tertinggi sebesar 90%, menunjukkan bahwa area berpasir teridentifikasi dengan baik. Sebaliknya, kelas pasir lumpur (PL) kembali memiliki UA rendah (53%), yang mengindikasikan ketidakstabilan spektral pasir lumpur antar waktu akibat dinamika musiman, kekeruhan

perairan, atau perubahan penutupan vegetasi bawah air (Tabel 9). Dengan meningkatnya kedalaman, reflektansi substrat dasar semakin teredam oleh kolom air, sehingga sinyal spektral yang diterima sensor melemah dan perbedaan antar kelas menjadi kurang jelas, yang berdampak pada penurunan akurasi klasifikasi (Garcia et al., 2018).

Pada tahun 2021, nilai OA sebesar 72% dan Kappa 0,60, menunjukkan tingkat kesesuaian moderate-substantial. Akurasi tertinggi terdapat pada kelas mix (100%), sedangkan kelas rubble (R) dan pasir lumpur (PL) menunjukkan (UA) yang relatif lebih rendah. Keterbatasan resolusi spasial pada citra satelit seringkali memicu terbentuknya piksel campuran (mix pixels), di mana satu unit piksel merepresentasikan keberagaman kelas penutup benthik (Tabel 10). Fenomena ini menyebabkan sinyal spektral karang cenderung tereduksi oleh dominasi objek lain yang pada akhirnya mendistorsi akurasi estimasi tutupan karang dan klasifikasi benthik secara keseluruhan (Sullivan et al, 2025).

Hasil klasifikasi tahun 2022 menunjukkan peningkatan kualitas dengan (OA) sebesar 78% dan Kappa 0,71, yang merupakan nilai tertinggi sepanjang periode pengamatan. Kelas pasir (P) memiliki UA sangat tinggi (95%), sedangkan kelas karang hidup (KH) juga menunjukkan akurasi yang baik (79%). Nilai ini mengindikasikan bahwa proses pra-

pengolahan citra dan pemilihan citra pada

tahun ini relatif optimal (Tabel 11). Optimalisasi pengolahan data Sentinel-2A menuntut perhatian khusus pada aspek teknis, mulai dari tahapan pra-pemrosesan seperti koreksi atmosfer dan kedalaman perairan hingga penentuan algoritma klasifikasi yang paling sesuai (Phiri et al, 2020).

Tabel 5. Matriks kesalahan pemetaan habitat perairan dangkal tahun 2020.

<i>Ground Truth Habitat (GTH) & virtual ground truth (VGT)</i>							
Klasifikasi	KH	MIX	P	PL	R	Total	UA (%)
KH	78	12	9	1	2	102	0.76
MIX	0	4	2	1	0	7	0.57
P	2	1	70	4	1	78	0.90
PL	2	4	2	9	0	17	0.53
R	1	0	17	1	27	46	0.59
Total	83	21	100	16	30	250	
OA (%)							0.75
Kappa (%)							0.65

Tabel 6. Matriks kesalahan pemetaan habitat perairan dangkal tahun 2021.

<i>Ground Truth Habitat (GTH) & virtual ground truth (VGT)</i>							
Klasifikasi	MIX	R	KH	P	PL	Total	UA (%)
MIX	1	0	0	0	0	1	1.00
R	1	49	0	28	1	79	0.62
KH	2	0	59	16	0	77	0.77
P	0	2	15	61	0	78	0.78
PL	0	0	5	1	9	15	0.60
Total	4	51	79	106	10	250	
OA (%)							0.72
Kappa (%)							0.60

Tabel 7. Matriks kesalahan pemetaan habitat perairan dangkal tahun 2022.

<i>Ground Truth Habitat (GTH) & virtual ground truth (VGT)</i>							
Klasifikasi	MIX	R	P	KH	PL	Total	UA (%)
MIX	17	0	0	0	0	17	1.00
R	0	53	25	0	0	78	0.68
P	0	1	60	2	0	63	0.95
KH	0	0	15	57	0	72	0.79
PL	0	0	2	9	9	20	0.45
Total	17	54	102	68	9	250	
OA (%)							0.78
Kappa (%)							0.71

Pada tahun 2023, nilai OA sebesar 75% dan Kappa 0,64, yang masih menunjukkan kesesuaian yang baik. Kelas pasir (P) dan karang hidup (KH) memiliki (UA) tertinggi masing-masing 91% dan 87%. Namun, kelas pasir lumpur (PL) menunjukkan (UA) yang rendah 37%, Karakteristik bentuk spektral berperan sebagai faktor dominan dalam pemisahan spektral antar kelas (Tabel 12). Selain itu, perbedaan besaran reflektansi turut mempengaruhi kontras spektral antara kelas pasir dan non-pasir, mengingat nilai reflektansi pasir yang jauh lebih tinggi (Garcia et al, 2018).

Secara temporal, nilai Overall Accuracy (OA) dan Kappa menunjukkan kestabilan relatif antar tahun meskipun terdapat fluktuasi kecil, dengan nilai tertinggi pada tahun 2022 (0,71) dan terendah pada tahun 2019 (0,63). Fluktuasi ini dipengaruhi oleh variasi kondisi saat akuisisi data serta faktor lingkungan seperti kualitas perairan, heterogenitas tipe substrat dasar,

dan keberadaan noise pada citra (Kartika et al., 2022a, 2025). Selain pengaruh reflektansi, penggunaan metode klasifikasi yang berbeda (Adugna et al., 2022; Kartika et al., 2022b) serta penentuan jumlah kelas mampu meningkatkan nilai uji akurasi (Dwiputra et al., 2016; Pamungkas et al., 2022). Hasil OA penelitian ini (73%-78%) sebanding dengan penelitian Dongoran & Prarikeslan (2025) sebesar 78,85% dan Dimara & Hamuna (2020) sebesar 73,77%, namun lebih rendah dari Trudeau et al. (2025) yang melaporkan 85,9%.

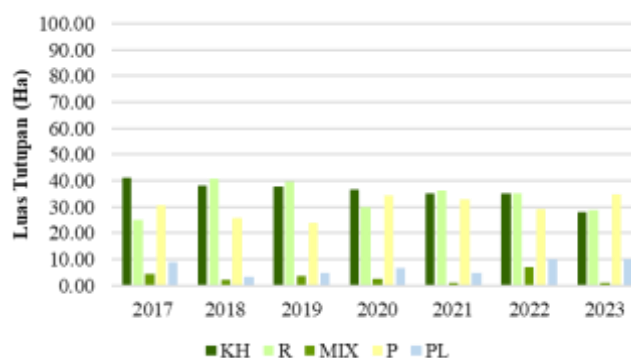
Tabel 8. Matriks kesalahan pemetaan habitat perairan dangkal tahun 2022.

<i>Ground Truth Habitat (GTH) & virtual ground truth (VGT)</i>							
Klasifikasi	PL	R	MIX	KH	P	Total	UA (%)
PL	10	1	2	11	3	27	0.37
R	1	43	1	0	28	73	0.59
MIX	0	0	0	0	0	0	0.00
KH	0	0	0	52	8	60	0.87
P	0	0	1	7	82	90	0.91
Total	11	44	4	70	121	250	
OA (%)							0.75
Kappa (%)							0.64

Pada lokasi yang sama, hasil ini berbeda dengan penelitian Cera et al. (2023) yang menggunakan citra resolusi spasial lebih tinggi namun melaporkan OA 40,30% dan Kappa 0,0702. Hal ini menunjukkan bahwa resolusi spasial yang lebih tinggi tidak selalu menjamin peningkatan akurasi, karena pemetaan habitat perairan dangkal sangat dipengaruhi oleh kondisi kolom air, heterogenitas substrat, metode klasifikasi, dan desain pengambilan sampel (Cera et al., 2023). Andréfouët et al. (2003) menambahkan bahwa penggunaan citra dengan karakteristik multi-spektral dan pemilihan jumlah kelas berpengaruh pada tinggi rendahnya nilai persentase overall accuracy.

Dinamika tutupan habitat tahun 2017-2023

Berdasarkan hasil analisis perubahan tutupan habitat benthik periode 2017-2023 (Gambar 18), terlihat dinamika temporal pada masing-masing kelas yang mencerminkan kompleksitas proses ekologis dan respons terhadap kondisi lingkungan. Kelas karang hidup (KH) menunjukkan tren penurunan konsisten dari 41,09 ha pada tahun 2017 menjadi 28,17 ha pada tahun 2023. Sebaliknya, kelas rubble (R) memperlihatkan fluktuasi tinggi, meningkat dari 25,16 ha (2017) menjadi 40,63 ha (2018), sebelum mencapai 28,63 ha pada 2023. Kelas pasir (P) cenderung stabil (24,00–34,82 ha), sementara pasir lumpur (PL) memperlihatkan kecenderungan peningkatan di akhir pengamatan menjadi 9,83 ha. Kelas campuran (mixed pixel) bersifat fluktuatif sebagai zona transisi antar habitat.

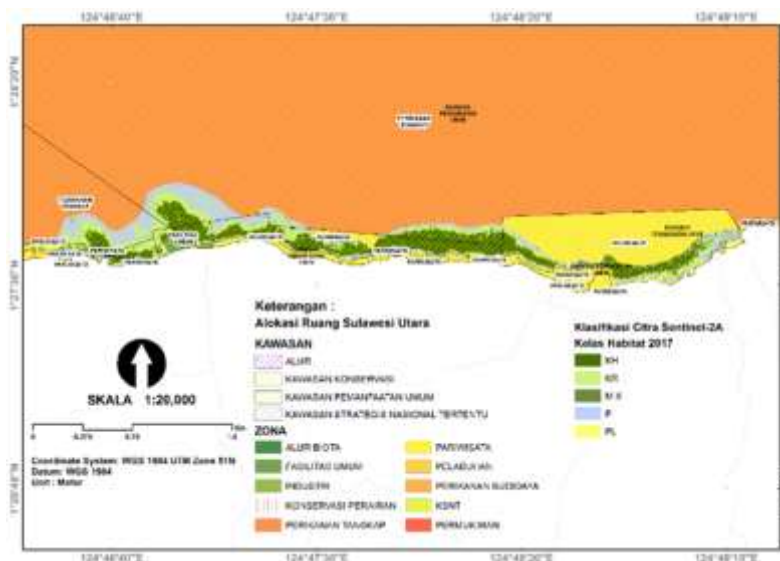


Gambar 6. Hasil analisis luas tutupan habitat benthik tahun 2017-2023.

Dinamika ini mencerminkan respons habitat terhadap faktor lingkungan alami maupun aktivitas manusia, seperti peningkatan reklamasi pantai yang berpotensi mempercepat degradasi ekosistem (Chen et al., 2021). Tren penurunan karang hidup ini didukung oleh konteks empiris penelitian sebelumnya di Teluk Manado (Caroles et al., 2017; Djamaluddin et al., 2019; Balumpapung et al., 2022; Oroh et al., 2022). Namun demikian, interpretasi terhadap pola perubahan perlu dilakukan secara cermat dengan mempertimbangkan keterbatasan resolusi spasial citra Sentinel-2A yang berpotensi menimbulkan efek pencampuran piksel (mixed pixel) dalam mengidentifikasi detail habitat berskala kecil.

Habitat Bentik Dan Pengolahan Pesisir

Pengelolaan wilayah pesisir yang berkelanjutan memerlukan dukungan informasi spasial atau peta habitat yang akurat sebagai referensi untuk mengukur efektivitas rencana pengelolaan (Singh et al., 2021). Di Indonesia, instrumen ini dikembangkan melalui Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K), yang di Provinsi Sulawesi Utara ditetapkan melalui Peraturan Daerah Nomor 1 Tahun 2017 sebagai pengaturan pemanfaatan ruang laut secara terpadu (Lazuardi et al., 2021). Dalam konteks ini, peta habitat bentik hasil analisis multi-temporal di-overlay dengan peta zonasi RZWP3K Provinsi Sulawesi Utara (Gambar 20). Temuan ini menunjukkan bahwa keberadaan data spasial habitat bentik memiliki peran penting sebagai informasi dasar dalam mendukung proses perencanaan dan pemanfaatan ruang laut yang berkelanjutan serta memahami posisinya dalam kerangka perencanaan ruang laut.



Gambar 7. Overlay distribusi habitat bentik hasil analisis multi-temporal tahun 2017 dengan peta zonasi RZWP3K di Teluk Manado bagian selatan

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa peta habitat bentik hasil analisis spasial multi-temporal memiliki peran penting sebagai baseline dalam pengelolaan wilayah pesisir untuk menggambarkan kondisi ekosistem serta merekam dinamika perubahan dari waktu ke waktu (Gunawan et al., 2025; Hafizt et al., 2021; J. Hedley et al., 2016). Saat ini, perencanaan tata ruang laut dengan desain zonasi multi-guna hadir sebagai alat bantu pengambilan keputusan yang komprehensif, adaptif, dan berbasis ekosistem (Ehler, 2021; SusGren, 2012). Sejalan dengan regulasi nasional (Permen KP Nomor 28 Tahun 2021 dan Kep Dirjen PRL Nomor 50 Tahun 2023), pemanfaatan data resolusi tinggi seperti citra UAV menjadi pendekatan relevan untuk menyediakan informasi spasial habitat bentik yang aktual dan detail (Ventura et al.,

2018). Penelitian ini menyajikan peta habitat bentik hasil analisis citra UAV tahun 2024 yang di-overlay dengan peta zonasi RZWP3K (Gambar 21), menunjukkan bagaimana informasi spasial ekosistem dapat diintegrasikan dalam kerangka pengelolaan ruang laut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis spasial habitat bentik di perairan dangkal Teluk Manado bagian selatan, dapat disimpulkan bahwa selama periode 2017-2023 terjadi perubahan tutupan habitat bentik yang bersifat bertahap dan menunjukkan pola spasial tertentu. Analisis multi-temporal citra Sentinel-2A mengindikasikan adanya penurunan tutupan karang hidup, disertai dengan fluktuasi kelas rubble serta kecenderungan peningkatan pada habitat non-karang tertentu, yang mencerminkan dinamika ekosistem pesisir di wilayah penelitian.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketersediaan data spasial habitat bentik yang akurat dan mutakhir memiliki keterkaitan yang erat dengan kebutuhan pengelolaan wilayah pesisir. Informasi spasial tersebut berperan sebagai data dasar (baseline) yang penting dalam mendukung perencanaan, evaluasi kesesuaian pemanfaatan ruang laut, serta implementasi kebijakan penataan ruang laut, termasuk Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K), Permen KP Nomor 28 Tahun 2021, dan Kep Dirjen PRL Nomor 50 Tahun 2023 tentang Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang Laut.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwijoyo, A., & Danoedoro, P. (2014). Perbandingan Teknik Resampling pada Citra Hasil Pan-Sharpening untuk Pemetaan Penutup Lahan dengan Menggunakan Klasifikasi Terselia Maximum Likelihood. *Jurnal Bumi Indonesia*, 3(4).
- Adugna, T., Xu, W., & Fan, J. (2022). Comparison of Random Forest and Support Vector Machine Classifiers for Regional Land Cover Mapping Using Coarse Resolution FY-3C Images. *Remote Sensing*, 14(3), 574. <https://doi.org/10.3390/rs14030574>
- Afwani, M. Z., & Danoedoro, P. (2019). The effects of polynomial interpolation and resampling methods in geometric correction on the land-cover classification accuracy of Landsat-8 OLI imagery: A case study of Kulon Progo area, Yogyakarta. *Sixth Geoinformation Science Symposium*, 21. <https://doi.org/10.1117/12.2548423>
- Andréfouët, S., Kramer, P., Torres-Pulliza, D., Joyce, K. E., Hochberg, E. J., Garza-Pérez, R., Mumby, P. J., Riegl, B., Yamano, H., White, W. H., Zubia, M., Brock, J. C., Phinn, S. R., Naseer, A., Hatcher, B. G., & Muller-Karger, F. E. (2003). Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments. *Remote Sensing of Environment*, 88(1–2), 128–143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.005>.
- Bengen, D.G. (2000). Pengenalan dan Pengelolaan Ekosistem dan Sumber daya Pesisir (Prosiding Pelatihan Untuk Pelatih Pengelolaan Wilayah Pesisir Terpadu. Pusat Kajian Sumber daya Pesisir dan Lautan IPB.
- Balumpapung, J., Roeroe, K. A., Paruntu, C. P., Kusen, J. D., Wagey, B. Th., & Wantasen, A. S. (2022). Status Terumbu Karang Di Pantai Malalayang Dua Kota Manado Sulawesi Utara. *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis*, 10(1), 31–37. <https://doi.org/10.35800/jplt.10.1.2022.54978>.
- Caroles, E., Kusen, J., & Kaligis, G. (2017). Status persentase tutupan karang scleractinia di pulau Bunaken (Taman Nasional Bunaken) dan di pantai Malalayang, pesisir kota Manado. *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis*, 5(3), 1. <https://doi.org/10.35800/jplt.5.3.2017.16869>.
- Cera, F. P., Danoedoro, P., Wicaksono, P., & Yasir, M. (2023). Random Forests Algorithm for

- Two Levels of Coral Reef Ecosystem Mapping Using Planetscope Image in Malalayang Beach, Manado. *Jurnal Geografi*, 15(2), 135–144. <https://doi.org/10.24114/jg.v15i2.30795>.
- Chen, D., Wang, Y., Shen, Z., Liao, J., Chen, J., & Sun, S. (2021). Long Time-Series Mapping and Change Detection of Coastal Zone Land Use Based on Google Earth Engine and Multi-Source Data Fusion. *Remote Sensing*, 14(1), 1. <https://doi.org/10.3390/rs14010001>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices (2. ed). CRC Press.
- Cui, A., Zhang, J., Ma, Y., & Zhang, X. (2022). A Noise De-Correlation Based Sun Glint Correction Method and Its Effect on Shallow Bathymetry Inversion. *Remote Sensing*, 14(23), 5981. <https://doi.org/10.3390/rs14235981>
- Dimara, A., & Hamuna, B. (2020). Pemanfaatan Citra Satelit Sentinel-2A Untuk Pemetaan Habitat Dasar Perairan Dangkal (Studi Kasus: Teluk Humbolt, Kota Jayapura).
- Djamaluddin, R., Paransa, I. I. J., & Djoni Hatidja. (2019). Explorasi Dan Analisis Kondisi Ekosistem Terumbu Karang Di Teluk Manado Untuk Pengembangan Konservasi Dan Pengelolaan Berkelanjutan.
- Djunarsjah, E., B. Sulistiyo, S. Hendriatiningsih, D. Wisayantono, W. Windupranata, J. Setiyadi. (2009). Kriteria Penentuan Garis Batas Laut Untuk Mendukung Pengelolaan Sumberdaya Kelautan. *Geoid*. Vol. 04, No. 02.
- Dongoran, A. S., & Prarikeslan, W. (2025). Pemetaan Habitat Bentik Berbasis Objek di Perairan Dangkal Kawasan Konservasi Perairan Daerah Kabupaten Agam. 9.
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-M Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, 8(4), 354. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.
- Dwiputra, A. J., R. Suharyadi, & Projo Danoedoro. (2016). Pengaruh Jumlah Kelas Dan Skema Klasifikasi Terhadap Akurasi Informasi Penggunaan Lahan Hasil Klasifikasi Berbasis Onjek Dengan Teknik Support Vector Machine Di Sebagian Kabupaten Kebumen Provinsi Jawa Tengah. *Majalah Geografi Indonesia*, 30(2), 120–133.
- Ehler, C. N. (2021). Two decades of progress in Marine Spatial Planning. *Marine Policy*, 132, 104134. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104134>.
- ESA. (2019). Sen2coral Toolbox for Coral Reef Monitoring Great Barrier Reef, Australia. https://eo4society.esa.int/wpcontent/uploads/2021/04/OCEA05_Sen2Coral_GBR_Tutorial.pdf.
- Fagundes, R., Kayser, L. P., De Paula Amaral, L., Benedetti, A. C., Bolfe, É. L., Parreiras, T. C., Ramos-Ospina, M., & Marulanda-Tobón, A. (2025). Analysis of Resampling Methods for the Red Edge Band of MSI/Sentinel-2A for Coffee Cultivation Monitoring. *Geomatics*, 5(2), 19. <https://doi.org/10.3390/geomatics5020019>.
- Faqih, M. F. A., & Mailoa, E. (2025). Clustering zonasi daerah rawan bencana alam Provinsi Jawa Tengah menggunakan algoritma k-means dan library geopandas. *IT-Explore: Jurnal Penerapan Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 4(1), 116–127. <https://doi.org/10.24246/itexplore.v4i1.2025.pp116-127>.
- Garcia, R. A., Lee, Z., & Hochberg, E. J. (2018). Hyperspectral Shallow-Water Remote Sensing with an Enhanced Benthic Classifier. *Remote Sensing*, 10(1), 147. <https://doi.org/10.3390/rs10010147>
- Goodman, J. A., Lay, M., Ramirez, L., Ustin, S. L., & Haverkamp, P. J. (2020). Confidence

- Levels, Sensitivity, and the Role of Bathymetry in Coral Reef Remote Sensing. *Remote Sensing*, 12(3), 496. <https://doi.org/10.3390/rs12030496>
- HGreen, E. P., Peter J. Mumby, Alasdair J. Edwards, Christopher D. Clark, & UNESCO (Eds). (2000). *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Unesco Publishing.
- Gunawan, T. S., Hamidah, M., Rahayu, A. K., Septiani, N. N., Pingkan, J., Hermansyah, A., Farhan, M., Sholihah, R., Arundina, A. B., Minarni, D. R., Susanti, R., Gustiar, G. G., Kusumastuti, D. N., Maharani, G. R., Nurhakim, M. D., Khalishah, P. V., Rahman, I. F., Nugianto, N., Hakim, A., ... Yulianto, I. (2025). National-scale mapping of ecosystems to improve ocean accounting for marine and coastal management in Indonesia. *One Ecosystem*, 10, e155166. <https://doi.org/10.3897/oneeco.10.e155166>
- Hafizt, M., Adi, N. S., Wicaksono, P., Yuwono, D. M., Prayudha, B., & Suyarso, S. (2021). Change Detection of Benthic Habitat Communities using Landsat Imageries in Wakatobi Islands from 1990 to 2017. *Indonesian Journal of Geography*, 53(3). <https://doi.org/10.22146/ijg.50724>
- Hedley, J. D., Harborne, A. R., & Mumby, P. J. (2005). Technical Note: Simple and Robust Removal of Sun Glint for Mapping Shallow-Water Benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2107–2112. <https://doi.org/10.1080/01431160500034086>
- Hedley, J., Roelfsema, C., Chollett, I., Harborne, A., Heron, S., Weeks, S., Skirving, W., Strong, A., Eakin, C., Christensen, T., Ticzon, V., Bejarano, S., & Mumby, P. (2016). Remote Sensing of Coral Reefs for Monitoring and Management: A Review. *Remote Sensing*, 8(2), 118. <https://doi.org/10.3390/rs8020118>
- Holden, H., & LeDrew, E. (2002). Measuring and Modeling Water Column Effects on Hyperspectral Reflectance in a Coral Reef Environment. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 300–308. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00007-X)
- Hudha, N., D. M. Rondonuwu, Suryono. (2019). Kajian Pengembangan Pesisir Teluk Manado Sebagai Kota Tepi Pantai. *Jurnal Spasial*. Vol 6. No. 3. ISSN 2442-3262.
- Kartika, I., Siregar, V. P., Panjaitan, J. P., & Nurdin, N. (2022). Klasifikasi Habitat Bentik Perairan Laut Dangkal Di Pulau Barrang Caddi Dengan Pendekatan Obia Menggunakan Citra Sentinel-2 Dan Spot- 7 Dengan Penerapan Algoritma Bayesian Dan K-Nearest Neighbor. *Jurnal Teknologi Kelautan Tropis*, 14(3), 443–460.
- Kartika, I., Syahara, U., Kurniawati, E., Apdillah, D., & Febrianto, T. (2025). Pemetaan Habitat Bentik Berbasis Pixel Menggunakan Citra Spot-7 Di Perairan Desa Pengudang Kabupaten Bintan. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 15(1), 44. <https://doi.org/10.33512/jpk.v15i1.32410>
- Kay, S., Hedley, J. D., & Lavender, S. (2009). Sun Glint Correction of High and Low Spatial Resolution Images of Aquatic Scenes: A Review of Methods for Visible and Near-Infrared Wavelengths. *Remote Sensing*, 1(4), 697–730. <https://doi.org/10.3390/rs1040697>
- Kutser, T., Vahtmäe, E., & Praks, J. (2009). A sun glint correction method for hyperspectral imagery containing areas with non-negligible water leaving NIR signal. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), 2267–2274. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.016>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lazuardi, W., Wicaksono, P., & Marfai, M. A. (2021). Remote sensing for coral reef and seagrass cover mapping to support coastal management of small islands. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 686(1), 012031.

- <https://doi.org/10.1088/1755-1315/686/1/012031>.
- Leon, A. Z., Huvenne, V. A. I., Benoist, N. M. A., Ferguson, M., Bett, B. J., & Wynn, R. B. (2020). Assessing the Repeatability of Automated Seafloor Classification Algorithms, with Application in Marine Protected Area Monitoring. *Remote Sensing*, 12(10), 1572. <https://doi.org/10.3390/rs12101572>
- Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3), 379. <https://doi.org/10.1364/AO.17.000379>.
- Lyzenga, D. R. (1978). Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. *Appl. Opt.* 17 379–83.
- Major, D., Horváth, Z., Kröber, F., Augustin, H., Sudmanns, M., Ševčík, P., Baraldi, A., Berg, A., Cornel, D., & Tiede, D. (2025). A holistic approach for multi-spectral Sentinel-2 super-resolution and spectral evaluation. *International Journal of Remote Sensing*, 46(20), 7437–7464. <https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2549132>.
- Novianti, Leni. (2023). Analisis Perubahan Luasan Tutupan Lahan Wilayah Pesisir Timur Banyuasin Dengan Metode Change Vector Analysis. Thesis.
- Opa, E. Tommy. (2011). Perubahan Garis Pantai Desa Bentenan Kecamatan Pusomaen, Minahasa Tenggara. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan Tropis* Vol. VII-3.
- Oroh, D. R. S., Kontu, T. M., & Lintong, O. (2022). Kondisi Terumbu Karang Di Perairan Pantai Malalayang Kota Manado Provinsi Sulawesi Utara. *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis*, 10(3), 254–259. <https://doi.org/10.35800/jplt.10.3.2022.55010>.
- Pamungkas, D. P., Hartono, D., & Anggoro, A. (2022). Pemetaan Terumbu Karang Menggunakan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Di Selatan Pulau Tikus Kota Bengkulu. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 15(1), 91–99. <https://doi.org/10.21107/jk.v15i1.10115>.
- Paradis, E. (2022). Probabilistic unsupervised classification for large-scale analysis of spectral imaging data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107, 102675. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102675>.
- Paulino, R. S., Martins, V. S., Caballero, C. B., Lima, T. M. A., Maciel, D. A., Santos, J. C. P., & Liu, B. (2025). Performance of glint correction algorithms for Sentinel-3 OLCI data. *Frontiers in Remote Sensing*, 6, 1690337. <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1690337>.
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. *Remote Sensing*, 12(14), 2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
- Roy, D. P., Li, J., Zhang, H. K., & Yan, L. (2016). Best practices for the reprojection and resampling of Sentinel-2 Multi Spectral Instrument Level 1C data. *Remote Sensing Letters*, 7(11), 1023–1032. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1212419>.
- Rudianto, (2014). Analisis Restorasi Ekosistem Wilayah Pesisir Terpadu Berbasis Co-Management: Studi Kasus Di Kecamatan Ujung Pangkah Dan Kecamatan Bungah, Kabupaten Gresik. *Research Journal of Life Science*. Vol. 10, No. 1. E-ISSN: 2355-9926
- Siripanji, D. Natalia. (2013). Status Hukum Tanah Reklamasi Pantai Kota Manado Berdasarkan Undang-Undang Agraria No. 5 Tahun 1960. *Lex Administratum*. Vol. 1 No. 2.
- Singh, A. A., Maharaj, A., & Singh, P. (2021). Benthic Resource Baseline Mapping of Cakaunisasi and Yarawa Reef Ecosystem in the Ba Region of Fiji. *Water*, 13(4), 468. <https://doi.org/10.3390/w13040468>
- Sullivan, E., Papagiannopoulos, N., Clewley, D., Groom, S., Raitsos, D. E., Hoteit, I., Sullivan, E., Papagiannopoulos, N., Clewley, D., Groom, S., Raitsos, D. E., & Hoteit, I. (2025).

- Mapping Coastal Marine Habitats Using UAV and Multispectral Satellite Imagery in the NEOM Region, Northern Red Sea. *Remote Sensing*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/rs17030485>
- SusGren, S. G. (2012). Developing a Framework for a Comprehensive Marine Multi-Use Zoning Plan. Project, SusGren, Clifton.
- Trudeau, G. A., Lyon, M., Lowell, K., & Dijkstra, J. A. (2025). Mapping Coral Reef Habitats with ICESat-2 and Satellite Imagery: A Novel Spectral Unmixing Approach Compared to Machine Learning. *Remote Sensing*, 17(21), 3623. <https://doi.org/10.3390/rs17213623>
- Tyukavina, A., Stephen V. Stehman, Giles M. Foody, Sophie Bontemps, Anna Komarova, Nandin-Erdene Tsendbazar, & Jaime E. Nickeson. (2025). Land Cover and Change Map Accuracy Assessment and Area Estimation Good Practices Protocol. Land Product Validation Subgroup (WGCV/CEOS). <https://doi.org/10.5067/DOC/CEOSWGCV/LPV/LC.001>.
- Ventura, D., Bonifazi, A., Gravina, M. F., Belluscio, A., & Ardizzone, G. (2018). Mapping and Classification of Ecologically Sensitive Marine Habitats Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery and Object-Based Image Analysis (OBIA). *Remote Sensing*, 10(9), 1331. <https://doi.org/10.3390/rs10091331>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.
- Yen P. Q., & Hieu N. (2017). Removing Sun Glint from Optical Satellite Images of the Shallow Water Areas around Islands in the Spratly Islands Archipelago. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 33(3). <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4109>.
- Zoffoli, M., Frouin, R., & Kampel, M. (2014). Water Column Correction for Coral Reef Studies by Remote Sensing. *Sensors*, 14(9), 16881–16931. <https://doi.org/10.3390/s140916881>.