

Penginderaan Jauh dan Fotogrametri 3D untuk Pemetaan dan Analisis Kuantitatif Terumbu Karang

Firman Farid Muhsoni
Dedi Irawan



PT. GHANI PRESS GROUP

Penginderaan Jauh dan Fotogrametri 3D untuk Pemetaan dan Analisis Kuantitatif Terumbu Karang

Penulis:

Firman Farid Muhsoni & Dedi Irawan

Desain Cover:

Umar Khasan

Layouter:

Tyas Dzawil Istiqomah

Editor Naskah:

Dyah Ayu Sulistyio Rini, S.Kel, M.T.

14 x 21 cm, v-217

ISBN: 978-634-05-1039-3

Anggota IKAPI: No. 468/JTI/2026

Diterbitkan oleh: PT GHANI PRESS GROUP

**Alamat:**

Bumi Permata Raya Blok 8 No. 28 Tanjung, Lamongan

HP. 0896-5710-0105

Email: ptghanipress@gmail.com

Website: <https://ghanipress.com/>

© Hak Cipta 2026 pada penulis

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- a. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- b. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- c. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- d. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku yang berjudul “Penginderaan Jauh dan Fotogrametri 3D untuk Pemetaan dan Analisis Kuantitatif Terumbu Karang” ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai upaya untuk memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode monitoring ekosistem terumbu karang yang lebih akurat, efisien, dan berbasis teknologi.

Ekosistem terumbu karang merupakan salah satu ekosistem laut yang memiliki nilai ekologis, ekonomis, dan sosial yang sangat penting. Namun demikian, tekanan akibat perubahan iklim, aktivitas manusia, serta degradasi lingkungan pesisir telah menyebabkan penurunan kualitas ekosistem ini secara signifikan. Kondisi tersebut menuntut adanya pendekatan monitoring yang tidak hanya berbasis metode konvensional, tetapi juga mampu memanfaatkan perkembangan teknologi modern secara optimal.

Buku ini disusun secara sistematis dengan mengintegrasikan konsep dasar ekologi terumbu karang, metode survei konvensional, hingga pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dan fotogrametri tiga dimensi. Selain itu, buku ini juga menyajikan pendekatan analisis kuantitatif, seperti estimasi volume, berat, serta stok karbon terumbu karang, yang menjadi aspek penting dalam kajian ekosistem modern.

Akhir kata, kami berharap buku ini dapat memberikan manfaat bagi upaya konservasi dan pengelolaan terumbu karang secara berkelanjutan.

Bangkalan, Mei 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
BAGIAN I	
DASAR ILMU DAN KONSEP	1
BAB I	
Pendahuluan.....	2
BAB II	
Ekologi dan Dinamika Terumbu Karang	21
BAGIAN II	
METODE KONVENSIONAL SURVEI TERUMBU KARANG	32
BAB III	
Metode <i>Line Intercept Transect</i> (LIT)	33
BAB IV	
Metode <i>Underwater Photo Transect</i>	57
BAGIAN III	
TEKNOLOGI PENGINDERAAN JAUH	85
BAB V	
Penginderaan Jauh untuk Terumbu Karang.....	86

BAB VI	
Fotogrametri 3D Underwater.....	115
BAGIAN IV	
INTEGRASI DAN ANALISIS SPASIAL	137
BAB VII	
Integrasi Data Drone dan Foto 3D.....	138
BAGIAN V	
PEMODELAN KUANTITATIF TERUMBU KARANG	155
BAB VIII	
Model Estimasi Volume dan Berat Karang	156
BAB IX	
Estimasi Stok Karbon Terumbu Karang.....	175
DAFTAR PUSTAKA.....	199
BIODATA PENULIS.....	215

BAGIAN I

DASAR ILMU DAN KONSEP

BAB I

Pendahuluan

➤ Latar Belakang Degradasi Terumbu Karang

Ekosistem terumbu karang merupakan salah satu ekosistem laut yang paling kompleks, produktif, dan memiliki nilai ekologis serta ekonomis yang sangat tinggi di dunia. Terumbu karang terbentuk dari koloni organisme kecil yang disebut polip karang, yang termasuk dalam kelompok hewan Cnidaria. Polip-polip ini hidup secara berkoloni dan menghasilkan kerangka keras dari kalsium karbonat yang secara bertahap membentuk struktur terumbu dalam jangka waktu yang sangat panjang. Keunikan utama dari ekosistem ini terletak pada adanya hubungan simbiosis mutualistik antara polip karang dengan alga mikroskopis bersel satu yang dikenal sebagai *zooxanthellae*. Alga ini hidup di dalam jaringan tubuh karang dan berperan dalam proses fotosintesis yang menghasilkan energi dalam bentuk senyawa organik. Energi tersebut digunakan oleh karang untuk pertumbuhan dan pembentukan kerangka, sementara *zooxanthellae* memperoleh perlindungan dan nutrisi dari inangnya. Selain itu, pigmen yang dihasilkan oleh *zooxanthellae* juga memberikan warna-warna cerah yang khas pada terumbu karang, sehingga menjadikannya salah satu ekosistem paling indah di dunia (Nybakken & Willard, 2005).

Indonesia memiliki posisi yang sangat strategis dalam konteks keanekaragaman hayati laut global karena terletak di kawasan yang dikenal sebagai Segitiga Karang Dunia (*Coral Triangle*). Kawasan ini merupakan pusat keanekaragaman terumbu karang tertinggi di dunia, dengan jumlah spesies yang jauh lebih besar dibandingkan wilayah lain. Luas terumbu karang Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 25.000 km² dan mencakup hampir 70% spesies karang dunia, sehingga menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara kunci dalam upaya konservasi dan pengelolaan ekosistem laut secara global (Burke et al., 2012; Veron et al., 2009). Keberadaan terumbu karang yang luas dan beragam ini tidak hanya penting bagi kelestarian *biodiversitas*, tetapi juga menjadi penopang utama kehidupan masyarakat pesisir yang bergantung pada sumber daya laut.

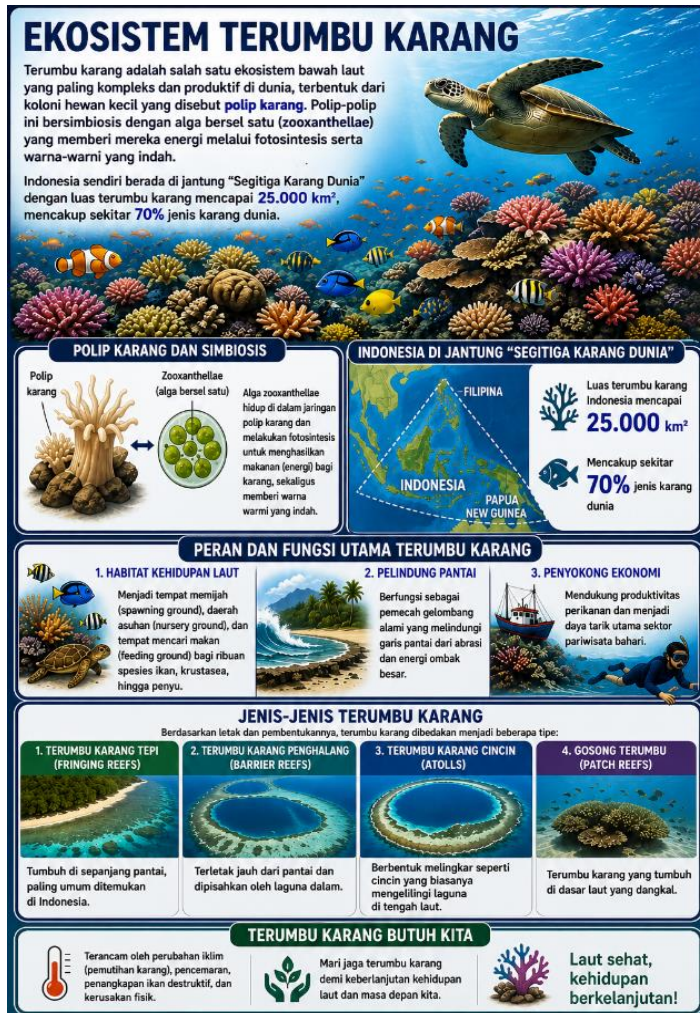
Dari sisi struktur ekologis, terumbu karang terbentuk melalui proses biokimia yang kompleks, melibatkan sekresi kalsium karbonat oleh polip karang. Struktur ini kemudian berkembang menjadi habitat tiga dimensi yang menyediakan ruang hidup bagi berbagai organisme laut. Produktivitas tinggi pada ekosistem ini sebagian besar ditopang oleh efisiensi pemanfaatan energi melalui simbiosis antara karang dan *zooxanthellae*. *Zooxanthellae* mampu menyediakan hingga 90% kebutuhan energi karang melalui fotosintesis, sehingga memungkinkan terumbu karang berkembang bahkan di perairan yang relatif miskin nutrisi (Falkowski et al., 1984). Namun demikian, hubungan simbiosis ini sangat rentan terhadap perubahan lingkungan, terutama

peningkatan suhu laut yang dapat menyebabkan fenomena pemutihan karang atau coral bleaching. Dalam kondisi tersebut, *zooxanthellae* keluar dari jaringan karang, sehingga karang kehilangan sumber energi utama dan berpotensi mengalami kematian jika kondisi stres berlangsung dalam jangka waktu lama (Hoegh-Guldberg, 1999). Visualisasi ekosistem terumbu karang dalam Gambar 1.

Secara ekologis, terumbu karang memiliki peran yang sangat vital sebagai habitat bagi berbagai organisme laut. Ekosistem ini berfungsi sebagai tempat pemijahan, daerah asuhan, dan lokasi mencari makan bagi ribuan spesies, termasuk ikan, krustasea, moluska, dan reptil laut seperti penyu. Keanekaragaman hayati yang tinggi ini menjadikan terumbu karang sebagai salah satu pusat kehidupan laut yang paling penting di dunia. Diperkirakan sekitar 25% spesies ikan laut bergantung pada terumbu karang, meskipun luasnya hanya mencakup sebagian kecil dari total area lautan (Spalding & Ravilious, 2002). Dengan demikian, keberadaan terumbu karang sangat menentukan keseimbangan ekosistem laut secara keseluruhan.

Selain berfungsi sebagai habitat, terumbu karang juga memiliki peran penting dalam melindungi wilayah pesisir. Struktur fisik terumbu mampu meredam energi gelombang laut secara signifikan sebelum mencapai daratan. Terumbu karang dapat mengurangi hingga 97% energi gelombang, sehingga berperan sebagai pemecah gelombang alami yang melindungi garis pantai dari abrasi dan kerusakan akibat badai (Ferrario et al., 2014).

Fungsi ini sangat penting terutama bagi negara kepulauan seperti Indonesia yang memiliki garis pantai yang sangat panjang dan rentan terhadap dinamika laut.



Gambar 1. Ekosistem Terumbu karang

Dari perspektif ekonomi, terumbu karang memberikan kontribusi yang sangat besar, khususnya dalam sektor perikanan dan pariwisata. Ekosistem ini mendukung produktivitas perikanan melalui penyediaan habitat bagi berbagai spesies ikan yang memiliki nilai ekonomis tinggi. Selain itu, keindahan terumbu karang menjadikannya daya tarik utama dalam kegiatan wisata bahari seperti menyelam dan snorkeling. Secara global, nilai ekonomi jasa ekosistem terumbu karang diperkirakan mencapai ratusan miliar dolar setiap tahunnya (Costanza et al., 2014). Di Indonesia, kontribusi ini sangat signifikan dalam meningkatkan pendapatan masyarakat pesisir dan daerah wisata.

Berdasarkan letak dan proses pembentukannya, terumbu karang dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe utama, yaitu terumbu karang tepi, terumbu karang penghalang, terumbu karang cincin, dan gosong terumbu. Terumbu karang tepi merupakan tipe yang paling umum ditemukan di Indonesia dan tumbuh langsung di sepanjang garis pantai pada perairan dangkal. Terumbu karang penghalang terletak lebih jauh dari pantai dan biasanya dipisahkan oleh laguna yang dalam. Sementara itu, terumbu karang cincin atau atoll berbentuk melingkar dan mengelilingi laguna di tengah laut, yang terbentuk melalui proses geologi jangka panjang sebagaimana dijelaskan oleh Darwin (1842). Gosong terumbu merupakan terumbu kecil yang tumbuh terpisah di perairan dangkal, biasanya berada di dalam laguna atau di antara struktur terumbu lainnya.

Meskipun memiliki berbagai manfaat yang sangat besar, ekosistem terumbu karang saat ini menghadapi berbagai ancaman serius yang sebagian besar berasal dari aktivitas manusia dan perubahan lingkungan global. Perubahan iklim yang menyebabkan peningkatan suhu laut menjadi salah satu faktor utama yang memicu terjadinya pemutihan karang secara massal. Selain itu, pencemaran laut akibat limbah industri, pertanian, dan domestik juga berkontribusi terhadap penurunan kualitas habitat terumbu karang. Aktivitas penangkapan ikan yang merusak, seperti penggunaan bahan peledak dan racun, menyebabkan kerusakan fisik yang signifikan pada struktur karang. Di sisi lain, aktivitas pariwisata yang tidak dikelola dengan baik juga dapat mempercepat degradasi ekosistem melalui kontak langsung, jangkar kapal, dan tekanan tropogenik lainnya.

Oleh karena itu, upaya konservasi dan pengelolaan terumbu karang menjadi sangat penting untuk menjamin keberlanjutan ekosistem ini. Pendekatan pengelolaan berbasis ekosistem yang terintegrasi perlu diterapkan dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, masyarakat lokal, dan sektor swasta. Penetapan kawasan konservasi laut, rehabilitasi terumbu karang melalui transplantasi, serta pemanfaatan teknologi modern seperti penginderaan jauh, fotogrametri bawah air, dan pemantauan berbasis citra satelit merupakan beberapa strategi yang dapat dilakukan. Selain itu, edukasi dan peningkatan kesadaran masyarakat pesisir juga menjadi kunci dalam menjaga kelestarian terumbu karang.

Secara keseluruhan, ekosistem terumbu karang merupakan aset yang sangat berharga bagi kehidupan manusia dan keberlanjutan lingkungan laut. Perannya yang mencakup aspek ekologis, perlindungan pesisir, dan ekonomi menjadikannya sebagai salah satu ekosistem yang harus diprioritaskan dalam upaya konservasi global. Dengan pengelolaan yang tepat dan berbasis ilmu pengetahuan, terumbu karang di Indonesia diharapkan dapat terus memberikan manfaat bagi generasi sekarang dan yang akan datang.

➤ **Perkembangan Teknologi Monitoring Ekosistem Laut**

Perkembangan teknologi dalam monitoring ekosistem laut, khususnya terumbu karang, mengalami kemajuan yang sangat signifikan dalam beberapa dekade terakhir seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan data yang akurat, cepat, dan berskala luas untuk mendukung pengelolaan sumber daya pesisir yang berkelanjutan. Pada tahap awal, kegiatan monitoring ekosistem laut didominasi oleh pendekatan konvensional berbasis survei lapangan langsung, seperti penyelaman dengan metode transek, pengamatan visual, serta pencatatan manual kondisi substrat dan biota laut. Pendekatan ini memiliki keunggulan dalam menghasilkan data detail dengan tingkat akurasi tinggi pada skala lokal, namun di sisi lain memiliki keterbatasan yang cukup mendasar, terutama terkait cakupan area yang relatif sempit, tingginya kebutuhan sumber daya manusia, serta keterbatasan dalam frekuensi pengamatan akibat kendala waktu, biaya,

dan kondisi lingkungan (Hill & Wilkinson, 2004). Selain itu, metode konvensional juga cenderung sulit untuk diterapkan dalam monitoring jangka panjang pada wilayah yang luas dan heterogen.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, pendekatan berbasis penginderaan jauh (*remote sensing*) mulai dikembangkan sebagai solusi untuk mengatasi berbagai keterbatasan tersebut. Teknologi ini memungkinkan pengumpulan data tanpa kontak langsung dengan objek yang diamati, sehingga dapat mencakup wilayah yang sangat luas dalam waktu yang relatif singkat. Penggunaan citra satelit dalam monitoring ekosistem laut telah menjadi salah satu pendekatan utama dalam kajian oseanografi modern, karena mampu menyediakan informasi spasial yang konsisten dan berkelanjutan. Citra satelit dengan resolusi menengah hingga tinggi, seperti Landsat dan Sentinel-2, telah banyak dimanfaatkan untuk pemetaan tutupan terumbu karang, klasifikasi habitat bentik, serta analisis perubahan lingkungan laut secara temporal (Hochberg & Atkinson, 2003). Meskipun demikian, keterbatasan resolusi spasial dan pengaruh kondisi atmosfer serta kolom air masih menjadi tantangan dalam interpretasi data penginderaan jauh berbasis satelit.

Dalam perkembangan selanjutnya, penggunaan kendaraan udara tak berawak atau *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV), yang lebih dikenal sebagai drone, menjadi terobosan penting dalam monitoring ekosistem laut. Teknologi ini menawarkan resolusi spasial yang sangat tinggi hingga tingkat sentimeter, sehingga me-

memungkinkan identifikasi detail struktur terumbu karang yang tidak dapat dicapai oleh citra satelit konvensional. Selain itu, UAV memiliki fleksibilitas operasional yang tinggi, biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan survei udara konvensional, serta kemampuan untuk melakukan pengambilan data secara berulang dalam interval waktu yang singkat (Anderson et al., 2013). Dalam konteks riset terumbu karang, penggunaan drone telah terbukti mampu menghasilkan peta distribusi terumbu karang yang detail serta mendukung analisis klasifikasi tutupan karang secara lebih akurat. Hasil studi menunjukkan bahwa pendekatan berbasis UAV mampu meningkatkan ketelitian dalam pemetaan habitat serta mengidentifikasi variasi spasial yang lebih kompleks dibandingkan metode konvensional (Muhsoni et al., 2025).

Selain perkembangan pada teknologi pemetaan permukaan, inovasi signifikan juga terjadi dalam teknik monitoring bawah air melalui pemanfaatan fotogrametri berbasis *Structure from Motion* (SfM). Teknologi ini memungkinkan rekonstruksi model tiga dimensi (3D) dari objek atau lingkungan berdasarkan kumpulan citra dua dimensi yang diambil dari berbagai sudut. Dalam konteks ekosistem terumbu karang, fotogrametri bawah air memungkinkan peneliti untuk membangun model struktur karang secara detail dan akurat tanpa harus melakukan pengukuran fisik secara langsung. Pendekatan ini memberikan keunggulan dalam menghasilkan parameter ekologis yang sebelumnya sulit diukur, seperti volume karang, biomassa, serta kompleksitas struktur yang

berperan penting dalam mendukung keanekaragaman hayati (Burns et al., 2015; Westoby et al., 2012). Metode ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam estimasi parameter struktural karang dan dapat digunakan sebagai alat monitoring non-destruktif yang sangat efektif (Figueira et al., 2015). Temuan empiris dari studi yang dilakukan oleh Muhsoni juga menunjukkan bahwa pendekatan fotogrametri 3D mampu memberikan estimasi volume dan biomassa karang dengan tingkat korelasi yang tinggi terhadap metode pengukuran langsung (Handoko et al., 2025; Muhsoni & Irawan, 2023).

Integrasi antara teknologi UAV dan fotogrametri tiga dimensi menjadi salah satu inovasi paling menjanjikan dalam monitoring ekosistem terumbu karang modern. Pendekatan ini memungkinkan analisis multi-skala yang komprehensif, di mana data UAV digunakan untuk pemetaan skala luas dan identifikasi pola distribusi habitat, sementara data fotogrametri 3D digunakan untuk analisis detail pada tingkat mikro terkait struktur dan kondisi koloni karang. Dengan mengombinasikan kedua pendekatan ini, peneliti dapat memperoleh gambaran yang lebih utuh mengenai kondisi ekosistem, baik dari aspek spasial maupun struktural. Integrasi ini juga memungkinkan analisis perubahan ekosistem secara temporal dengan tingkat presisi yang tinggi, sehingga sangat mendukung dalam kegiatan monitoring jangka panjang dan evaluasi efektivitas program konservasi (Casella et al., 2017). Studi yang dilakukan oleh Muhsoni dan timnya menunjukkan bahwa pendekatan terintegrasi ini mampu meningkatkan

kualitas data monitoring serta memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap dinamika ekosistem terumbu karang (Muhsoni et al., 2026).

Dengan demikian, perkembangan teknologi monitoring ekosistem laut telah bertransformasi dari pendekatan konvensional yang bersifat lokal dan terbatas menuju sistem berbasis teknologi tinggi yang mampu menghasilkan data berskala luas, detail, dan multi-dimensi. Transformasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengumpulan data, tetapi juga membuka peluang baru dalam analisis ekosistem yang lebih mendalam dan berbasis bukti ilmiah. Kedepan, integrasi berbagai teknologi, termasuk kecerdasan buatan dan analisis data spasial lanjutan, diperkirakan akan semakin memperkuat kemampuan monitoring ekosistem laut dalam mendukung pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan.

➤ **Keterbatasan Metode Konvensional**

Metode konvensional dalam survei terumbu karang, seperti *Line Intercept Transect* (LIT) dan *Underwater Photo Transect* (UPT), telah lama menjadi pendekatan utama dalam pemantauan kondisi ekosistem terumbu karang. Sejak dikembangkan protokol standar oleh *Global Coral Reef Monitoring Network* dan berbagai lembaga kelautan. Metode LIT pada dasarnya digunakan untuk mengukur persentase tutupan karang hidup dengan cara mencatat panjang koloni karang yang memotong garis transek yang diletakkan di dasar laut. Pendekatan ini dinilai sederhana, relatif murah, dan

mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai kondisi tutupan karang pada suatu lokasi tertentu (English et al., 1997). Sementara itu, metode UPT merupakan pengembangan dari pendekatan visual yang memanfaatkan dokumentasi fotografi bawah air sepanjang transek untuk kemudian dianalisis di laboratorium atau melalui perangkat lunak pengolahan citra, sehingga memungkinkan adanya dokumentasi permanen yang dapat ditinjau ulang (Hill & Wilkinson, 2004).

Meskipun kedua metode ini telah terbukti efektif dalam menghasilkan data dasar mengenai tutupan karang, metode konvensional tersebut memiliki keterbatasan yang cukup signifikan, terutama dalam menggambarkan kompleksitas struktur ekosistem terumbu karang secara menyeluruh. Salah satu keterbatasan utama dari metode LIT adalah sifatnya yang hanya mampu merepresentasikan kondisi terumbu karang dalam dimensi dua (2D), sehingga tidak dapat menangkap informasi mengenai kompleksitas struktural, seperti rugositas, volume, dan keragaman bentuk koloni karang. Padahal, kompleksitas struktur tiga dimensi merupakan salah satu faktor kunci yang menentukan fungsi ekologis terumbu karang, termasuk dalam menyediakan habitat bagi berbagai organisme laut (Graham & Nash, 2013). Selain itu, metode LIT sangat bergantung pada keahlian dan subjektivitas pengamat dalam mengidentifikasi jenis substrat di lapangan, sehingga berpotensi menimbulkan bias observasi yang

dapat memengaruhi akurasi data (Leujak & Ormond, 2007).

Metode UPT memang memberikan keunggulan dalam hal dokumentasi visual yang lebih baik dibandingkan LIT, karena data yang diperoleh berupa citra yang dapat dianalisis ulang dan disimpan sebagai arsip jangka panjang. Namun demikian, pendekatan ini tetap memiliki keterbatasan serupa, yaitu hanya mampu memberikan informasi berbasis dua dimensi dan masih memerlukan proses interpretasi manual atau semi-otomatis yang cukup kompleks dan memakan waktu. Analisis citra bawah air juga seringkali dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti kekeruhan air, pencahayaan, serta sudut pengambilan gambar, yang dapat menurunkan kualitas data dan meningkatkan ketidakpastian hasil interpretasi (Burns et al., 2015). Selain itu, metode ini tidak secara langsung memberikan estimasi kuantitatif mengenai parameter struktural seperti volume dan biomassa karang, yang semakin penting dalam studi ekologi modern dan penilaian jasa ekosistem.

Perbedaan hasil antara metode konvensional dan pendekatan berbasis teknologi modern semakin menegaskan keterbatasan metode tradisional dalam merepresentasikan kondisi ekosistem secara komprehensif. Studi empiris menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan antara hasil pengukuran menggunakan metode LIT dan pendekatan berbasis citra udara menggunakan drone. Pada lokasi riset di Pulau Gili Labak, metode LIT menghasilkan estimasi tutupan karang sebesar sekitar 62%, sementara analisis berbasis citra

drone menunjukkan nilai yang lebih rendah, yaitu sekitar 42,3% (Muhsoni et al., 2025). Perbedaan ini menunjukkan bahwa metode konvensional cenderung memiliki keterbatasan dalam cakupan spasial dan resolusi pengamatan, sehingga berpotensi menghasilkan estimasi yang kurang representatif terhadap kondisi sebenarnya di lapangan. Hal ini sejalan dengan temuan studi lain yang menunjukkan bahwa pendekatan berbasis penginderaan jauh dan fotogrametri memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menangkap heterogenitas spasial ekosistem terumbu karang (Casella et al., 2017).

Selain keterbatasan dalam aspek akurasi dan representasi data, metode konvensional juga menghadapi tantangan dalam hal efisiensi operasional. Pelaksanaan survei LIT maupun UPT memerlukan keterlibatan penyelam secara langsung di lapangan, yang tidak hanya membutuhkan waktu dan biaya yang cukup besar, tetapi juga sangat bergantung pada kondisi lingkungan seperti cuaca, arus, dan visibilitas perairan. Keterbatasan ini menjadi semakin signifikan ketika monitoring dilakukan pada skala spasial yang luas atau dalam jangka waktu yang panjang, karena akan meningkatkan kebutuhan sumber daya manusia dan logistik secara signifikan. Selain itu, risiko keselamatan bagi penyelam juga menjadi pertimbangan penting dalam pelaksanaan survei konvensional, terutama di lokasi dengan kondisi perairan yang ekstrem.

Seiring dengan perkembangan teknologi, berbagai pendekatan alternatif berbasis teknologi mulai dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan metode

konvensional. Penggunaan kendaraan udara tak berawak (UAV/drone), citra satelit resolusi tinggi, serta teknik fotogrametri tiga dimensi (*Structure from Motion*) memungkinkan pengumpulan data yang lebih luas, cepat, dan akurat, sekaligus mampu merekonstruksi struktur terumbu karang dalam dimensi tiga (Westoby et al., 2012). Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi monitoring, tetapi juga memberikan informasi yang lebih komprehensif terkait kondisi ekosistem, termasuk estimasi volume, kompleksitas struktur, dan perubahan temporal.

Dengan demikian, meskipun metode konvensional seperti LIT dan UPT masih memiliki peran penting sebagai dasar dalam monitoring terumbu karang, terutama dalam studi jangka panjang dan perbandingan historis, keterbatasannya dalam menangkap kompleksitas ekosistem secara menyeluruh menuntut adanya integrasi dengan teknologi modern. Pendekatan terpadu yang mengombinasikan metode konvensional dan teknologi berbasis penginderaan jauh diharapkan dapat menghasilkan data yang lebih akurat, efisien, dan representatif dalam mendukung pengelolaan dan konservasi ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan.

➤ **Urgensi Pendekatan Spasial dan 3D data Terumbu Karang**

Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan akan data yang akurat, komprehensif, dan berskala luas dalam monitoring ekosistem terumbu karang semakin meningkat, seiring dengan tekanan lingkungan yang

terus bertambah akibat perubahan iklim, aktivitas antropogenik, dan degradasi habitat pesisir. Kondisi ini mendorong berkembangnya pendekatan baru dalam pemantauan terumbu karang, khususnya melalui integrasi analisis spasial dan teknologi tiga dimensi (3D). Pendekatan ini muncul sebagai solusi terhadap keterbatasan metode konvensional yang umumnya hanya mampu memberikan gambaran parsial terhadap kondisi ekosistem, baik dari sisi cakupan wilayah maupun kompleksitas struktur yang diamati.

Pendekatan spasial memungkinkan analisis distribusi terumbu karang dalam skala lanskap yang luas dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG). Dengan pendekatan ini, peneliti tidak hanya mampu mengidentifikasi lokasi dan luasan terumbu karang, tetapi juga dapat menganalisis dinamika perubahan ekosistem secara temporal, seperti degradasi tutupan karang, pemutihan massal, maupun proses pemulihan alami. Penggunaan data spasial yang bersumber dari citra satelit resolusi tinggi maupun kendaraan udara tak berawak (*Unmanned Aerial Vehicles* atau UAV) telah terbukti mampu meningkatkan akurasi pemetaan habitat laut dangkal serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data yang lebih objektif (Casella et al., 2017; Hedley et al., 2016). Dalam konteks pengelolaan sumber daya pesisir, informasi spasial ini sangat penting untuk perencanaan zonasi kawasan konservasi, identifikasi area prioritas rehabilitasi, serta evaluasi efektivitas kebijakan pengelolaan lingkungan.

Di sisi lain, pendekatan tiga dimensi (3D) memberikan dimensi tambahan yang sebelumnya tidak dapat diperoleh melalui metode konvensional maupun analisis dua dimensi. Kompleksitas struktur terumbu karang merupakan salah satu indikator utama kesehatan ekosistem, karena berkaitan langsung dengan kapasitas habitat dalam mendukung keanekaragaman hayati laut. Teknologi fotogrametri berbasis *Structure from Motion* (SfM) memungkinkan rekonstruksi model tiga dimensi terumbu karang dengan tingkat detail yang sangat tinggi melalui pemrosesan citra digital yang diambil dari berbagai sudut pandang. Metode ini tidak hanya mampu merepresentasikan bentuk fisik karang secara realistis, tetapi juga memungkinkan pengukuran parameter ekologis penting seperti volume, luas permukaan, rugositas, dan kompleksitas struktural secara kuantitatif dan *non-destruktif* (Westoby et al., 2012).

Penerapan fotogrametri 3D bawah air menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan dalam meningkatkan akurasi estimasi parameter struktural karang. Model estimasi volume karang berbasis fotogrametri memiliki hubungan yang sangat kuat dengan metode pengukuran langsung, dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,8847. Nilai ini menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara model estimasi dan data referensi, sehingga memperkuat validitas pendekatan 3D sebagai alat monitoring yang andal (Muhsoni & Irawan, 2023). Temuan ini menunjukkan bahwa fotogrametri bawah air mampu menghasilkan estimasi biomassa dan kompleksitas

habitat dengan tingkat presisi yang tinggi serta dapat digunakan untuk analisis perubahan ekosistem secara temporal (Figueira et al., 2015).

Integrasi antara pendekatan spasial dan teknologi 3D semakin memperkuat kapasitas analisis dalam monitoring terumbu karang. Penggunaan UAV memungkinkan pengambilan data dengan resolusi spasial yang sangat tinggi hingga tingkat sentimeter, sehingga dapat digunakan untuk memetakan distribusi terumbu karang secara detail pada skala luas. Data ini kemudian dapat diintegrasikan dengan model 3D yang dihasilkan dari fotogrametri bawah air untuk menghasilkan analisis multi-skala yang komprehensif. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menghubungkan pola distribusi spasial dengan karakteristik struktural karang, sehingga memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kondisi dan dinamika ekosistem (Casella et al., 2017). Selain itu, integrasi ini juga mendukung analisis temporal yang lebih akurat, karena data dapat dikumpulkan secara berulang dalam interval waktu tertentu untuk memantau perubahan kondisi ekosistem secara berkelanjutan.

Keunggulan lain dari pendekatan spasial dan 3D adalah sifatnya yang non-destruktif, sehingga tidak menimbulkan kerusakan pada ekosistem yang diamati. Hal ini menjadi sangat penting dalam konteks konservasi, diharapkan tidak memberikan tekanan tambahan terhadap ekosistem yang sudah rentan. Berbeda dengan metode tradisional yang terkadang memerlukan kontak fisik langsung dengan karang, teknologi berbasis citra

memungkinkan pengumpulan data secara aman tanpa mengganggu organisme yang ada. Selain itu, efisiensi waktu dan biaya juga menjadi nilai tambah dari pendekatan ini, karena mampu mengurangi kebutuhan penyelaman intensif serta mempercepat proses pengolahan data melalui otomatisasi berbasis perangkat lunak.

Secara keseluruhan, urgensi penerapan pendekatan spasial dan tiga dimensi dalam monitoring terumbu karang tidak hanya terletak pada peningkatan akurasi dan efisiensi pengumpulan data, tetapi juga pada kemampuannya dalam menyediakan informasi yang lebih komprehensif dan multidimensi. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang mengintegrasikan aspek spasial, struktural, dan temporal secara simultan, sehingga sangat relevan dalam mendukung pengelolaan ekosistem berbasis ilmu pengetahuan. Dengan semakin berkembangnya teknologi dan meningkatnya akses terhadap perangkat penginderaan modern, pendekatan spasial dan 3D diproyeksikan akan menjadi standar baru dalam monitoring ekosistem laut di masa depan, khususnya dalam upaya konservasi dan pengelolaan terumbu karang yang berkelanjutan.

BAB II

Ekologi dan Dinamika Terumbu Karang

➤ Struktur dan Fungsi Ekosistem Terumbu Karang

Ekosistem terumbu karang merupakan salah satu sistem ekologis paling kompleks dan produktif di lingkungan laut tropis. Struktur ekosistem ini terbentuk dari koloni organisme karang hermatipik yang menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai kerangka utama pembentuk terumbu. Dalam perspektif ekologi modern, terumbu karang tidak hanya dipandang sebagai kumpulan organisme, tetapi sebagai sistem yang terintegrasi antara komponen biotik dan abiotik yang saling berinteraksi secara dinamis. Struktur fisik terumbu karang berkembang melalui proses pertumbuhan dan akumulasi kerangka karang selama ratusan hingga ribuan tahun, yang menghasilkan formasi geomorfologi seperti *reef flat*, *reef crest*, dan *reef slope*.

Ekosistem terumbu karang memiliki fungsi multidimensional yang mencakup aspek ekologis, fisik, dan sosial-ekonomi. Secara ekologis, terumbu karang berfungsi sebagai habitat utama bagi ribuan spesies organisme laut, termasuk ikan, moluska, krustasea, dan mikroorganisme. Kompleksitas struktur tiga dimensi yang

dimiliki terumbu karang memungkinkan terbentuknya berbagai relung ekologi yang mendukung keanekaragaman hayati tinggi. Hal ini diperkuat oleh riset terbaru yang menyatakan bahwa kompleksitas habitat merupakan faktor kunci dalam menjaga biodiversitas terumbu karang (McWilliam et al., 2026).

Selain fungsi sebagai habitat, terumbu karang juga berperan sebagai pelindung alami garis pantai. Struktur fisik terumbu mampu meredam energi gelombang laut, sehingga mengurangi risiko abrasi dan kerusakan wilayah pesisir. Dalam konteks ini, terumbu karang dapat dianggap sebagai benteng alami yang melindungi ekosistem daratan dan aktivitas manusia di wilayah pesisir (Kench & Owen, 2015). Di sisi lain, fungsi ekonomi terumbu karang juga sangat signifikan, terutama dalam mendukung sektor perikanan dan pariwisata bahari.

Struktur ekosistem terumbu karang juga berkaitan erat dengan fungsi biogeokimia, termasuk dalam siklus karbon global. Terumbu karang berperan sebagai penyerap karbon (*blue carbon ecosystem*) melalui proses kalsifikasi dan fotosintesis oleh *zooxanthellae*. Hal ini menjadikan terumbu karang sebagai komponen penting dalam mitigasi perubahan iklim, meskipun kapasitasnya sangat bergantung pada kondisi lingkungan yang stabil. Visualisasi struktur dan fungsi ekosistem terumbu karang dapat dilihat pada gambar 2.

STRUKTUR DAN FUNGSI EKOSISTEM TERUMBU KARANG

Terumbu karang adalah sistem ekologis kompleks dan produktif di laut tropis yang terbentuk oleh koloni karang hermatipik penghasil kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai kerangka utama pembentuk terumbu.



Gambar 2. Struktur dan Fungsi Ekosistem Terumbu Karang

➤ Faktor Lingkungan Pengontrol Ekosistem Terumbu Karang

Keberlangsungan dan dinamika ekosistem terumbu karang sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, baik fisik, kimia, maupun biologis. Faktor-faktor ini menentukan tingkat pertumbuhan, distribusi, serta ketahanan karang terhadap gangguan eksternal. Salah satu faktor paling dominan adalah suhu perairan. Karang hermatipik umumnya tumbuh optimal pada suhu antara 23–29°C, dengan suhu ideal sekitar 25°C sebagaimana ditunjukkan dalam riset terbaru mengenai pertumbuhan karang selama periode Holosen (Macedo & van Woesik, 2026). Peningkatan suhu di atas ambang batas toleransi dapat menyebabkan stres fisiologis pada karang yang berujung pada fenomena pemutihan (*coral bleaching*). Kondisi ini terjadi ketika *zooxanthellae* keluar dari jaringan karang, sehingga karang kehilangan sumber energi utama.

Selain suhu, faktor cahaya juga memiliki peran penting dalam mendukung proses fotosintesis *zooxanthellae*. Intensitas cahaya yang cukup diperlukan untuk menjaga produktivitas primer dalam ekosistem terumbu karang. Oleh karena itu, terumbu karang umumnya berkembang di perairan dangkal dengan kejernihan tinggi. Kekeruhan air akibat sedimentasi dapat menghambat penetrasi cahaya dan mengganggu proses fotosintesis.

Faktor kimia seperti salinitas, pH, dan kandungan nutrisi juga berpengaruh terhadap kesehatan karang. Perubahan salinitas yang ekstrem dapat menyebabkan

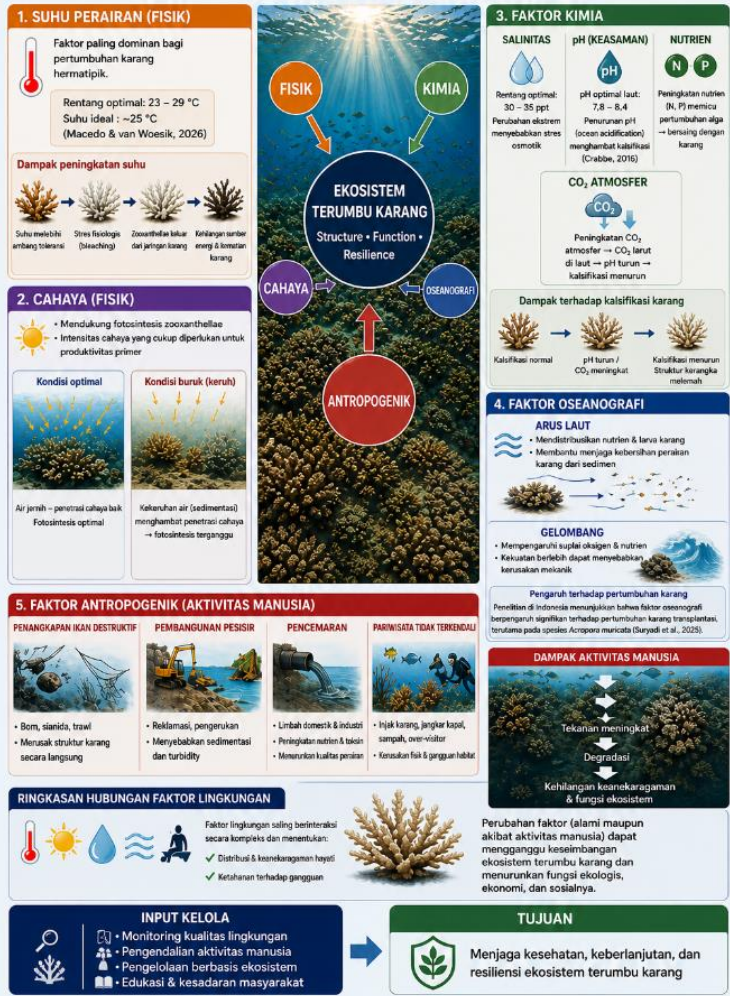
stres osmotik, sementara peningkatan nutrisi dapat memicu pertumbuhan alga yang bersaing dengan karang. Dalam konteks perubahan iklim, peningkatan kadar CO₂ di atmosfer menyebabkan penurunan pH laut (*ocean acidification*), yang dapat menghambat proses kalsifikasi karang (Crabbe, 2016).

Faktor oseanografi seperti arus dan gelombang juga memengaruhi distribusi dan pertumbuhan karang. Arus laut berperan dalam mendistribusikan nutrisi dan larva karang, serta membantu menjaga kebersihan permukaan karang dari sedimen. Di Indonesia menunjukkan bahwa faktor oseanografi memiliki pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan karang transplantasi, khususnya pada spesies *Acropora muricata* (Suryadi et al., 2025).

Selain faktor alami, faktor antropogenik juga menjadi pengontrol penting dalam dinamika ekosistem terumbu karang. Aktivitas manusia seperti penangkapan ikan destruktif, pembangunan pesisir, pencemaran, dan pariwisata yang tidak terkendali dapat menyebabkan degradasi ekosistem secara signifikan (Cortés & Reyes-Bonilla, 2017). Visualisasi faktor lingkungan pengontrol ekosistem terumbu karang dapat dilihat pada Gambar 3.

FAKTOR LINGKUNGAN PENGONTROL EKOSISTEM TERUMBU KARANG

Faktor fisik, kimia, biologis, oseanografi, dan antropogenik menentukan pertumbuhan, distribusi, dan ketahanan terumbu karang



Gambar 3. Faktor Lingkungan Pengontrol Ekosistem Terumbu Karang

➤ **Dinamika Pertumbuhan dan Kerusakan Karang**

Ekosistem terumbu karang bersifat dinamis, di mana proses pertumbuhan dan kerusakan terjadi secara simultan. Pertumbuhan karang dipengaruhi oleh proses kalsifikasi yang dikontrol oleh faktor lingkungan dan kondisi fisiologis karang. Dalam kondisi optimal, pertumbuhan karang dapat berlangsung dengan kecepatan beberapa milimeter hingga beberapa sentimeter per tahun, tergantung pada spesies dan kondisi lingkungan.

Namun demikian, proses pertumbuhan ini seringkali terganggu oleh berbagai faktor yang menyebabkan kerusakan ekosistem. Kerusakan terumbu karang dapat terjadi secara alami maupun akibat aktivitas manusia. Gangguan alami meliputi badai, predator seperti *Acanthaster planci*, serta penyakit karang. Sementara itu, gangguan antropogenik mencakup penangkapan ikan dengan bahan peledak, penggunaan racun, pencemaran, dan perubahan iklim global.

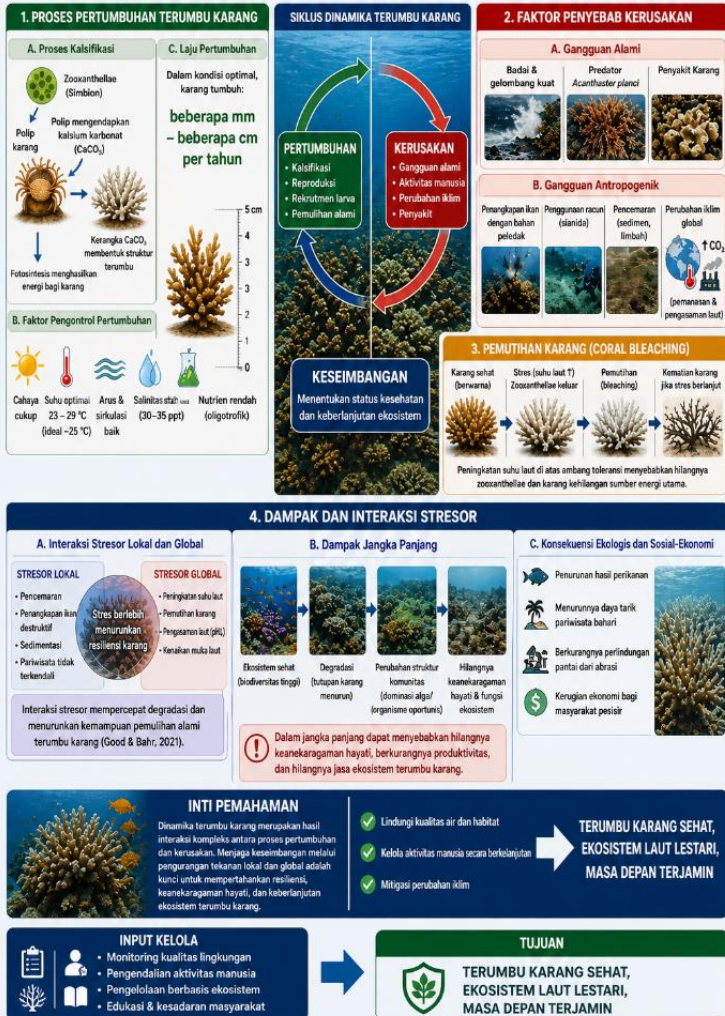
Riset di Gili Labak menunjukkan bahwa aktivitas pariwisata memiliki dampak signifikan terhadap kondisi terumbu karang. Data menunjukkan bahwa tutupan karang hidup pada lokasi dengan aktivitas wisata tinggi lebih rendah dibandingkan lokasi yang relatif alami. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan manusia dapat mempercepat degradasi ekosistem (Muhsoni & Efendy, 2017).

Selain itu, fenomena pemutihan karang yang disebabkan oleh peningkatan suhu laut menjadi ancaman global yang serius. Studi menunjukkan bahwa interaksi

antara stresor lokal dan global dapat menurunkan resiliensi ekosistem terumbu karang secara signifikan (Good & Bahr, 2021). Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat menyebabkan perubahan struktur komunitas dan hilangnya keanekaragaman hayati. Visualisasi dinamika pertumbuhan dan kerusakan terumbu karang dapat dilihat pada Gambar 4.

DINAMIKA PERTUMBUHAN DAN KERUSAKAN TERUMBU KARANG

Ekosistem terumbu karang bersifat dinamis, di mana proses pertumbuhan dan kerusakan terjadi secara simultan. Keseimbangan antara keduanya menentukan kesehatan ekosistem dan keberlanjutan fungsi terumbu karang.



Gambar 4. Dinamika Pertumbuhan dan Kerusakan Terumbu Karang.

➤ **Indikator Kesehatan Terumbu Karang**

Penilaian kesehatan terumbu karang merupakan aspek penting dalam monitoring dan pengelolaan ekosistem. Indikator kesehatan digunakan untuk mengevaluasi kondisi ekosistem serta mendeteksi perubahan yang terjadi akibat tekanan lingkungan.

Salah satu indikator utama yang digunakan adalah persentase tutupan karang hidup. Parameter ini digunakan karena mudah diukur dan dapat memberikan gambaran umum kondisi ekosistem. Namun, indikator ini tidak cukup untuk menggambarkan kompleksitas ekosistem secara keseluruhan.

Indikator lain yang semakin berkembang adalah kompleksitas struktural atau rugositas habitat. Kompleksitas ini berkaitan dengan kemampuan terumbu karang dalam menyediakan habitat bagi berbagai organisme. Teknologi fotogrametri 3D memungkinkan pengukuran parameter ini secara akurat dan non-destruktif.

Selain itu, indikator kesehatan juga mencakup keanekaragaman spesies, keberadaan penyakit karang, tingkat pemutihan, serta kondisi substrat. Studi terbaru menekankan pentingnya pendekatan multidimensional dalam menilai kesehatan terumbu karang, yang mencakup aspek biologis, struktural, dan fungsional (Correa et al., 2024).

Dalam konteks monitoring modern, integrasi berbagai indikator dengan teknologi penginderaan jauh dan analisis spasial memungkinkan evaluasi kondisi ekosistem secara lebih komprehensif. Pendekatan ini

menjadi sangat penting dalam menghadapi tantangan perubahan lingkungan yang semakin kompleks. Gambaran indikator kesehatan terumbu karang dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Indikator Kesehatan Terumbu Karang

BAGIAN II

METODE KONVENSIONAL SURVEI TERUMBU KARANG

BAB III

Metode *Line Intercept Transect* (LIT)

➤ Prinsip Dasar Metode *Line Intercept Transect* (LIT)

Metode *Line Intercept Transect* (LIT) merupakan salah satu pendekatan klasik dalam ekologi terapan yang telah digunakan secara luas dalam monitoring ekosistem terumbu karang. Metode ini berkembang dari prinsip dasar *line transect sampling* yang awalnya digunakan dalam berbagai studi ekologi darat dan kemudian diadaptasi ke dalam lingkungan laut untuk mengukur komposisi substrat bentik secara kuantitatif. Dalam konteks ekosistem terumbu karang, metode ini digunakan untuk mengukur persentase tutupan karang hidup sebagai indikator utama kondisi kesehatan ekosistem, karena tutupan karang memiliki hubungan langsung dengan fungsi ekologis, produktivitas, serta stabilitas habitat.

Secara konseptual, metode LIT didasarkan pada prinsip bahwa garis transek yang ditempatkan secara sistematis di suatu lokasi dapat digunakan sebagai representasi kondisi komunitas bentik di area tersebut. Pendekatan ini mengandalkan pengukuran panjang setiap kategori substrat yang bersinggungan langsung dengan garis transek, sehingga menghasilkan data

kuantitatif berupa proporsi relatif dari masing-masing kategori substrat. Menurut English et al., (1997) dan Hill & Wilkinson (2004), metode ini merupakan standar internasional dalam monitoring terumbu karang karena kesederhanaannya serta kemampuannya menghasilkan data yang konsisten dan dapat dibandingkan antar waktu dan lokasi.

Dalam perspektif metodologi ilmiah, LIT termasuk dalam kategori *direct observation method* yang memiliki keunggulan dalam akurasi pengukuran pada skala lokal. Prinsip ini juga sejalan dengan teori sampling transek yang menyatakan bahwa estimasi parameter ekologi dapat diperoleh secara efisien melalui pengukuran sepanjang garis transek yang ditempatkan secara representatif (Buckland et al., 2007). Selain itu, pendekatan ini juga memperhitungkan distribusi spasial organisme yang bersifat heterogen, sehingga pemilihan lokasi transek menjadi faktor kunci dalam memastikan validitas.

Namun demikian, asumsi utama dalam metode ini adalah bahwa garis transek yang digunakan mampu merepresentasikan kondisi ekosistem secara keseluruhan. Hal ini menimbulkan implikasi bahwa desain sampling, termasuk jumlah transek, panjang transek, dan distribusi lokasi, sangat menentukan kualitas data yang dihasilkan. Studi terbaru menunjukkan bahwa optimasi desain transek dapat meningkatkan kekuatan statistik data monitoring serta mengurangi bias dalam estimasi (McCord et al., 2025). Dengan demikian, penerapan metode LIT tidak hanya bergantung pada teknik

pengukuran, tetapi juga pada perencanaan sampling yang matang.

Dalam konteks ekosistem terumbu karang, metode LIT memiliki relevansi yang tinggi karena mampu memberikan informasi mengenai komposisi komunitas bentik, termasuk proporsi karang hidup, karang mati, alga, dan substrat lainnya. Informasi ini sangat penting dalam menilai kondisi ekosistem, terutama dalam mendeteksi perubahan akibat tekanan lingkungan. Studi oleh (Nadon & Field, 2005) menunjukkan bahwa metode visual seperti LIT memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi dalam mengukur tutupan karang, meskipun terdapat potensi bias yang berkaitan dengan subjektivitas pengamat.

Lebih lanjut, (Urbina-Barreto et al., 2021) menunjukkan bahwa metode LIT masih menjadi metode yang relevan dalam monitoring terumbu karang, meskipun telah berkembang berbagai teknologi modern seperti fotogrametri dan penginderaan jauh. Hal ini karena metode LIT memiliki keunggulan dalam kesederhanaan, biaya rendah, serta kemudahan implementasi di lapangan. Metode ini memiliki keterbatasan dalam menangkap kompleksitas struktur tiga dimensi terumbu karang.

Dalam praktiknya, metode LIT sering digunakan dalam studi jangka panjang karena kemampuannya menghasilkan data yang konsisten. Data ini dapat digunakan untuk memantau perubahan kondisi ekosistem dari waktu ke waktu, termasuk degradasi akibat aktivitas manusia maupun pemulihan alami. Oleh karena itu,

metode ini menjadi salah satu alat utama dalam program monitoring global, seperti yang dilakukan oleh berbagai organisasi konservasi laut.

➤ **Prosedur Pengambilan Data Lapangan**

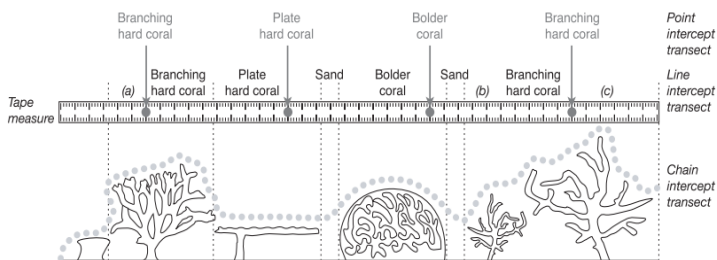
Pelaksanaan metode LIT di lapangan memerlukan tahapan yang sistematis, terstandarisasi, serta membutuhkan keterampilan teknis yang tinggi, terutama dalam kegiatan penyelaman dan identifikasi substrat bentik. Tahap awal dalam prosedur ini adalah penentuan lokasi riset yang representatif terhadap kondisi ekosistem terumbu karang. Pemilihan lokasi ini biasanya mempertimbangkan faktor ekologis, seperti zonasi habitat, serta faktor antropogenik, seperti tingkat aktivitas manusia di wilayah tersebut.

Dalam studi terumbu karang, lokasi pengamatan umumnya dibagi menjadi beberapa stasiun untuk menangkap variasi kondisi lingkungan. Setiap stasiun dipilih berdasarkan karakteristik tertentu, seperti kedalaman, tingkat kecerahan air, serta tekanan aktivitas manusia. Pendekatan ini penting untuk memastikan bahwa data yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi ekosistem secara menyeluruh.

Setelah lokasi ditentukan, transek garis dibentangkan menggunakan pita ukur dengan panjang tertentu, biasanya antara 50 hingga 100 meter. Transek ini ditempatkan secara horizontal dan sejajar garis pantai pada kedalaman tertentu, seperti 3 hingga 7 meter, yang mewakili zona ekologi tertentu, seperti *reef flat* atau *reef slope*. Penempatan transek harus mengikuti kontur dasar

laut untuk memastikan bahwa semua substrat yang bersentuhan dengan garis transek dapat diamati secara akurat.

Selanjutnya, penyelam akan melakukan pengamatan sepanjang transek dengan mencatat setiap perubahan jenis substrat. Setiap segmen substrat diukur panjangnya dan diidentifikasi berdasarkan kategori tertentu, seperti karang hidup, karang mati, alga, pasir, dan rubble. Proses identifikasi ini membutuhkan keahlian khusus dalam mengenali morfologi karang, terutama dalam klasifikasi lifeform (Gambar 6).

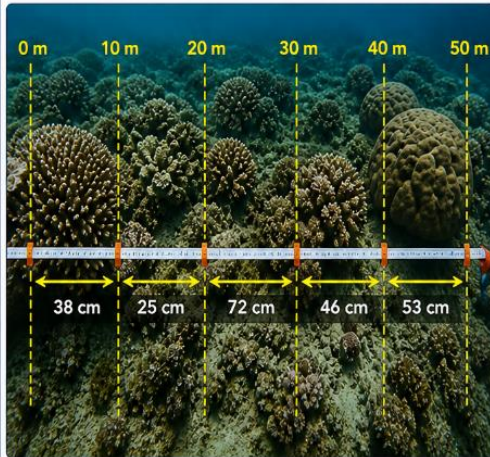


Gambar 6. Pengukuran Metode *Line Intercept Transect* (LIT) (Hill & Wilkinson, 2004)

Dalam praktiknya, proses pengambilan data ini sangat bergantung pada kemampuan penyelam dalam menjaga posisi dan stabilitas selama pengamatan. Kesalahan dalam pengukuran atau identifikasi dapat menyebabkan bias dalam data. Oleh karena itu, pelatihan dan standarisasi prosedur menjadi sangat penting dalam memastikan kualitas data yang dihasilkan.

METODE LINE INTERCEPT TRANSECT (LIT)

Transek sepanjang 50 m diletakkan di dasar perairan dan setiap substrat yang bersentuhan dengan transek dicatat dan diukur panjangnya



PROSEDUR LIT

1. Transek sepanjang 50 m dibentangkan sejajar kontur dasar perairan.
2. Catat setiap jenis substrat yang bersentuhan dengan transek.
3. Ukur panjang (cm) kontak setiap substrat pada transek.
4. Hitung persentase tutupan setiap kategori substrat.

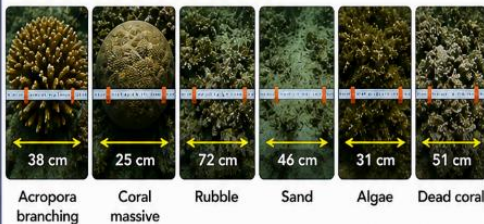
RUMUS PERHITUNGAN

$$\% \text{ Tutupan} = \frac{Li}{L \text{ total}} \times 100\%$$

Li = panjang total substrat i yang bersentuhan dengan transek (cm)

L total = panjang transek (cm)

CONTOH PENCATATAN DATA LIT



PERALATAN



CONTOH HASIL PERHITUNGAN

Kategori Substrat	Acropora branching	Coral massive	Rubble	Sand	Algae	Dead coral	Total
Panjang (cm)	38	25	72	46	31	53	265
% Tutupan	14,3	9,4	27,2	17,4	11,7	20,0	100

CATATAN

Identifikasi substrat mengikuti kategori standar LIT (English et al., 1997;

Gambar 7. Metode *Line Intercept Transect* (LIT)

Gambar 7. di atas menggambarkan prinsip kerja metode *Line Intercept Transect* (LIT) dalam monitoring ekosistem terumbu karang. Seorang penyelam membentangkan pita transek (*transect line*) secara horizontal di atas permukaan substrat dasar laut yang terdiri dari berbagai komponen bentik, seperti karang hidup, karang mati, alga, dan pasir. Garis transek ini berfungsi sebagai acuan utama dalam pengukuran, di mana setiap jenis substrat yang bersinggungan langsung dengan garis tersebut diidentifikasi dan diukur panjangnya. Pada ilustrasi tersebut, pita transek terlihat melintasi berbagai bentuk koloni karang dengan variasi morfologi, yang merepresentasikan heterogenitas ekosistem terumbu karang. Setiap segmen yang bersentuhan dengan garis transek dicatat berdasarkan kategori tertentu (misalnya *branching coral*, *massive coral*, atau substrat non-karang), kemudian panjang masing-masing segmen tersebut dihitung untuk menentukan proporsi relatifnya terhadap total panjang transek.

Desain sampling memiliki pengaruh signifikan terhadap akurasi data. Studi oleh Nomani et al., (2012) menekankan bahwa distribusi spasial transek dan kepadatan objek yang diamati dapat memengaruhi estimasi parameter ekologi. Oleh karena itu, penggunaan beberapa transek pada lokasi yang berbeda sangat dianjurkan untuk meningkatkan representativitas data. Selain itu, faktor lingkungan seperti arus, visibilitas air, dan kondisi cuaca juga dapat memengaruhi pelaksanaan survei. Dalam kondisi visibilitas rendah, identifikasi

substrat menjadi lebih sulit, sehingga dapat menurunkan akurasi data. Oleh karena itu, survei biasanya dilakukan pada kondisi lingkungan yang optimal.

Secara keseluruhan, prosedur pengambilan data dalam metode LIT merupakan kombinasi antara teknik sampling yang sistematis dan keterampilan lapangan yang tinggi. Keberhasilan metode ini sangat bergantung pada perencanaan sampling yang baik, pelaksanaan yang konsisten, serta kemampuan dalam mengidentifikasi substrat secara akurat.

➤ **Perhitungan Persentase Tutupan Karang**

Data yang diperoleh dari pengukuran lapangan menggunakan metode *Line Intercept Transect* (LIT) selanjutnya dianalisis untuk menghitung persentase tutupan karang sebagai indikator utama kondisi kesehatan ekosistem terumbu karang. Parameter tutupan karang hidup (*live coral cover*) secara luas diakui sebagai salah satu indikator paling penting dalam ekologi terumbu karang karena memiliki keterkaitan langsung dengan produktivitas ekosistem, fungsi habitat, serta stabilitas komunitas bentik (English et al., 1997; Gomez & Yap, 1988). Oleh karena itu, proses perhitungan persentase tutupan karang menjadi tahap krusial dalam interpretasi hasil survei lapangan.

Secara matematis, perhitungan persentase tutupan karang dilakukan dengan membandingkan total panjang setiap kategori substrat yang bersinggungan dengan garis transek terhadap panjang total transek yang

digunakan dalam pengukuran. Formula yang digunakan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Persentase Tutupan} = \frac{\text{Total panjang jenis substrat}}{\text{Total panjang transek}} \times 100\%$$

Dalam konteks ini, “jenis substrat” dapat mencakup berbagai kategori bentuk, seperti karang hidup, karang mati, alga, pasir, rubble, dan komponen lainnya yang ditemukan sepanjang garis transek. Data mentah yang diperoleh di lapangan biasanya berupa panjang segmen masing-masing kategori substrat, yang kemudian dijumlahkan untuk setiap kategori sebelum dikonversi menjadi persentase. Proses ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh gambaran kuantitatif mengenai komposisi komunitas bentuk pada lokasi pengamatan.

Menurut Hill & Wilkinson, (2004), keunggulan utama pendekatan ini terletak pada kesederhanaannya serta kemampuannya menghasilkan data yang mudah dibandingkan antar lokasi dan waktu. Hal ini menjadikan metode LIT sebagai salah satu metode standar dalam monitoring terumbu karang global, termasuk dalam program *Global Coral Reef Monitoring Network* (GCRMN). Selain itu, metode ini juga memungkinkan analisis tren jangka panjang, yang sangat penting dalam mengevaluasi perubahan kondisi ekosistem akibat tekanan lingkungan.

Hasil perhitungan persentase tutupan karang selanjutnya digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi ekosistem berdasarkan standar tertentu. Di Indonesia,

klasifikasi kondisi terumbu karang mengacu pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 4 Tahun 2001, yang membagi kondisi terumbu karang menjadi empat kategori utama, yaitu sangat baik (tutupan karang hidup lebih dari 75%), baik (50–75%), sedang (25–50%), dan rusak (kurang dari 25%). Klasifikasi ini широко digunakan dalam berbagai studi dan laporan monitoring karena memberikan kerangka evaluasi yang sederhana namun informatif dalam menilai kondisi ekosistem.

Dalam penerapannya, hasil perhitungan tutupan karang sering menunjukkan variasi yang signifikan antar lokasi pengamatan. Hal ini mencerminkan heterogenitas kondisi lingkungan serta pengaruh faktor-faktor eksternal, baik alami maupun antropogenik. Studi di Pulau Gili Labak menunjukkan bahwa persentase tutupan karang hidup bervariasi antar stasiun, dengan nilai mencapai 70,92% dan 72,29% pada beberapa lokasi yang dikategorikan sangat baik, sementara pada lokasi lain hanya sebesar 45,99% yang termasuk kategori sedang. Variasi ini mengindikasikan adanya perbedaan tekanan lingkungan, seperti aktivitas pariwisata, sedimentasi, dan gangguan antropogenik lainnya, yang memengaruhi kondisi ekosistem secara lokal.

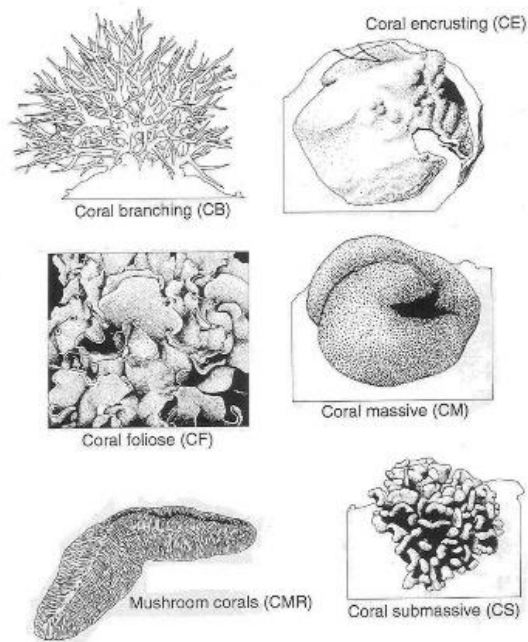
Dengan demikian, perhitungan persentase tutupan karang menggunakan metode LIT merupakan langkah penting dalam monitoring ekosistem terumbu karang, namun harus diinterpretasikan secara hati-hati dengan mempertimbangkan keterbatasan metode serta konteks ekologis yang lebih luas. Integrasi dengan metode lain, baik konvensional maupun berbasis teknologi modern,

menjadi pendekatan yang semakin penting untuk menghasilkan data yang lebih akurat dan komprehensif dalam mendukung pengelolaan dan konservasi ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan.

➤ **Klasifikasi Lifeform**

Dalam metode LIT, klasifikasi lifeform merupakan aspek penting yang digunakan untuk mengidentifikasi tipe pertumbuhan karang. Lifeform mengacu pada bentuk morfologi koloni karang yang mencerminkan adaptasi terhadap lingkungan, seperti arus, cahaya, dan sedimentasi.

Beberapa kategori lifeform yang umum digunakan meliputi *Acropora branching*, *Acropora tabulate*, *massive coral*, *foliose coral*, *encrusting coral*, dan *submassive coral*. Klasifikasi ini digunakan karena lebih praktis dibandingkan identifikasi hingga tingkat spesies, serta cukup representatif dalam menggambarkan kondisi ekosistem (Gambar 8).



Gambar 8. Kategori Lifeform

Gambar 8 di atas memperlihatkan klasifikasi *lifeform* atau bentuk pertumbuhan koloni karang yang umum digunakan dalam metode *Line Intercept Transect* (LIT). Setiap tipe lifeform menggambarkan morfologi koloni karang yang berbeda, yang merupakan hasil adaptasi terhadap kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya, arus laut, dan tingkat sedimentasi. Bentuk pertumbuhan ini menjadi indikator penting dalam memahami struktur dan fungsi ekosistem terumbu karang.

Karang dengan tipe *Acropora branching* ditunjukkan dengan bentuk bercabang seperti ranting pohon, yang umumnya berkembang pada perairan dengan arus relatif kuat dan cahaya tinggi. Tipe ini memiliki laju pertumbuhan yang cepat, namun relatif rentan terhadap gangguan fisik. Sementara itu, *Acropora tabulate* memiliki bentuk menyerupai meja atau datar yang melebar, yang berfungsi untuk memaksimalkan penyerapan cahaya dalam kondisi perairan yang jernih.

Tipe *massive coral* digambarkan sebagai koloni berbentuk bulat atau kubah yang padat dan kokoh. Karang jenis ini memiliki ketahanan yang tinggi terhadap tekanan lingkungan seperti gelombang kuat dan sedimentasi, meskipun pertumbuhannya relatif lambat. Selanjutnya, *foliose coral* memiliki bentuk menyerupai lembaran atau daun yang berlapis-lapis, yang memungkinkan efisiensi dalam menangkap cahaya pada kondisi tertentu.

Karang dengan tipe *encrusting* tumbuh menyebar dan menempel pada substrat keras dengan bentuk yang relatif datar, sehingga mampu bertahan pada kondisi arus kuat. Sedangkan *submassive coral* merupakan bentuk peralihan antara karang bercabang dan masif, dengan struktur yang lebih kompleks dan adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan.



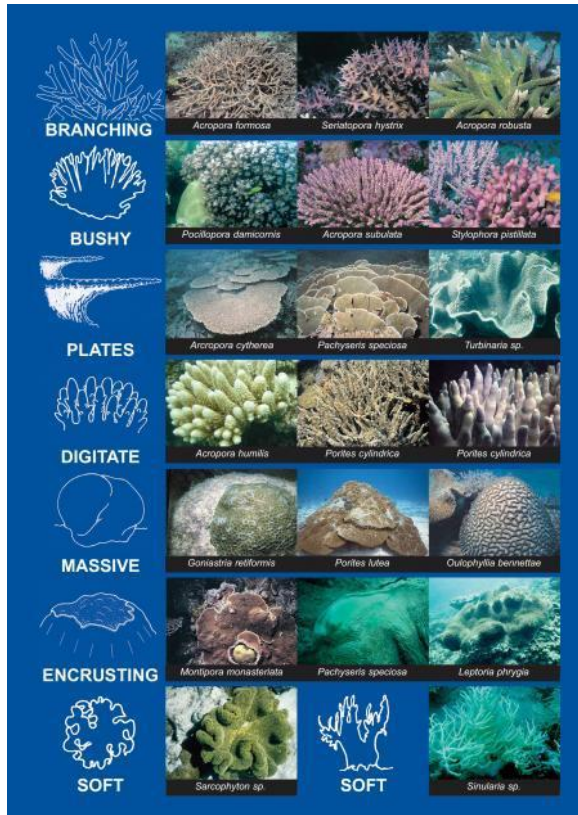
Gambar 9. Bentuk Morfologi (*Growth Forms*) Terumbu Karang

Gambar 9 tersebut menunjukkan berbagai bentuk morfologi (*growth forms*) terumbu karang dalam kajian Ekologi Terumbu Karang. Setiap bentuk menggambarkan cara koloni karang tumbuh dan beradaptasi terhadap lingkungan seperti arus, cahaya, dan sedimen.

Berikut keterangan masing-masing bentuk:

- a. *Arborescent* (bercabang seperti pohon), Karang tumbuh dengan cabang-cabang menyerupai pohon atau semak. Umumnya ditemukan di perairan dengan arus cukup kuat dan cahaya tinggi.
- b. *Corymbose* (bercabang rapat di bagian atas), Bentuknya seperti semak dengan cabang pendek dan padat di bagian atas, biasanya melebar seperti meja kecil.

- c. *Columnar* (berbentuk kolom), Karang tumbuh tegak seperti pilar atau tiang, sering ditemukan di area dengan sedimentasi sedang.
- d. *Digitate* (berbentuk jari), Memiliki tonjolan seperti jari-jari tanpa banyak percabangan, lebih sederhana dibanding *arborescent*.
- e. *Folios* (berbentuk lembaran/daun), Tersusun seperti lembaran tipis atau lipatan yang melebar, efektif menangkap cahaya di perairan lebih dalam.
- f. *Free-living* (hidup bebas), Tidak melekat permanen pada substrat, dapat berpindah atau terguling oleh arus.
- g. *Massive* (masif/bulat besar), Berbentuk padat seperti bongkahan atau kubah, sangat kuat terhadap gelombang dan tekanan lingkungan.
- h. *Tabular* (berbentuk meja), Melebar horizontal seperti meja, memberikan naungan bagi organisme lain di bawahnya.
- i. *Encrusting* (menempel mengikuti substrat), Tumbuh tipis menutupi permukaan batu atau substrat, sangat adaptif terhadap arus kuat.



Gambar 10. Klasifikasi Bentuk Pertumbuhan (*Growth Forms*) dan Contoh Spesies Karang (English et al., 1997; Hill & Wilkinson, 2004)

Gambar 10 ini merupakan klasifikasi bentuk pertumbuhan (growth forms) dan contoh spesies karang dalam kajian Ekologi Terumbu Karang. Di sisi kiri ditampilkan tipe morfologi utama, sementara di sisi kanan ditunjukkan contoh spesies nyata untuk tiap bentuk tersebut. Berikut keterangan tiap kategori:

- a. *Branching* (bercabang), Karang dengan percabangan kompleks seperti pohon. Contoh: *Acropora formosa*, *Seriatopora hystrix*, *Acropora robusta*. Umumnya tumbuh cepat, sensitif terhadap gangguan, dan dominan di perairan dangkal.
- b. *Bushy* (semak/rapat), Bentuknya lebih rapat dan kompak dibanding branching. Contoh: *Pocillopora damicornis*, *Acropora subulata*, *Stylophora pistillata*. Memberikan habitat kompleks bagi ikan kecil.
- c. *Plates* (lembaran/meja), Karang melebar horizontal seperti piring atau meja. Contoh: *Acropora cytherea*, *Pachyseris speciosa*, *Turbinaria sp.* Efisien menangkap cahaya, umum di perairan agak dalam.
- d. *Digitate* (berbentuk jari), Memiliki tonjolan seperti jari tanpa banyak percabangan. Contoh: *Acropora humilis*, *Porites cylindrica*. Adaptif terhadap arus sedang hingga kuat.
- e. *Massive* (masif), Berbentuk besar, padat, seperti kubah atau bongkahan. Contoh: *Goniastrea retiformis*, *Porites lutea*, *Oulophyllia bennettiae*. Tahan terhadap tekanan lingkungan dan pertumbuhan lambat.
- f. *Encrusting* (menempel), Tumbuh menutupi substrat seperti lapisan tipis. Contoh: *Montipora monasteriata*, *Pachyseris speciosa*, *Leptoria Phrygia*. Cocok di area berarus kuat dan substrat keras.
- g. *Soft Coral* (karang lunak), Tidak memiliki kerangka kalsium keras seperti karang batu. Contoh: *Sarcophyton sp.*, *Sinularia sp.* Lebih fleksibel, sering ditemukan di berbagai kondisi lingkungan.

Dalam konteks metode LIT, klasifikasi lifeform ini digunakan sebagai pendekatan praktis untuk mengidentifikasi jenis substrat tanpa harus melakukan identifikasi hingga tingkat spesies. Pendekatan ini dianggap efisien dan cukup representatif dalam menggambarkan kondisi ekosistem terumbu karang, terutama dalam studi skala luas atau monitoring jangka panjang.

Berdasarkan kajian di Gili Labak, komposisi lifeform didominasi oleh karang tipe *Acropora* dan *massive coral*, yang menunjukkan bahwa ekosistem tersebut memiliki kombinasi antara pertumbuhan cepat dan stabilitas struktur habitat. Dominasi lifeform ini juga berkaitan dengan tingkat kompleksitas habitat yang tinggi, yang berperan penting dalam mendukung keanekaragaman organisme laut.

➤ **Kelebihan dan Keterbatasan Metode**

Metode *Line Intercept Transect* (LIT) telah lama menjadi salah satu pendekatan utama dalam monitoring ekosistem terumbu karang dan tetap digunakan secara luas hingga saat ini. Keberlanjutan penggunaan metode ini tidak terlepas dari berbagai keunggulan yang dimilikinya, baik dari aspek metodologis maupun operasional. Salah satu kelebihan utama metode LIT adalah kesederhanaannya dalam pelaksanaan. Metode ini tidak memerlukan peralatan yang kompleks atau teknologi canggih, melainkan hanya membutuhkan pita transek, alat tulis, dan keterampilan dasar dalam penyelaman serta identifikasi substrat benthik. Hal ini

menjadikan metode LIT sangat sesuai untuk digunakan di berbagai kondisi lapangan, termasuk di wilayah dengan keterbatasan sumber daya dan fasilitas (English et al., 1997; Hill & Wilkinson, 2004).

Selain itu, metode LIT memiliki keunggulan dalam menghasilkan data kuantitatif yang relatif mudah dianalisis dan diinterpretasikan. Data yang dihasilkan berupa panjang segmen substrat yang bersinggungan dengan garis transek dapat dengan mudah dikonversi menjadi persentase tutupan, yang merupakan indikator penting dalam menilai kondisi kesehatan terumbu karang. Persentase tutupan karang hidup secara luas digunakan dalam berbagai studi sebagai parameter utama karena memiliki keterkaitan langsung dengan fungsi ekologis, produktivitas primer, serta kemampuan ekosistem dalam menyediakan habitat bagi berbagai organisme laut (Gomez & Yap, 1988; Mcfield et al., 2007). Dengan demikian, metode LIT memberikan dasar yang kuat dalam evaluasi kondisi ekosistem.

Keunggulan lain yang signifikan adalah adanya standarisasi metode ini secara global. LIT telah diadopsi dalam berbagai protokol monitoring internasional, seperti yang dikembangkan oleh *Global Coral Reef Monitoring Network* (GCRMN), sehingga memungkinkan perbandingan data antar lokasi, dan antar waktu. Standarisasi ini sangat penting dalam konteks monitoring jangka panjang, karena memungkinkan analisis tren perubahan ekosistem secara konsisten dan sistematis. Selain itu, metode ini juga relatif mudah direplikasi, sehingga dapat digunakan oleh berbagai peneliti dengan

tingkat pengalaman yang berbeda, selama mengikuti prosedur yang telah ditetapkan.

Dalam konteks praktis, metode LIT juga memiliki fleksibilitas dalam penerapannya. Metode ini dapat digunakan pada berbagai kondisi lingkungan dan kedalaman perairan, serta dapat dikombinasikan dengan metode lain untuk meningkatkan kualitas data. Sebagai contoh, LIT sering digunakan sebagai baseline dalam studi yang mengintegrasikan teknologi modern, seperti penginderaan jauh atau fotogrametri tiga dimensi, sehingga memberikan kerangka referensi yang kuat untuk analisis lanjutan.

Namun demikian, di balik berbagai keunggulan tersebut, metode LIT juga memiliki sejumlah keterbatasan yang cukup signifikan, terutama dalam konteks perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi monitoring ekosistem laut. Salah satu kelemahan utama metode ini adalah kemampuannya yang terbatas dalam merepresentasikan struktur ekosistem secara tiga dimensi. Metode LIT pada dasarnya hanya mengukur panjang substrat yang bersinggungan dengan garis transek, sehingga menghasilkan data yang bersifat dua dimensi (2D). Padahal, ekosistem terumbu karang memiliki struktur tiga dimensi yang kompleks, yang sangat berperan dalam menentukan fungsi ekologis habitat, termasuk dalam menyediakan ruang bagi organisme dan meningkatkan keanekaragaman hayati.

Keterbatasan ini menjadi semakin penting dalam konteks modern yang menekankan pentingnya kompleksitas struktural sebagai indikator kesehatan ekosistem. Studi menunjukkan bahwa struktur tiga dimensi terumbu karang memiliki hubungan yang kuat dengan keanekaragaman ikan dan organisme bentik lainnya, sehingga pengukuran yang hanya berbasis dua dimensi dapat mengabaikan aspek penting dari fungsi ekosistem (Alvarez-filip et al., 2009). Oleh karena itu, metode LIT sering dianggap kurang mampu menggambarkan kondisi ekosistem secara komprehensif.

Selain itu, metode LIT sangat bergantung pada kemampuan dan pengalaman penyelam dalam mengidentifikasi jenis substrat bentik. Proses identifikasi ini dilakukan secara visual di bawah air, yang dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kondisi visibilitas, kelelahan penyelam, serta tingkat pengalaman dalam klasifikasi karang. Hal ini berpotensi menimbulkan bias observasi yang dapat memengaruhi akurasi data. (Leujak & Ormond, 2007) menunjukkan bahwa variasi antar pengamat dapat menyebabkan perbedaan signifikan dalam estimasi tutupan karang, terutama pada kategori substrat yang sulit dibedakan.

Keterbatasan lain yang tidak kalah penting adalah cakupan area yang relatif kecil. Karena metode ini berbasis pada pengukuran sepanjang garis transek yang terbatas, data yang diperoleh hanya merepresentasikan area sempit di sekitar transek tersebut. Hal ini menjadi kendala dalam monitoring skala luas, terutama pada ekosistem terumbu karang yang memiliki heterogenitas

spasial tinggi. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan jumlah transek yang lebih banyak, yang pada akhirnya meningkatkan kebutuhan waktu dan tenaga dalam pelaksanaan survei.

Dari sisi efisiensi, metode LIT juga memiliki keterbatasan dalam hal waktu dan biaya operasional. Pelaksanaan survei memerlukan penyelaman langsung yang bergantung pada kondisi lingkungan, seperti cuaca, arus, dan visibilitas air. Selain itu, faktor keselamatan penyelam juga menjadi pertimbangan penting, terutama pada lokasi dengan kondisi perairan yang ekstrem. Hal ini menjadikan metode LIT kurang efisien untuk monitoring jangka panjang pada skala besar (Lazuardi et al., 2021).

Perbandingan antara metode LIT dan metode berbasis teknologi menunjukkan bahwa LIT cenderung memberikan estimasi yang lebih tinggi terhadap tutupan karang hidup, sementara metode berbasis citra memberikan hasil yang lebih konservatif namun lebih representatif secara spasial (Urbina-Barreto et al., 2021). Perbedaan ini menunjukkan bahwa metode LIT memiliki potensi bias dalam estimasi, terutama karena keterbatasan cakupan dan sifat linier dari pengukuran.

Meskipun demikian, metode LIT tidak sepenuhnya tergantikan oleh teknologi modern. Metode ini tetap memiliki peran penting sebagai baseline dalam monitoring terumbu karang, terutama dalam studi jangka panjang yang memerlukan konsistensi data. Selain itu, kombinasi antara metode LIT dan teknologi modern menjadi pendekatan yang semakin banyak digunakan untuk mengatasi keterbatasan masing-masing metode.

Pendekatan integratif ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh data yang lebih lengkap, baik dari aspek kuantitatif maupun struktural.

Dengan demikian, kelebihan dan keterbatasan metode LIT harus dipahami secara komprehensif dalam konteks penggunaannya. Metode ini tetap relevan sebagai alat monitoring yang sederhana, murah, dan terstandarisasi, namun perlu dikombinasikan dengan pendekatan lain untuk menghasilkan data yang lebih akurat dan komprehensif. Pemahaman yang baik mengenai karakteristik metode ini akan membantu peneliti dalam memilih pendekatan yang tepat sesuai dengan tujuan riset dan kondisi lapangan.

BAB IV

Metode *Underwater Photo Transect*

➤ **Konsep Dasar *Underwater Photo Transect* (UPT)**

Metode *Underwater Photo Transect* (UPT) merupakan salah satu pendekatan modern yang berkembang pesat dalam monitoring ekosistem terumbu karang sebagai respons terhadap kebutuhan data yang semakin akurat, terdokumentasi dengan baik, dan dapat dianalisis ulang secara sistematis. UPT pada dasarnya merupakan evolusi dari metode observasi langsung seperti *Line Intercept Transect* (LIT), yang sebelumnya menjadi standar dalam pengukuran tutupan karang. Perbedaan mendasar antara kedua metode ini terletak pada cara pengumpulan data, di mana LIT bergantung pada pengamatan visual langsung oleh penyelam, sementara UPT memanfaatkan teknologi fotografi bawah air untuk merekam kondisi substrat benthik secara digital sepanjang garis transek. Transformasi ini mencerminkan pergeseran paradigma dalam ekologi laut modern menuju pendekatan berbasis data digital yang lebih objektif, transparan, dan dapat direplikasi.

Secara konseptual, metode UPT didasarkan pada prinsip bahwa citra fotografi dapat digunakan sebagai representasi visual dari kondisi komunitas bentik dan dapat diubah menjadi data kuantitatif melalui proses analisis citra. Setiap foto yang diambil sepanjang transek dianggap sebagai unit sampling yang mewakili kondisi substrat pada titik tertentu. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *sampling unit-based analysis* dalam ekologi, di mana data diperoleh dari unit pengamatan yang terstandarisasi untuk menghasilkan estimasi parameter populasi atau komunitas (Buckland et al., 2007). Dalam konteks ini, foto bawah air tidak hanya berfungsi sebagai dokumentasi, tetapi juga sebagai sumber data primer yang dapat dianalisis secara sistematis menggunakan perangkat lunak pengolahan citra.

Keunggulan utama metode UPT terletak pada kemampuannya dalam menghasilkan data yang bersifat *reproducible* atau dapat diulang. Berbeda dengan metode observasi langsung yang sangat bergantung pada kemampuan dan persepsi pengamat di lapangan, UPT memungkinkan proses identifikasi substrat dilakukan dalam kondisi yang lebih terkendali melalui analisis *post-processing*. Hal ini secara signifikan mengurangi bias subjektif yang sering terjadi dalam metode konvensional. Hill & Wilkinson, (2004) menegaskan bahwa penggunaan dokumentasi visual dalam monitoring terumbu karang dapat meningkatkan konsistensi data, karena memungkinkan verifikasi ulang dan perbandingan antar pengamat.

Selain itu, metode UPT memberikan keunggulan dalam hal dokumentasi permanen. Data berupa foto dapat disimpan dalam jangka panjang dan digunakan kembali untuk berbagai tujuan analisis, termasuk studi perubahan temporal, validasi metode, serta pelatihan identifikasi substrat. Dalam konteks monitoring jangka panjang, kemampuan ini sangat penting karena memungkinkan peneliti untuk melacak perubahan kondisi ekosistem secara historis dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode berbasis pencatatan manual (Kohler & Gill, 2006). Oleh karena itu, UPT telah digunakan dalam berbagai program monitoring global, termasuk yang dikoordinasikan oleh *Global Coral Reef Monitoring Network* (GCRMN).

Dalam praktiknya, metode UPT biasanya dilakukan dengan membentangkan garis transek di dasar laut, kemudian mengambil foto secara sistematis pada interval tertentu sepanjang transek tersebut. Foto-foto ini kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak seperti *Coral Point Count with Excel extensions* (CPCe), yang memungkinkan estimasi persentase tutupan substrat melalui metode *point count*. Pendekatan ini memberikan fleksibilitas dalam analisis, karena jumlah titik sampling dapat disesuaikan untuk meningkatkan akurasi data.

Lebih lanjut, metode UPT juga memungkinkan peningkatan resolusi analisis dibandingkan metode konvensional. Foto dengan resolusi tinggi memungkinkan identifikasi substrat hingga tingkat yang lebih detail, termasuk dalam membedakan kategori yang

sulit diidentifikasi secara langsung di lapangan. Hal ini sangat penting dalam studi ekologi terumbu karang, di mana perbedaan kecil dalam komposisi substrat dapat memiliki implikasi besar terhadap fungsi ekosistem. Leujak & Ormond, (2007) menunjukkan bahwa metode berbasis citra memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dalam mengidentifikasi substrat dibandingkan metode observasi langsung, terutama pada kondisi lingkungan yang kompleks.

Meskipun demikian, metode UPT tidak sepenuhnya bebas dari keterbatasan. Salah satu keterbatasan utama adalah bahwa data yang dihasilkan masih bersifat dua dimensi (2D), sehingga belum mampu merepresentasikan kompleksitas struktur vertikal terumbu karang secara utuh. Padahal, struktur tiga dimensi merupakan komponen penting dalam menentukan fungsi ekologis habitat, termasuk dalam menyediakan ruang bagi organisme dan meningkatkan keanekaragaman hayati (Graham & Nash, 2013). Oleh karena itu, metode UPT sering dikombinasikan dengan pendekatan lain, seperti fotogrametri tiga dimensi, untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif.

Selain itu, kualitas data UPT sangat bergantung pada kualitas foto yang dihasilkan. Faktor-faktor seperti kekeruhan air, pencahayaan, sudut pengambilan gambar, dan stabilitas kamera dapat memengaruhi hasil analisis. Dalam kondisi visibilitas rendah, misalnya, detail substrat mungkin tidak terlihat dengan jelas, sehingga dapat menurunkan akurasi identifikasi. Oleh karena itu,

pelaksanaan metode ini memerlukan perencanaan yang matang serta penggunaan peralatan yang memadai.

Dari sisi operasional, metode UPT juga memerlukan waktu tambahan dalam proses analisis dibandingkan metode LIT. Proses *post-processing* yang melibatkan identifikasi substrat pada setiap foto dapat memakan waktu yang cukup lama, terutama jika jumlah foto yang dianalisis sangat besar. Namun, perkembangan teknologi perangkat lunak dan otomatisasi analisis citra, termasuk penggunaan kecerdasan buatan (*machine learning*), mulai mengatasi keterbatasan ini dengan meningkatkan efisiensi dan kecepatan analisis (Beijbom et al., 2015).

Secara keseluruhan, metode *Underwater Photo Transect* (UPT) menawarkan pendekatan yang lebih objektif, terdokumentasi, dan fleksibel dibandingkan metode konvensional. Meskipun memiliki keterbatasan dalam representasi dimensi struktur ekosistem, keunggulannya dalam hal reproducibility, akurasi identifikasi, dan dokumentasi jangka panjang menjadikannya sebagai salah satu metode utama dalam monitoring terumbu karang modern. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai konsep dasar metode ini sangat penting bagi peneliti dan praktisi dalam memilih pendekatan yang tepat sesuai dengan tujuan riset dan kondisi lapangan.

➤ Teknik Pengambilan Foto Bawah Air

Pelaksanaan metode *Underwater Photo Transect* (UPT) di lapangan menuntut penerapan prosedur teknis yang sistematis, terstandarisasi, dan konsisten untuk memastikan kualitas data yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi dan reliabilitas yang tinggi. Berbeda dengan metode observasi langsung seperti *Line Intercept Transect* (LIT), keberhasilan UPT sangat bergantung pada kualitas citra yang dihasilkan, karena seluruh proses analisis dilakukan berdasarkan data visual yang terekam dalam bentuk foto. Oleh karena itu, teknik pengambilan foto bawah air tidak hanya sekadar proses dokumentasi, tetapi merupakan tahapan krusial dalam keseluruhan metodologi.

Tahap awal dalam pelaksanaan UPT dimulai dengan penentuan lokasi transek yang representatif terhadap kondisi ekosistem terumbu karang. Pemilihan lokasi ini umumnya mengikuti prinsip yang sama dengan metode LIT, yaitu mempertimbangkan zonasi ekologi seperti *reef flat*, *reef crest*, dan *reef slope*, serta faktor lingkungan seperti kedalaman, kecerahan perairan, dan tingkat gangguan antropogenik. Penentuan lokasi yang tepat menjadi penting karena akan memengaruhi representativitas data yang diperoleh terhadap kondisi ekosistem secara keseluruhan (Hill & Wilkinson, 2004).

Setelah lokasi ditentukan, transek garis dibentangkan menggunakan pita ukur dengan panjang tertentu, biasanya 50 meter, mengikuti kontur dasar laut. Transek ini berfungsi sebagai acuan dalam pengambilan foto secara sistematis. Pengambilan foto dilakukan secara

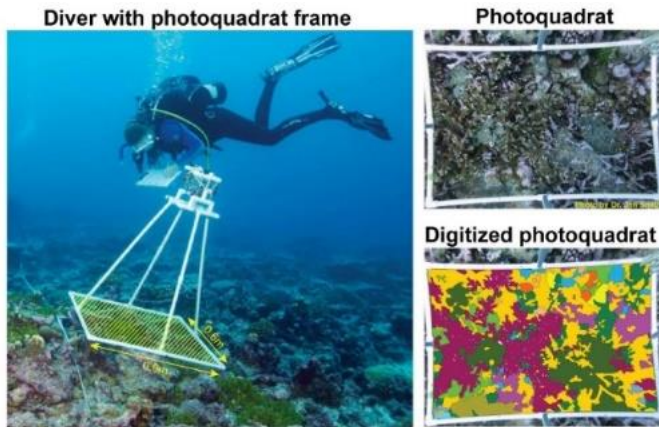
berkala sepanjang transek dengan interval yang telah ditentukan sebelumnya, misalnya setiap 0,5 meter atau 1 meter. Penentuan interval ini bergantung pada resolusi data yang diinginkan. Interval yang lebih rapat akan menghasilkan data dengan resolusi spasial yang lebih tinggi, namun juga meningkatkan jumlah foto yang harus dianalisis, sehingga memerlukan waktu dan tenaga yang lebih besar dalam proses *post-processing* (Kohler & Gill, 2006).

Peralatan yang digunakan dalam pengambilan foto bawah air juga memegang peranan penting dalam menentukan kualitas data. Kamera yang digunakan harus memiliki resolusi tinggi untuk memastikan detail substrat dapat terlihat dengan jelas. Selain itu, penggunaan *underwater housing* yang baik sangat penting untuk melindungi kamera dari tekanan air serta menjaga kestabilan pengambilan gambar. Dalam kondisi perairan dengan intensitas cahaya rendah, penggunaan lampu tambahan atau *strobe* menjadi sangat diperlukan untuk meningkatkan kualitas pencahayaan dan mengurangi bayangan yang dapat mengganggu proses identifikasi substrat (Beijbom et al., 2015).

Salah satu aspek teknis yang paling penting dalam pengambilan foto adalah konsistensi posisi dan orientasi kamera. Kamera harus dijaga dalam posisi tegak lurus terhadap permukaan substrat untuk menghindari distorsi perspektif. Jarak antara kamera dan substrat juga harus dijaga konstan, biasanya berkisar antara 50 hingga 70 cm, untuk memastikan bahwa setiap foto memiliki skala yang seragam. Konsistensi ini sangat penting karena variasi

dalam sudut atau jarak pengambilan gambar dapat memengaruhi hasil analisis citra, terutama dalam perhitungan persentase tutupan substrat.

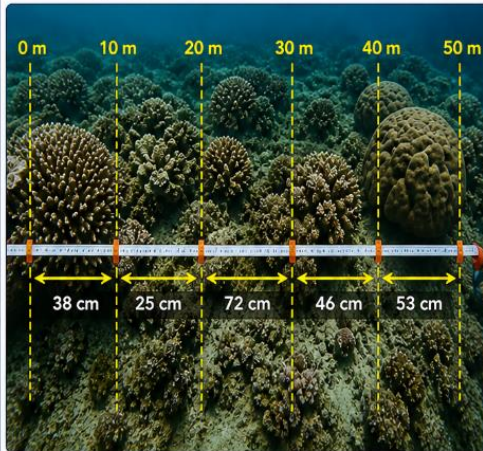
Untuk memastikan konsistensi skala, penggunaan *frame quadrat* atau penanda skala sering diterapkan dalam metode UPT. *Frame quadrat* biasanya berbentuk persegi dengan ukuran tertentu, misalnya 50 × 50 cm, yang ditempatkan di atas substrat saat pengambilan foto (Gambar 11). Penggunaan alat ini memungkinkan setiap foto memiliki area cakupan yang sama, sehingga memudahkan proses analisis dan meningkatkan akurasi data. Alternatif lain adalah menggunakan *laser scale* atau penanda visual lainnya yang dapat memberikan referensi ukuran dalam setiap foto (Leujak & Ormond, 2007).



Gambar 11. Pengambilan Foto Metode *Underwater Photo Transect* (UPT)

METODE LINE INTERCEPT TRANSECT (LIT)

Transek sepanjang 50 m diletakkan di dasar perairan dan setiap substrat yang bersentuhan dengan transek dicatat dan diukur panjangnya



PROSEDUR LIT

1. Transek sepanjang 50 m dibentangkan sejajar kontur dasar perairan.
2. Catat setiap jenis substrat yang bersentuhan dengan transek.
3. Ukur panjang (cm) kontak setiap substrat pada transek.
4. Hitung persentase tutupan setiap kategori substrat.

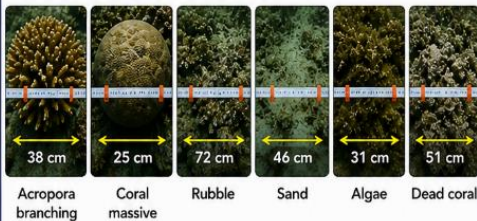
RUMUS PERHITUNGAN

$$\% \text{ Tutupan} = \frac{Li}{L \text{ total}} \times 100\%$$

Li = panjang total substrat i yang bersentuhan dengan transek (cm)

L total = panjang transek (cm)

CONTOH PENCATATAN DATA LIT



PERALATAN



CONTOH HASIL PERHITUNGAN

Kategori Substrat	Acropora branching	Coral massive	Rubble	Sand	Algae	Dead coral	Total
Panjang (cm)	38	25	72	46	31	53	265
% Tutupan	14,3	9,4	27,2	17,4	11,7	20,0	100

CATATAN

Identifikasi substrat mengikuti kategori standar LIT (English et al., 1997;

Gambar 12. Metode *Underwater Photo Transect* (UPT)

Selain faktor teknis, kondisi lingkungan juga memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas foto bawah air. Kekeruhan air (*turbidity*) merupakan salah satu faktor utama yang dapat mengurangi visibilitas dan menyebabkan penurunan kualitas citra. Partikel tersuspensi dalam air dapat menyebarkan cahaya dan menghasilkan efek *backscatter*, yang menyebabkan munculnya bintik-bintik pada foto. Kondisi ini dapat menyulitkan proses identifikasi substrat dan menurunkan akurasi analisis. Oleh karena itu, pengambilan data sebaiknya dilakukan pada kondisi perairan dengan visibilitas yang baik.

Arus laut dan gelombang juga menjadi faktor penting yang memengaruhi stabilitas penyelam dan kamera. Arus yang kuat dapat menyebabkan penyelam sulit mempertahankan posisi yang stabil, sehingga menghasilkan foto yang blur atau tidak fokus. Untuk mengatasi hal ini, penyelam harus memiliki keterampilan buoyancy control yang baik serta menggunakan teknik pengambilan gambar yang stabil. Dalam beberapa kasus, penggunaan *stabilizing rig* atau alat bantu lainnya dapat membantu meningkatkan kualitas pengambilan foto.

Selain itu, faktor kedalaman juga memengaruhi kualitas pencahayaan dalam pengambilan foto bawah air. Semakin dalam perairan, intensitas cahaya alami akan semakin berkurang, terutama pada spektrum warna merah yang cepat diserap oleh air. Hal ini menyebabkan perubahan warna pada foto, yang dapat memengaruhi proses identifikasi substrat. Oleh karena itu, penggunaan pencahayaan tambahan atau koreksi warna dalam proses

post-processing sering dilakukan untuk mengatasi masalah ini (Foster et al., 2008).

Dalam praktiknya, teknik pengambilan foto bawah air dalam metode UPT juga harus mempertimbangkan aspek efisiensi dan keselamatan. Pengambilan data biasanya dilakukan dalam satu kali penyelaman dengan durasi terbatas, sehingga perencanaan yang matang sangat diperlukan untuk memastikan seluruh transek dapat didokumentasikan dengan baik. Selain itu, faktor keselamatan penyelam, seperti kedalaman, waktu penyelaman, dan kondisi lingkungan, harus selalu menjadi prioritas utama.

Perkembangan teknologi dalam beberapa tahun terakhir juga telah memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi pengambilan foto bawah air. Penggunaan kamera digital dengan resolusi tinggi, sistem pencahayaan canggih, serta integrasi dengan teknologi kecerdasan buatan (*machine learning*) memungkinkan proses analisis citra dilakukan secara lebih cepat dan akurat. Beijbom et al., (2015) menunjukkan bahwa pendekatan berbasis otomatisasi dalam analisis citra bentik memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi monitoring terumbu karang, meskipun masih memerlukan validasi oleh ahli.

Secara keseluruhan, teknik pengambilan foto bawah air dalam metode UPT merupakan kombinasi antara keterampilan teknis, pemahaman kondisi lingkungan, serta penggunaan peralatan yang tepat. Konsistensi dalam pelaksanaan menjadi kunci utama dalam menghasilkan data yang berkualitas tinggi.

Dengan penerapan prosedur yang terstandarisasi, metode UPT dapat memberikan data yang akurat, objektif, dan dapat digunakan untuk berbagai analisis lanjutan dalam studi ekologi terumbu karang.

➤ Analisis Citra Menggunakan CPCe

Analisis citra merupakan tahapan krusial dalam metode *Underwater Photo Transect* (UPT) karena seluruh estimasi komposisi substrat benthik diturunkan dari data visual yang terekam dalam bentuk foto. Setelah proses pengambilan data lapangan selesai, foto-foto tersebut tidak langsung memberikan informasi kuantitatif, melainkan harus diolah menggunakan perangkat lunak analisis citra. Salah satu perangkat lunak yang paling digunakan dalam studi terumbu karang adalah *Coral Point Count with Excel extensions* (CPCe), yang dikembangkan untuk mengestimasi persentase tutupan substrat secara efisien dan terstandarisasi (Kohler & Gill, 2006).

Secara konseptual, CPCe bekerja berdasarkan prinsip *point count method*, yaitu pendekatan statistik yang mengestimasi komposisi suatu komunitas dengan menghitung proporsi titik sampel yang jatuh pada kategori tertentu. Dalam konteks analisis citra benthik, sejumlah titik acak (atau sistematis) ditempatkan di atas setiap foto, kemudian peneliti mengidentifikasi jenis substrat yang berada tepat di bawah masing-masing titik tersebut. Proporsi jumlah titik yang jatuh pada kategori tertentu, seperti karang hidup, karang mati, alga, pasir, atau rubble, digunakan untuk menghitung persentase

tutupan substrat pada citra tersebut. Pendekatan ini telah lama digunakan dalam ekologi karena terbukti mampu memberikan estimasi yang tidak bias dan efisien, terutama pada komunitas dengan distribusi spasial yang heterogeny (Green & Smith, 1997).

Keunggulan utama dari penggunaan CPCe terletak pada kemampuannya untuk meningkatkan objektivitas dalam analisis data. Berbeda dengan metode observasi langsung yang sangat bergantung pada persepsi pengamat di lapangan, CPCe memungkinkan proses identifikasi dilakukan dalam kondisi yang lebih terkendali, sehingga mengurangi bias subjektif. Selain itu, karena data berupa citra dapat dianalisis ulang oleh peneliti yang berbeda, metode ini memiliki tingkat *reproducibility* yang tinggi, yang merupakan salah satu prinsip utama dalam kajian ilmiah modern (Beijbom et al., 2015). Hal ini sangat penting dalam konteks monitoring jangka panjang, di mana konsistensi data menjadi kunci dalam mendeteksi perubahan ekosistem.

Lebih lanjut, CPCe juga menyediakan berbagai fitur yang mendukung analisis data secara komprehensif. Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk menentukan jumlah titik sampling pada setiap citra, mengatur distribusi titik (acak atau sistematis), serta mengklasifikasikan substrat berdasarkan kategori yang telah ditentukan. Hasil analisis kemudian secara otomatis dihitung dan disajikan dalam bentuk tabel persentase tutupan, yang dapat diekspor ke dalam format spreadsheet untuk analisis lanjutan. Integrasi dengan perangkat lunak seperti Microsoft Excel memudahkan

peneliti dalam melakukan analisis statistik tambahan maupun visualisasi data.

Dalam praktiknya, jumlah titik sampling yang digunakan dalam analisis CPCe menjadi faktor penting yang memengaruhi tingkat akurasi hasil. Semakin banyak titik yang digunakan, semakin tinggi tingkat presisi estimasi persentase tutupan substrat. Namun, peningkatan jumlah titik juga akan meningkatkan waktu yang dibutuhkan dalam proses analisis. Oleh karena itu, penentuan jumlah titik sampling harus mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi dan akurasi. Studi oleh Kohler & Gill, (2006) menunjukkan bahwa penggunaan sekitar 25 hingga 50 titik per citra sudah cukup untuk menghasilkan estimasi yang akurat dalam banyak kondisi, meskipun jumlah ini dapat ditingkatkan untuk kebutuhan yang lebih detail.

Selain jumlah titik, kualitas citra juga merupakan faktor yang sangat menentukan dalam analisis CPCe. Foto dengan resolusi tinggi dan pencahayaan yang baik akan memudahkan proses identifikasi substrat, terutama pada kategori yang memiliki karakteristik morfologi yang mirip. Sebaliknya, foto dengan kualitas rendah, seperti yang terpengaruh oleh kekeruhan air atau pencahayaan yang tidak merata, dapat meningkatkan tingkat kesalahan dalam identifikasi. Oleh karena itu, kualitas pengambilan data di lapangan memiliki hubungan langsung dengan akurasi hasil analisis citra (Leujak & Ormond, 2007).

Di sisi lain, meskipun CPCe dirancang untuk meningkatkan objektivitas, proses identifikasi substrat tetap melibatkan interpretasi manusia. Hal ini berarti

bahwa potensi bias masih dapat terjadi, terutama jika peneliti memiliki tingkat pengalaman yang berbeda dalam mengenali jenis substrat. Untuk mengurangi bias ini, diperlukan pelatihan yang memadai serta penggunaan panduan klasifikasi yang terstandarisasi, seperti yang disediakan oleh Australian Institute of Marine Science (AIMS). Selain itu, beberapa studi juga menyarankan penggunaan pendekatan *inter-observer calibration*, di mana hasil identifikasi dari beberapa pengamat dibandingkan untuk memastikan konsistensi (Leujak & Ormond, 2007).

Perkembangan teknologi dalam beberapa tahun terakhir juga telah membawa inovasi dalam analisis citra benthik, khususnya melalui penerapan kecerdasan buatan (*machine learning*) dan pengolahan citra otomatis. Beijbom et al., (2015) menunjukkan bahwa algoritma berbasis pembelajaran mesin mampu mengklasifikasikan substrat benthik dengan tingkat akurasi yang tinggi, bahkan mendekati hasil identifikasi oleh ahli. Integrasi antara CPCe dan teknologi otomatisasi ini membuka peluang untuk meningkatkan efisiensi analisis, terutama dalam studi dengan jumlah data yang besar.

Selain itu, hasil analisis CPCe juga dapat diintegrasikan dengan sistem informasi geografis (SIG) untuk menghasilkan peta distribusi substrat benthik secara spasial. Integrasi ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif, termasuk dalam mengidentifikasi pola distribusi, hubungan dengan faktor lingkungan, serta perubahan kondisi ekosistem dari waktu ke waktu (Hedley et al., 2016). Dengan demikian, CPCe tidak hanya

berfungsi sebagai alat analisis lokal, tetapi juga sebagai bagian dari sistem monitoring ekosistem yang lebih luas. Gambar 13 memberikan gambaran *Coral Point Count with Excel extensions* (CPCe).

Namun demikian, metode ini tetap memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan. Selain ketergantungan pada kualitas citra dan jumlah titik sampling, CPCe juga memerlukan waktu analisis yang relatif lama, terutama jika jumlah foto yang dianalisis sangat banyak. Hal ini dapat menjadi kendala dalam studi skala besar atau monitoring rutin yang memerlukan hasil dalam waktu singkat. Oleh karena itu, peneliti harus mempertimbangkan strategi sampling yang efisien serta memanfaatkan teknologi pendukung untuk meningkatkan produktivitas analisis.

Secara keseluruhan, penggunaan CPCe dalam analisis citra benthik merupakan pendekatan yang efektif diterapkan dalam studi ekosistem terumbu karang. Keunggulannya dalam meningkatkan objektivitas, reproducibility, dan fleksibilitas analisis menjadikannya sebagai salah satu metode utama dalam monitoring modern. Meskipun demikian, keberhasilan penggunaannya sangat bergantung pada kualitas data lapangan, desain sampling yang tepat, serta kemampuan peneliti dalam melakukan identifikasi substrat secara akurat. Oleh karena itu, pendekatan ini sebaiknya dipadukan dengan metode lain serta didukung oleh standar operasional yang jelas untuk menghasilkan data yang berkualitas tinggi.

METODE CORAL POINT COUNT WITH EXCEL EXTENSIONS (CPCE)

1 Memasukkan foto

2 Menetapkan jumlah titik acak (random points)

3 Titik acak ditampilkan pada foto

4 Identifikasi substrat pada setiap titik

5 Data tersimpan dan dapat diekspor ke Excel

CONTOH PENEMPATAN TITIK ACAK

CONTOH IDENTIFIKASI SUBSTRAT

ACB Acropora branching	ACT Acropora tabulate	CB Coral massive	SC Soft coral
RKC Rock	RUB Rubble	SD Sand	SP Sponge

RUMUS PERHITUNGAN

$$\% \text{ Tutupan} = \frac{\text{Jumlah titik pada kategori } i}{\text{Total titik}} \times 100\%$$

Keterangan:
 % Tutupan = persentase tutupan substrat
 Jumlah titik pada kategori i = banyaknya titik yang teridentifikasi pada kategori substrat tertentu
 Total titik = jumlah seluruh titik acak

KETERANGAN

CPCe (Coral Point Count with Excel extensions) adalah perangkat lunak berbasis Excel VBA yang digunakan untuk menganalisis foto bawah air dengan metode point count untuk menghitung persentase tutupan substrat bentuk secara cepat, sistematis, dan terdokumentasi.

Sumber: Kohler & Gill (2006) CPCE Manual

PERALATAN

POSISI PENGAMBILAN FOTO

Kamera tegak lurus terhadap substrat
Jarak kamera-substrat: 50-70 cm

ANALISIS POST-PROCESSING

Foto dianalisis menggunakan perangkat lunak (mis. CPCE) dengan metode point count untuk menghitung tutupan substrat.

Gambar 13. *Coral Point Count with Excel extensions* (CPCE)

➤ **Perbandingan Hasil UPT dan LIT**

Perbandingan antara metode *Underwater Photo Transect* (UPT) dan *Line Intercept Transect* (LIT) merupakan salah satu isu metodologis yang penting dalam ekosistem terumbu karang, terutama dalam konteks pemilihan metode yang paling sesuai untuk tujuan monitoring, evaluasi kondisi ekosistem, serta analisis perubahan jangka panjang. Kedua metode ini pada dasarnya dirancang untuk mengestimasi komposisi substrat benthik, khususnya persentase tutupan karang hidup, yang merupakan indikator utama kesehatan ekosistem terumbu karang. Meskipun memiliki tujuan yang sama, perbedaan mendasar dalam pendekatan pengumpulan dan analisis data menyebabkan variasi dalam hasil yang diperoleh, baik dari segi akurasi, resolusi, maupun representativitas spasial.

Secara umum, metode LIT merupakan pendekatan konvensional yang berbasis observasi langsung di lapangan, di mana penyelam mencatat panjang setiap jenis substrat yang bersinggungan dengan garis transek. Pendekatan ini menghasilkan data linier yang merepresentasikan distribusi substrat sepanjang garis tersebut. Sebaliknya, metode UPT menggunakan pendekatan berbasis citra, di mana foto diambil secara sistematis sepanjang transek dan dianalisis menggunakan perangkat lunak seperti *Coral Point Count with Excel extensions* (CPCe). Perbedaan ini menjadikan UPT sebagai metode yang lebih modern dan berbasis digital, sementara LIT tetap menjadi metode yang sederhana dan langsung.

Dalam praktiknya, kedua metode ini sering menghasilkan estimasi tutupan karang yang relatif serupa pada skala umum, namun terdapat perbedaan yang cukup signifikan dalam detail hasil yang diperoleh. Metode LIT cenderung memberikan estimasi tutupan karang yang lebih tinggi dibandingkan metode UPT. Hal ini disebabkan oleh sifat pengukuran LIT yang hanya mempertimbangkan substrat yang bersinggungan langsung dengan garis transek, sehingga lebih sensitif terhadap keberadaan koloni karang yang menonjol atau memiliki struktur vertikal yang kompleks. Dengan kata lain, metode LIT dapat mengalami *overestimation* terhadap tutupan karang karena tidak memperhitungkan area di luar garis transek yang mungkin memiliki komposisi substrat yang berbeda (Leujak & Ormond, 2007).

PERBANDINGAN METODE LINE INTERCEPT TRANSECT (LIT) vs UNDERWATER PHOTO TRANSECT (UPT)



Gambar 14. Perbandingan Metode UPT dan LIT.

Sebaliknya, metode UPT cenderung memberikan estimasi yang lebih konservatif, namun dianggap lebih representatif secara spasial. Hal ini karena setiap foto yang diambil mencakup area dua dimensi yang lebih luas dibandingkan garis transek pada LIT, sehingga mampu menangkap variasi substrat yang lebih heterogen dalam satu unit sampling. Dengan menggunakan pendekatan *point count*, UPT memungkinkan estimasi komposisi substrat yang lebih mendekati kondisi nyata di lapangan, terutama pada ekosistem yang memiliki distribusi spasial yang kompleks (Kohler & Gill, 2006).

Studi oleh Urbina-Barreto et al., (2021) menunjukkan bahwa metode berbasis citra, termasuk UPT dan fotogrametri, menghasilkan data yang lebih stabil dan konsisten dibandingkan metode transek konvensional. Hal ini terutama disebabkan oleh kemampuan metode berbasis citra dalam mengurangi bias pengamat serta menyediakan dokumentasi visual yang dapat dianalisis ulang. Metode berbasis citra menunjukkan variabilitas antar pengamat yang lebih rendah dibandingkan LIT, yang sangat bergantung pada pengalaman dan keahlian penyelam dalam mengidentifikasi substrat.

Keunggulan lain dari metode UPT adalah fleksibilitas dalam analisis data. Karena data disimpan dalam bentuk citra digital, peneliti memiliki kesempatan untuk melakukan analisis ulang jika diperlukan, termasuk dalam memperbaiki kesalahan identifikasi atau menyesuaikan klasifikasi substrat. Hal ini berbeda dengan metode LIT, di mana data yang dicatat di lapangan

bersifat final dan sulit untuk diverifikasi kembali. Dengan demikian, UPT memberikan tingkat *data traceability* yang lebih tinggi, yang sangat penting dalam kajian ilmiah modern.

Namun demikian, metode UPT juga memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Salah satu kelemahan utama adalah kebutuhan waktu yang lebih lama dalam proses analisis data. Proses *post-processing* yang melibatkan identifikasi substrat pada setiap foto dapat memakan waktu yang signifikan, terutama jika jumlah foto yang dianalisis sangat besar. Hal ini menjadi tantangan dalam studi skala besar atau monitoring rutin yang memerlukan hasil dalam waktu singkat. Selain itu, penggunaan perangkat lunak seperti CPCe juga memerlukan keterampilan teknis tambahan, yang mungkin menjadi kendala bagi peneliti dengan sumber daya terbatas.

Di sisi lain, metode LIT memiliki keunggulan dalam hal efisiensi operasional. Data dapat diperoleh secara langsung di lapangan tanpa memerlukan proses analisis tambahan yang kompleks. Hal ini menjadikan LIT sebagai metode yang lebih cepat dan praktis, terutama untuk survei awal atau monitoring rutin dengan keterbatasan waktu dan sumber daya. Namun, keunggulan ini harus diimbangi dengan kesadaran akan potensi bias dan keterbatasan dalam representasi data.

Selain perbedaan dalam estimasi tutupan karang, kedua metode ini juga berbeda dalam kemampuan mereka untuk menangkap kompleksitas ekosistem. Metode LIT, yang berbasis garis, memiliki keterbatasan

dalam menggambarkan variasi spasial yang terjadi di luar garis transek. Sementara itu, metode UPT, meskipun masih berbasis dua dimensi, mampu menangkap informasi yang lebih luas dalam setiap unit sampling. Namun, keduanya masih belum mampu menggambarkan struktur tiga dimensi ekosistem secara utuh, yang merupakan aspek penting dalam menentukan fungsi ekologis terumbu karang (Graham & Nash, 2013).

Dalam konteks perkembangan teknologi, metode UPT juga memiliki keunggulan dalam hal integrasi dengan pendekatan lain. Data citra yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar untuk analisis lanjutan, seperti pemetaan spasial menggunakan sistem informasi geografis (SIG) atau rekonstruksi model tiga dimensi menggunakan fotogrametri. Integrasi ini membuka peluang untuk analisis multi-skala yang lebih komprehensif, yang tidak dapat dicapai dengan metode LIT secara mandiri (Casella et al., 2017).

Dengan mempertimbangkan kelebihan dan keterbatasan masing-masing metode, pemilihan antara UPT dan LIT sebaiknya didasarkan pada tujuan riset, skala studi, serta ketersediaan sumber daya. Untuk studi yang memerlukan data yang cepat dan sederhana, metode LIT masih menjadi pilihan yang relevan. Namun, untuk riset yang menuntut akurasi tinggi, dokumentasi jangka panjang, dan analisis yang lebih mendalam, metode UPT menawarkan keunggulan yang signifikan.

Dalam praktiknya, banyak kajian modern yang menggabungkan kedua metode ini untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal. Pendekatan kombinasi ini me-

memungkinkan peneliti untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing metode, yaitu efisiensi LIT dan akurasi serta fleksibilitas UPT. Dengan demikian, integrasi metode menjadi strategi yang efektif dalam meningkatkan kualitas data dan pemahaman terhadap dinamika ekosistem terumbu karang.

Secara keseluruhan, perbandingan antara UPT dan LIT menunjukkan bahwa tidak ada metode yang sepenuhnya unggul dalam semua aspek. Masing-masing metode memiliki kekuatan dan kelemahan yang saling melengkapi. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik kedua metode ini sangat penting dalam menentukan pendekatan yang paling sesuai untuk pengelolaan ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan.

➤ **Akurasi dan Efisiensi Metode *Underwater Photo Transect* (UPT)**

Akurasi dan efisiensi merupakan dua dimensi utama yang selalu menjadi pertimbangan dalam evaluasi metode monitoring ekosistem terumbu karang. Dalam konteks perkembangan metodologi modern, metode *Underwater Photo Transect* (UPT) menempati posisi penting karena mampu menawarkan tingkat akurasi yang relatif tinggi melalui pendekatan berbasis citra digital. Namun demikian, keunggulan dalam akurasi tersebut seringkali diikuti oleh konsekuensi berupa penurunan efisiensi operasional, terutama dalam hal waktu analisis dan kebutuhan sumber daya tambahan. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai ke-

seimbangan antara akurasi dan efisiensi dalam metode UPT menjadi sangat penting dalam menentukan penggunaannya dalam berbagai konteks dan monitoring.

Dari perspektif akurasi, metode UPT memiliki keunggulan yang signifikan dibandingkan metode observasi langsung seperti *Line Intercept Transect* (LIT). Hal ini disebabkan oleh sifat data yang dihasilkan, yaitu berupa citra digital yang dapat dianalisis secara berulang dalam kondisi yang terkendali. Dalam metode LIT, identifikasi substrat dilakukan secara langsung di lapangan oleh penyelam, yang sangat bergantung pada kemampuan visual, pengalaman, dan kondisi lingkungan saat pengamatan. Sebaliknya, UPT memungkinkan proses identifikasi dilakukan melalui analisis citra dengan bantuan perangkat lunak seperti *Coral Point Count with Excel extensions* (CPCe), sehingga memberikan peluang untuk meningkatkan konsistensi dan mengurangi kesalahan identifikasi.

Leujak & Ormond (2007) bahwa metode berbasis citra memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dalam mengidentifikasi substrat benthik, terutama pada kategori yang memiliki karakteristik morfologi yang kompleks atau sulit dibedakan secara langsung di lapangan. Dalam studi tersebut, metode berbasis foto menunjukkan tingkat kesalahan yang lebih rendah dibandingkan metode visual langsung, terutama ketika digunakan oleh pengamat dengan tingkat pengalaman yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa UPT memiliki keunggulan dalam mengurangi variabilitas antar pengamat (*inter-observer*

variability), yang merupakan salah satu sumber bias utama dalam metode konvensional.

Selain itu, keunggulan akurasi UPT juga berkaitan dengan kemampuannya dalam menyediakan dokumentasi permanen. Data berupa foto memungkinkan peneliti untuk melakukan verifikasi ulang terhadap hasil identifikasi, baik oleh peneliti yang sama maupun oleh peneliti lain. Hal ini meningkatkan transparansi dan *reproducibility*, yang merupakan prinsip penting dalam ilmu pengetahuan modern. Kohler & Gill (2006) menekankan bahwa penggunaan perangkat lunak seperti CPCe memungkinkan analisis yang sistematis dan terstandarisasi, sehingga meningkatkan keandalan hasil yang diperoleh.

Namun demikian, akurasi metode UPT tidak hanya ditentukan oleh proses analisis, tetapi juga sangat bergantung pada kualitas data yang diperoleh di lapangan. Faktor-faktor seperti resolusi kamera, pencahayaan, kekeruhan air, dan stabilitas pengambilan gambar dapat memengaruhi kualitas citra dan pada akhirnya memengaruhi akurasi hasil analisis. Dalam kondisi perairan yang keruh atau dengan pencahayaan yang tidak memadai, detail substrat mungkin tidak terlihat dengan jelas, sehingga meningkatkan risiko kesalahan identifikasi. Oleh karena itu, standar operasional dalam pengambilan foto menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan memiliki kualitas yang memadai untuk analisis (Ford et al., 2018).

Di sisi lain, efisiensi metode UPT menjadi aspek yang perlu dipertimbangkan secara kritis. Berbeda dengan metode LIT yang memungkinkan pengumpulan dan pencatatan data secara langsung di lapangan, metode UPT memerlukan tahapan tambahan berupa *post-processing* yang melibatkan analisis citra menggunakan perangkat lunak. Proses ini dapat memakan waktu yang cukup lama, terutama jika jumlah foto yang dianalisis sangat besar atau jika jumlah titik sampling dalam setiap citra tinggi. Dengan demikian, meskipun UPT memberikan data yang lebih akurat, metode ini cenderung memiliki efisiensi waktu yang lebih rendah dibandingkan LIT.

Selain waktu analisis, efisiensi metode UPT juga dipengaruhi oleh kebutuhan peralatan dan keterampilan tambahan. Penggunaan kamera bawah air dengan resolusi tinggi, sistem pencahayaan, serta perangkat lunak analisis memerlukan investasi yang tidak sedikit, baik dari segi biaya maupun pelatihan sumber daya manusia. Hal ini dapat menjadi kendala dalam penerapan metode ini, terutama di wilayah dengan keterbatasan fasilitas dan sumber daya.

Namun, perkembangan teknologi dalam beberapa tahun terakhir telah memberikan solusi terhadap beberapa keterbatasan tersebut. Penerapan teknologi kecerdasan buatan (*machine learning*) dalam analisis citra bantik memungkinkan proses identifikasi substrat dilakukan secara otomatis dengan tingkat akurasi yang tinggi. Beijbom et al., (2015) menunjukkan bahwa algoritma berbasis pembelajaran mesin mampu

mengklasifikasikan substrat bentik dengan akurasi yang mendekati hasil identifikasi oleh ahli, sekaligus mengurangi waktu analisis secara signifikan. Inovasi ini membuka peluang untuk meningkatkan efisiensi metode UPT tanpa mengorbankan akurasi.

Selain itu, efisiensi metode UPT juga dapat ditingkatkan melalui optimasi desain sampling, seperti penentuan interval pengambilan foto dan jumlah titik sampling yang sesuai. Dalam beberapa kasus, penggunaan interval yang lebih besar atau jumlah titik yang lebih sedikit dapat mengurangi waktu analisis tanpa mengurangi akurasi secara signifikan. Oleh karena itu, peneliti perlu mempertimbangkan *trade-off* antara akurasi dan efisiensi dalam merancang metode pengambilan dan analisis data.

Secara keseluruhan, metode UPT menawarkan tingkat akurasi yang tinggi dan kemampuan analisis yang fleksibel, namun dengan konsekuensi efisiensi yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Dengan perkembangan teknologi yang terus berlangsung, terutama dalam bidang analisis citra dan kecerdasan buatan, diharapkan bahwa efisiensi metode ini akan terus meningkat, sehingga dapat menjadi solusi yang lebih optimal dalam monitoring ekosistem terumbu karang di masa depan.

BAGIAN III

TEKNOLOGI PENGINDERAAN JAUH

BAB V

Penginderaan Jauh untuk Terumbu Karang

➤ Prinsip Remote Sensing Perairan Dangkal

Penginderaan jauh (*remote sensing*) merupakan salah satu pendekatan ilmiah yang semakin penting dalam pemantauan ekosistem terumbu karang, terutama dalam konteks kebutuhan data spasial yang luas, efisiensi waktu, serta kemampuan untuk melakukan monitoring jangka panjang secara berkelanjutan. Dalam perkembangan ilmu kelautan modern, penginderaan jauh telah menjadi komponen utama dalam sistem observasi lingkungan laut karena kemampuannya dalam menyediakan informasi yang konsisten, terukur, dan dapat dibandingkan antar waktu dan Lokasi (Hedley et al., 2016; Mobley, 1994). Hal ini menjadi sangat relevan mengingat ekosistem terumbu karang merupakan sistem yang dinamis dan rentan terhadap perubahan lingkungan, baik akibat faktor alami maupun antropogenik.

Secara konseptual, prinsip dasar penginderaan jauh pada perairan dangkal didasarkan pada interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan atmosfer, permukaan laut, kolom air, serta substrat dasar perairan. Energi elektromagnetik yang berasal dari matahari akan dipantulkan, diserap, dan dihamburkan oleh berbagai komponen tersebut sebelum akhirnya diterima oleh

sensor yang berada pada platform penginderaan jauh, seperti satelit, pesawat udara, maupun *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV). Dalam konteks ini, sinyal yang diterima sensor merupakan kombinasi kompleks dari berbagai komponen radiasi, yang dikenal sebagai *water-leaving radiance*, sehingga memerlukan proses koreksi dan interpretasi yang cermat untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai kondisi dasar perairan (David Lyzenga, 1981; Mobley, 1994).

Pada perairan dangkal, sebagian radiasi matahari, terutama pada spektrum panjang gelombang biru dan hijau (sekitar 450–550 nm), mampu menembus kolom air hingga mencapai dasar laut. Radiasi ini kemudian dipantulkan kembali oleh substrat bentik, seperti karang hidup, karang mati, lamun, dan pasir, sebelum akhirnya ditangkap oleh sensor. Namun demikian, proses propagasi radiasi ini sangat dipengaruhi oleh sifat optik air, seperti koefisien penyerapan (*absorption coefficient*) dan hamburan (*scattering coefficient*), yang dapat menyebabkan pelemahan sinyal secara signifikan. Rodríguez-Díaz et al.,(2003) menjelaskan bahwa kemampuan deteksi substrat bawah air sangat bergantung pada karakteristik optik kolom air, di mana peningkatan kekeruhan atau kandungan partikel tersuspensi akan mengurangi intensitas sinyal yang mencapai sensor.

Selain itu, faktor kedalaman juga memainkan peran penting dalam menentukan efektivitas penginderaan jauh di perairan dangkal. Semakin dalam suatu perairan, semakin besar energi yang hilang akibat proses

penyerapan dan hamburan, sehingga informasi yang berasal dari dasar perairan menjadi semakin lemah. Oleh karena itu, teknik penginderaan jauh untuk terumbu karang umumnya lebih efektif pada kedalaman kurang dari 20 meter, tergantung pada kejernihan air (Hedley et al., 2016). Dalam kondisi perairan yang sangat jernih, penetrasi cahaya dapat mencapai kedalaman yang lebih besar, namun dalam kondisi perairan keruh, kedalaman efektif pengamatan dapat berkurang secara drastis akibat meningkatnya *attenuation coefficient*.

Dalam praktiknya, sinyal yang diterima sensor tidak hanya berasal dari substrat dasar, tetapi juga dipengaruhi oleh kontribusi atmosfer dan permukaan air. Pantulan atmosfer (*atmospheric scattering*) dapat menyebabkan noise pada citra, sedangkan pantulan permukaan (*sun glint*) dapat mengganggu interpretasi data. Oleh karena itu, dalam analisis penginderaan jauh, diperlukan proses koreksi atmosfer dan koreksi kolom air untuk memisahkan kontribusi masing-masing komponen tersebut. Proses ini dikenal sebagai *radiometric correction* dan *water column correction*, yang bertujuan untuk memperoleh reflektansi dasar (*bottom reflectance*) yang lebih representatif terhadap kondisi sebenarnya (David Lyzenga, 1981).

Dalam konteks ekosistem terumbu karang, penginderaan jauh memiliki peran strategis karena memungkinkan pemetaan distribusi habitat bentik secara luas dan efisien. Terumbu karang merupakan ekosistem yang memiliki heterogenitas spasial tinggi, sehingga membutuhkan pendekatan yang mampu menangkap

variasi tersebut secara komprehensif. Studi yang dilakukan oleh Muhsoni et al., (2026) menunjukkan bahwa monitoring terumbu karang yang akurat memerlukan metode yang mampu mengintegrasikan variabilitas ekologis, struktural, dan spasial secara simultan. Dalam hal ini, penginderaan jauh memberikan keunggulan dibandingkan metode *in situ* karena mampu mencakup area yang luas dalam waktu yang relatif singkat, sekaligus memungkinkan analisis perubahan secara temporal.

Namun demikian, meskipun penginderaan jauh memiliki keunggulan dalam cakupan spasial, metode ini tidak sepenuhnya dapat menggantikan pengamatan lapangan. Data yang diperoleh dari penginderaan jauh tetap memerlukan validasi (*ground truthing*) menggunakan metode *in situ* seperti *Line Intercept Transect* (LIT) dan *Underwater Photo Transect* (UPT). Integrasi antara data lapangan dan data penginderaan jauh menjadi pendekatan yang paling efektif dalam menghasilkan informasi yang akurat dan dapat dipercaya. Pendekatan ini juga memungkinkan kalibrasi model klasifikasi serta peningkatan akurasi interpretasi citra, terutama dalam membedakan kelas substrat yang memiliki karakteristik spektral yang mirip (E. P. Green et al., 2000).

Lebih lanjut, penginderaan jauh juga memiliki peran penting dalam analisis dinamika perubahan lingkungan yang mempengaruhi ekosistem terumbu karang. Fenomena seperti pemutihan karang (*coral bleaching*), sedimentasi, eutrofikasi, serta dampak aktivitas manusia

dapat dideteksi melalui perubahan spektral pada citra penginderaan jauh. Misalnya, peningkatan suhu permukaan laut yang menyebabkan pemutihan karang dapat diidentifikasi melalui data satelit termal, sementara peningkatan kekeruhan akibat sedimentasi dapat diamati melalui perubahan reflektansi pada spektrum tertentu (Eric J Hochberg et al., 2003). Dengan demikian, penginderaan jauh tidak hanya berfungsi sebagai alat pemetaan, tetapi juga sebagai instrumen analisis ekologi yang mampu mendeteksi perubahan lingkungan secara dini.

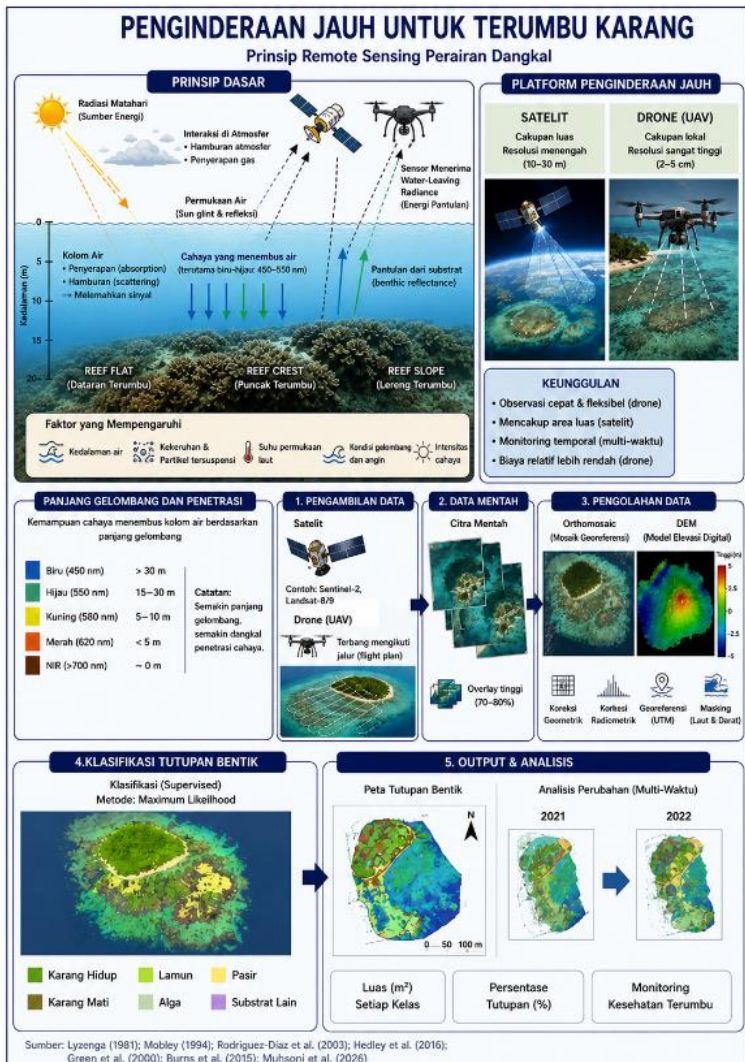
Dalam perkembangan terbaru, integrasi penginderaan jauh dengan teknologi lain seperti fotogrametri 3D dan drone semakin memperkuat kemampuan analisis ekosistem terumbu karang. Penggunaan drone memungkinkan pengambilan citra dengan resolusi sangat tinggi, sehingga dapat mengidentifikasi detail substrat yang tidak dapat dideteksi oleh citra satelit. Sementara itu, teknologi fotogrametri 3D memungkinkan analisis struktur habitat secara lebih komprehensif, termasuk estimasi volume dan kompleksitas terumbu karang, yang sebelumnya sulit dilakukan dengan metode konvensional (Burns et al., 2015).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa prinsip penginderaan jauh pada perairan dangkal merupakan kombinasi antara proses fisika radiasi elektromagnetik dan interpretasi ekologi yang kompleks. Keberhasilan penerapannya sangat bergantung pada pemahaman terhadap interaksi antara cahaya dan

lingkungan perairan, serta kemampuan dalam mengolah dan menginterpretasikan data yang diperoleh. Dalam konteks pengelolaan terumbu karang, penginderaan jauh telah menjadi alat yang sangat penting, terutama ketika dikombinasikan dengan metode lapangan dan teknologi modern lainnya. Pendekatan ini memberikan peluang besar dalam meningkatkan efektivitas monitoring, konservasi, dan pengelolaan ekosistem terumbu karang di masa depan. Gambaran Metode Penginderaan Jauh untuk Terumbu Karang pada gambar 15.

➤ **Sensor dan Resolusi Spasial**

Keberhasilan penginderaan jauh dalam pemetaan dan monitoring ekosistem terumbu karang sangat ditentukan oleh karakteristik sensor yang digunakan serta resolusi spasial yang dihasilkan. Dalam konteks penginderaan jauh, sensor merupakan perangkat utama yang berfungsi untuk merekam energi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh objek di permukaan bumi, termasuk ekosistem perairan dangkal. Karakteristik sensor, baik dari segi resolusi spasial, spektral, temporal, maupun radiometrik, akan memengaruhi kualitas data yang diperoleh serta tingkat akurasi interpretasi yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemilihan sensor yang tepat menjadi faktor kunci dalam keberhasilan pemetaan habitat bentik, khususnya terumbu karang yang memiliki kompleksitas spasial dan spektral yang tinggi.



Gambar 15. Metode Penginderaan Jauh untuk Terumbu Karang

Secara umum, sensor dalam penginderaan jauh dapat diklasifikasikan berdasarkan platform dan karakteristik spektralnya. Berdasarkan platform, sensor dapat ditempatkan pada satelit, pesawat udara, maupun *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) atau drone. Sensor satelit, seperti Sentinel-2 dan Landsat-8, memiliki keunggulan dalam cakupan area yang luas serta kemampuan monitoring jangka panjang dengan frekuensi pengambilan data yang tinggi. Namun, resolusi spasial yang relatif terbatas menjadi kendala utama dalam mengidentifikasi detail substrat benthik yang berskala kecil. Sentinel-2, misalnya, memiliki resolusi spasial 10 meter pada band tertentu dan 20 meter pada band lainnya, sehingga lebih sesuai untuk pemetaan skala regional dibandingkan analisis detail habitat (Hedley et al., 2016).

Sebaliknya, sensor yang digunakan pada UAV mampu menghasilkan citra dengan resolusi spasial yang sangat tinggi, bahkan hingga tingkat sentimeter. Dalam beberapa riset terbaru, termasuk yang dilakukan pada ekosistem terumbu karang di Indonesia, citra drone mampu mencapai resolusi hingga 2,08 cm/pixel, sehingga memungkinkan identifikasi detail substrat seperti koloni karang individu, alga, dan struktur mikro habitat lainnya. Resolusi tinggi ini memberikan keunggulan signifikan dalam analisis skala lokal, terutama dalam studi yang memerlukan detail spasial tinggi, seperti analisis perubahan tutupan karang, fragmentasi habitat, serta pemetaan struktur kompleks terumbu karang.

Resolusi spasial sendiri merupakan parameter yang menggambarkan ukuran piksel pada citra yang mewakili area tertentu di permukaan bumi. Semakin kecil ukuran piksel, semakin tinggi resolusi spasial, dan semakin detail objek yang dapat diidentifikasi. Dalam konteks ekosistem terumbu karang, resolusi spasial yang tinggi menjadi sangat penting karena habitat bentik bersifat heterogen dengan variasi substrat yang kompleks dalam skala kecil. Graham et al., (2006) menekankan bahwa kompleksitas struktural habitat terumbu karang merupakan faktor kunci dalam mendukung keanekaragaman hayati, sehingga kemampuan untuk menangkap detail tersebut menjadi sangat penting dalam analisis ekologi.

Namun demikian, resolusi spasial bukan satu-satunya faktor yang menentukan kualitas data penginderaan jauh. Resolusi spektral juga memainkan peran penting dalam membedakan jenis substrat bentik. Sensor multispektral, seperti yang terdapat pada Sentinel-2, mampu menangkap beberapa panjang gelombang tertentu, biasanya antara 4 hingga 13 band spektral. Sementara itu, sensor hiperspektral mampu menangkap ratusan band spektral yang sangat sempit, sehingga memberikan informasi yang lebih detail mengenai karakteristik reflektansi objek. Hal ini memungkinkan identifikasi yang lebih akurat terhadap berbagai jenis substrat, seperti karang hidup, karang mati, lamun, dan alga, yang seringkali memiliki karakteristik spektral yang mirip pada sensor multispectral (Eric J Hochberg et al., 2003).

Dalam aplikasi penginderaan jauh terumbu karang, panjang gelombang biru dan hijau memiliki peran yang sangat penting karena kemampuannya dalam menembus kolom air. Sensor yang memiliki band pada spektrum ini lebih efektif dalam mendeteksi substrat bentik pada perairan dangkal. Namun, kemampuan ini tetap dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti kekeruhan air, kedalaman, dan kandungan partikel tersuspensi, yang dapat mengurangi penetrasi cahaya dan memengaruhi kualitas sinyal yang diterima sensor (Mobley, 1994).

Selain resolusi spasial dan spektral, resolusi temporal juga menjadi faktor penting dalam monitoring ekosistem terumbu karang. Resolusi temporal mengacu pada frekuensi pengambilan data oleh sensor. Sensor satelit memiliki keunggulan dalam hal resolusi temporal karena mampu menyediakan data secara berkala dalam interval waktu tertentu, misalnya setiap 5 hari untuk Sentinel-2. Hal ini memungkinkan analisis perubahan kondisi ekosistem secara temporal, seperti pemutihan karang atau dampak gangguan lingkungan. Sebaliknya, UAV memiliki fleksibilitas tinggi dalam pengambilan data, namun cakupan area yang terbatas menjadikannya lebih cocok untuk studi lokal dengan frekuensi pengamatan yang disesuaikan dengan kebutuhan.

Namun demikian, peningkatan resolusi, baik spasial maupun spektral, biasanya diikuti oleh peningkatan volume data yang signifikan serta kompleksitas dalam pengolahan dan analisis. Citra dengan resolusi tinggi memerlukan kapasitas penyimpanan yang besar serta waktu pemrosesan yang lebih lama, terutama dalam

tahap koreksi geometrik, koreksi radiometrik, dan klasifikasi. Selain itu, penggunaan sensor dengan resolusi tinggi juga memerlukan perangkat lunak dan perangkat keras yang memadai, serta keterampilan teknis yang lebih tinggi dalam pengolahan data. Oleh karena itu, pemilihan sensor harus mempertimbangkan keseimbangan antara kebutuhan data, ketersediaan sumber daya, serta tujuan yang ingin dicapai.

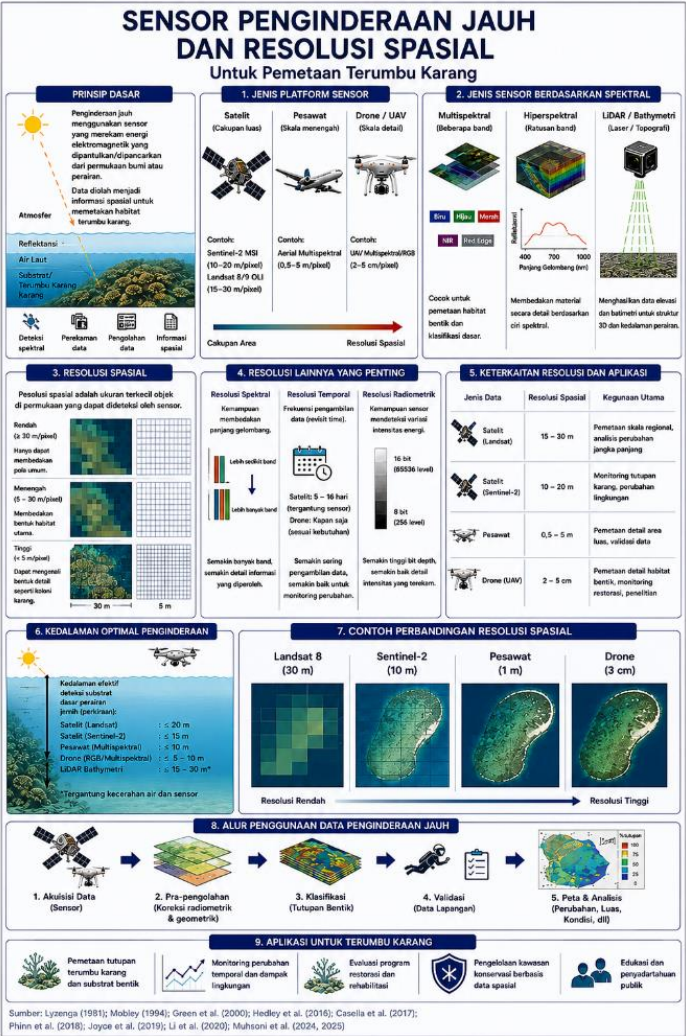
Dalam praktiknya, pendekatan yang paling efektif dalam penginderaan jauh terumbu karang adalah integrasi multi-sensor yang menggabungkan keunggulan masing-masing platform. Data satelit digunakan untuk pemetaan skala luas dan monitoring temporal, sementara data UAV digunakan untuk analisis detail pada skala lokal. Integrasi ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi ekosistem, baik dari aspek spasial maupun temporal. Studi oleh (Muhsoni et al., 2026) menunjukkan bahwa kombinasi antara metode berbasis citra, termasuk drone dan satelit, mampu memberikan hasil yang lebih akurat dan representatif dibandingkan penggunaan satu metode secara tunggal.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sensor dan resolusi spasial merupakan komponen fundamental dalam penginderaan jauh terumbu karang. Pemilihan sensor yang tepat harus mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk resolusi spasial, spektral, temporal, serta kondisi lingkungan. Dalam konteks pengelolaan dan konservasi terumbu karang, penggunaan sensor dengan resolusi yang sesuai akan sangat menentukan kualitas

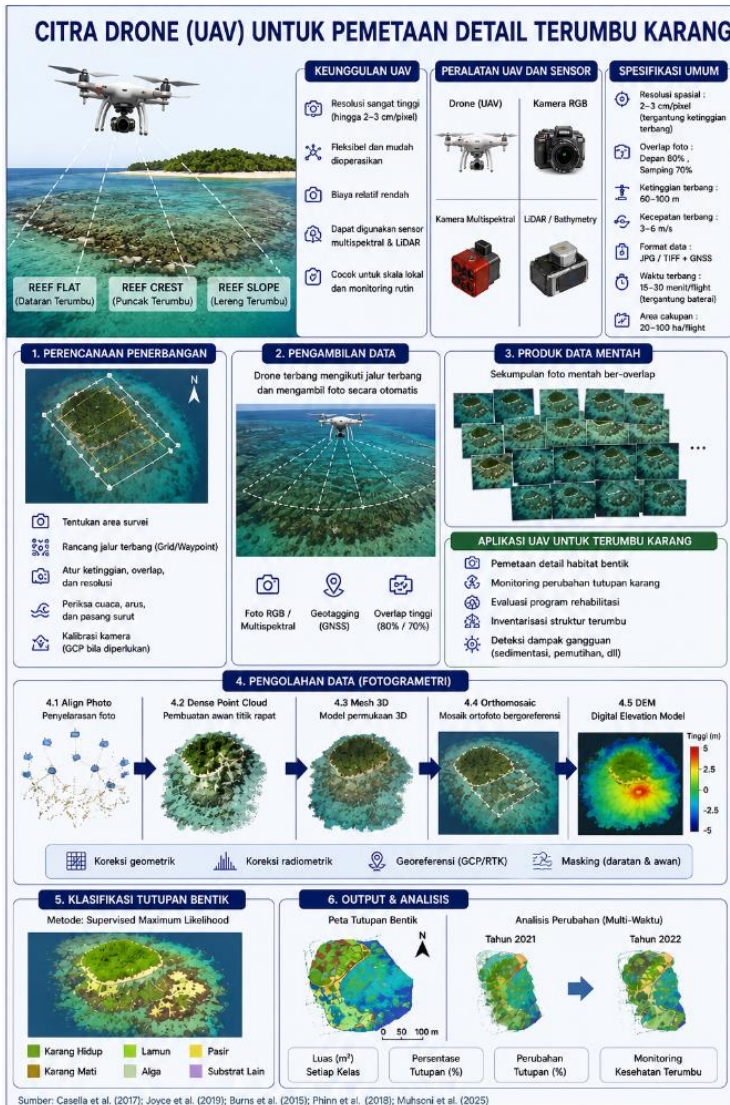
informasi yang diperoleh, serta efektivitas dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data ilmiah. Gambaran penjelasan sensor Penginderaan jauh dan resolusi spasial dapat dilihat pada gambar 16.

➤ **Citra *Drone* (UAV) untuk Pemetaan Detail**

Penggunaan *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) atau drone dalam pemetaan terumbu karang merupakan salah satu inovasi paling signifikan dalam perkembangan teknologi penginderaan jauh modern, khususnya dalam konteks ekosistem pesisir dan laut dangkal. Kehadiran drone telah mengisi kesenjangan antara pengamatan lapangan (*in situ*) yang sangat detail namun terbatas cakupan, dan citra satelit yang memiliki cakupan luas namun resolusi spasial relatif rendah. Dengan kemampuan menghasilkan citra beresolusi sangat tinggi, fleksibilitas operasional, serta biaya yang relatif lebih terjangkau dibandingkan survei udara konvensional, drone menjadi alat yang sangat potensial dalam pemetaan habitat bentik secara detail dan akurat (Casella et al., 2017; Joyce et al., 2019).



Gambar 16. Sensor Penginderaan Jauh dan Resolusi Spasial



Sumber: Casella et al. (2017); Joyce et al. (2019); Burns et al. (2015); Phinn et al. (2018); Muhsan et al. (2025)

Gambar 17. Gambar Citra Drone untuk Pemetaan Terumbu Karang

Secara teknis, UAV bekerja dengan membawa sensor kamera yang dapat berupa kamera RGB standar, multispektral, hingga sensor LiDAR, tergantung pada tujuan riset. Dalam pemetaan terumbu karang, kamera RGB beresolusi tinggi sering digunakan untuk menghasilkan citra visual yang mampu menangkap detail substrat bentik hingga skala sentimeter. Resolusi spasial citra drone dapat mencapai tingkat sangat tinggi, bahkan hingga 2–5 cm/pixel, sehingga memungkinkan identifikasi fitur-fitur kecil seperti koloni karang individu, alga, serta variasi mikrohabitat yang tidak dapat dideteksi oleh citra satelit. Kemampuan ini menjadikan UAV sebagai alat yang sangat efektif dalam studi yang memerlukan detail spasial tinggi, seperti analisis struktur habitat, fragmentasi terumbu, dan perubahan tutupan karang dalam skala lokal. Visualisasi Citra Drone untuk pemetaan Terumbu karang dapat dilihat pada Gambar 17.

Di Pulau Gili Labak, penggunaan citra drone telah menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam pemetaan habitat bentik. Hasil klasifikasi menggunakan metode *supervised maximum likelihood* menunjukkan tingkat akurasi keseluruhan (*overall accuracy*) antara 74,20% hingga 90,87%, dengan nilai koefisien kappa mencapai 89,25%. Nilai ini menunjukkan bahwa citra drone mampu memberikan representasi yang sangat baik terhadap kondisi nyata di lapangan, terutama ketika dikombinasikan dengan data referensi dari survei *in situ*. Tingginya nilai kappa juga menunjukkan bahwa hasil klasifikasi memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan

data validasi, sehingga dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut.

Selain keunggulan dalam akurasi spasial, drone juga memiliki fleksibilitas tinggi dalam aspek temporal. Berbeda dengan satelit yang memiliki jadwal perekaman tetap, UAV dapat dioperasikan kapan saja sesuai kebutuhan, selama kondisi cuaca memungkinkan. Hal ini memberikan keuntungan besar dalam monitoring dinamika ekosistem terumbu karang, yang seringkali mengalami perubahan dalam waktu relatif singkat akibat gangguan lingkungan atau aktivitas manusia. Muhsoni et al., (2025) menunjukkan bahwa penggunaan drone mampu mendeteksi perubahan tutupan karang secara signifikan dalam periode waktu tertentu, seperti peningkatan tutupan dari 30,95% menjadi 57,43% pada salah satu stasiun. Kemampuan ini sangat penting dalam evaluasi efektivitas program konservasi, restorasi terumbu karang, serta dalam mendeteksi dampak gangguan lingkungan secara dini.

Lebih lanjut, penggunaan drone juga memungkinkan integrasi dengan berbagai teknologi sensor tambahan yang dapat meningkatkan kualitas dan jenis informasi yang diperoleh. Sensor multispektral, misalnya, memungkinkan analisis reflektansi pada beberapa panjang gelombang tertentu, sehingga dapat digunakan untuk membedakan jenis substrat dengan lebih akurat dibandingkan citra RGB. Selain itu, penggunaan sensor LiDAR membuka peluang untuk memperoleh informasi tiga dimensi mengenai struktur habitat, termasuk estimasi kedalaman perairan (*bathymetry*) dan

kompleksitas topografi terumbu karang. Integrasi ini menjadikan UAV sebagai platform yang sangat fleksibel dan adaptif dalam berbagai kebutuhan ekologi pesisir (Burns et al., 2015).

Dalam proses pengolahan data, citra yang dihasilkan oleh drone biasanya diproses menggunakan teknik fotogrametri berbasis *Structure-from-Motion* (SfM) untuk menghasilkan produk turunan seperti *Orthomosaic* dan *Digital Elevation Model* (DEM). *Orthomosaic* merupakan citra hasil penggabungan beberapa foto yang telah dikoreksi secara geometrik sehingga memiliki skala dan posisi yang konsisten, sedangkan DEM memberikan informasi mengenai elevasi permukaan yang dapat digunakan untuk analisis struktur habitat. Produk-produk ini kemudian digunakan dalam proses klasifikasi tutupan benthik, yang dapat dilakukan menggunakan berbagai metode, baik berbasis piksel maupun berbasis objek.

Namun demikian, meskipun memiliki banyak keunggulan, penggunaan drone juga memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan. Salah satu keterbatasan utama adalah ketergantungan terhadap kondisi cuaca dan lingkungan. Kondisi angin yang kuat, gelombang tinggi, serta intensitas cahaya yang rendah dapat memengaruhi kualitas citra yang dihasilkan. Selain itu, fenomena *sun glint* atau pantulan cahaya pada permukaan air juga dapat mengganggu interpretasi citra jika tidak dikoreksi dengan baik (Hedley et al., 2016). Kekeruhan air juga menjadi faktor pembatas utama dalam penginderaan jauh berbasis UAV, karena dapat

mengurangi penetrasi cahaya dan mengaburkan detail substrat bentuk.

Keterbatasan lainnya adalah cakupan area yang relatif terbatas dibandingkan dengan citra satelit. UAV lebih cocok digunakan untuk studi skala lokal atau regional dengan area terbatas, sedangkan untuk pemetaan skala besar, penggunaan drone menjadi kurang efisien dari segi waktu dan biaya operasional. Selain itu, pengolahan data citra drone memerlukan kapasitas komputasi yang cukup besar serta keterampilan teknis dalam pengolahan data geospasial, yang dapat menjadi tantangan bagi peneliti dengan sumber daya terbatas.

Oleh karena itu, dalam praktiknya, penggunaan drone dalam pemetaan terumbu karang sering dikombinasikan dengan metode lain, seperti citra satelit dan survei lapangan. Pendekatan integratif ini memungkinkan pemanfaatan keunggulan masing-masing metode, yaitu cakupan luas dari satelit, detail tinggi dari drone, serta akurasi langsung dari data lapangan. Pendekatan multi-metode ini telah terbukti mampu meningkatkan kualitas data serta memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kondisi dan dinamika ekosistem terumbu karang (Muhsoni et al., 2026).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa citra drone merupakan alat yang sangat efektif dalam pemetaan detail ekosistem terumbu karang, terutama dalam skala lokal. Keunggulan dalam resolusi spasial, fleksibilitas operasional, serta kemampuan integrasi

dengan teknologi lain menjadikan UAV sebagai komponen penting dalam sistem monitoring modern. Namun, untuk mencapai hasil yang optimal, penggunaan drone perlu dikombinasikan dengan metode lain serta didukung oleh perencanaan survei dan pengolahan data yang matang.

➤ **Pengolahan Data (*Orthomosaic*, DEM)**

Pengolahan data merupakan tahap yang sangat krusial dalam keseluruhan proses penginderaan jauh, karena pada tahap inilah data mentah yang diperoleh dari sensor, baik berupa citra satelit maupun citra drone, ditransformasikan menjadi informasi yang bermakna dan siap dianalisis secara ilmiah. Dalam konteks pemetaan ekosistem terumbu karang berbasis citra drone, pengolahan data tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan kualitas visual citra, tetapi juga untuk menghasilkan produk turunan yang memiliki nilai analitis tinggi, seperti *Orthomosaic*, *Digital Elevation Model* (DEM), serta model tiga dimensi (3D) dari habitat bentik.

Secara umum, proses pengolahan data dimulai dari tahap praproses (*pre-processing*), yang meliputi koreksi geometrik, koreksi radiometrik, serta pengelolaan metadata citra. Koreksi geometrik bertujuan untuk memperbaiki distorsi posisi akibat pergerakan sensor atau kondisi topografi, sehingga setiap piksel dalam citra memiliki koordinat geografis yang akurat. Sementara itu, koreksi radiometrik dilakukan untuk menyesuaikan nilai intensitas piksel agar mencerminkan kondisi reflektansi yang sebenarnya, dengan mempertimbangkan faktor-

faktor seperti kondisi pencahayaan, sudut pengambilan gambar, serta efek atmosfer dan kolom air (E. P. Green et al., 2000; Hedley et al., 2016).

Setelah tahap praproses, langkah berikutnya adalah pembuatan *Orthomosaic*, yaitu citra hasil penggabungan sejumlah foto udara yang telah dikoreksi secara geometrik dan disusun sedemikian rupa sehingga membentuk satu kesatuan citra yang kontinu dengan skala yang seragam. *Orthomosaic* memiliki keunggulan dibandingkan citra tunggal karena mampu memberikan cakupan area yang lebih luas tanpa mengorbankan detail spasial. Dalam pemetaan terumbu karang, *Orthomosaic* memungkinkan visualisasi distribusi habitat bentik secara menyeluruh, sehingga sangat berguna dalam analisis spasial dan klasifikasi tutupan substrat.

Proses pembuatan *Orthomosaic* umumnya dilakukan menggunakan teknik fotogrametri berbasis *Structure-from-Motion* (SfM), yang merupakan pendekatan rekonstruksi tiga dimensi dari citra dua dimensi berdasarkan prinsip kesamaan fitur antar gambar. Teknik ini bekerja dengan memanfaatkan overlap tinggi antar foto, biasanya antara 70–90%, untuk mengidentifikasi titik-titik kesamaan (*tie points*) yang kemudian digunakan dalam proses penyelarasan (*image alignment*). Dari proses ini dihasilkan model awan titik (*point cloud*) yang merepresentasikan struktur permukaan objek yang diamati. Menurut (Burns et al., 2015), metode SfM telah terbukti mampu menghasilkan model spasial dengan tingkat akurasi tinggi dalam

berbagai aplikasi ekologi, termasuk pemetaan terumbu karang.

Selain menghasilkan *Orthomosaic*, teknik SfM juga memungkinkan pembuatan *Digital Elevation Model* (DEM), yaitu representasi digital dari topografi permukaan yang menggambarkan variasi elevasi atau kedalaman suatu area. Dalam konteks ekosistem terumbu karang, DEM tidak hanya menggambarkan bentuk permukaan dasar laut, tetapi juga memberikan informasi penting mengenai kompleksitas struktural habitat. Kompleksitas ini merupakan salah satu parameter kunci dalam ekologi terumbu karang karena berkaitan erat dengan ketersediaan ruang hidup (*habitat availability*), perlindungan dari predator, serta distribusi organisme laut (Graham & Nash, 2013).

DEM yang dihasilkan dari citra drone biasanya memiliki resolusi yang sangat tinggi, sehingga mampu menggambarkan detail struktur terumbu secara lebih akurat dibandingkan metode konvensional. Informasi ini dapat digunakan untuk menghitung berbagai parameter morfometrik, seperti rugositas (*rugosity*), kemiringan (*slope*), serta volume habitat. Parameter-parameter ini sangat penting dalam analisis ekologi karena memiliki hubungan langsung dengan keanekaragaman dan kelimpahan biota laut.

Fotogrametri 3D yang dilakukan di Pulau Gili Labak, metode SfM menunjukkan performa yang sangat baik dalam menghasilkan model struktur terumbu karang. Hasil analisis menunjukkan bahwa estimasi volume karang memiliki hubungan yang kuat dengan metode

pengukuran konvensional, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) mencapai 0,887 dan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang relatif rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa pengolahan data berbasis citra tidak hanya mampu menghasilkan peta spasial, tetapi juga dapat digunakan untuk analisis kuantitatif yang lebih kompleks, seperti estimasi biomassa dan struktur habitat.

Lebih lanjut, integrasi antara *Orthomosaic* dan DEM memungkinkan analisis multi-dimensi yang menggabungkan informasi spasial (2D) dan struktural (3D). Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kondisi ekosistem terumbu karang, karena tidak hanya mempertimbangkan distribusi horizontal substrat, tetapi juga struktur vertikal yang memiliki peran penting dalam fungsi ekologi. Casella et al. (2017) penggunaan fotogrametri berbasis drone dalam pemetaan terumbu karang mampu meningkatkan akurasi analisis habitat secara signifikan dibandingkan metode konvensional.

Namun demikian, proses pengolahan data ini juga memiliki tantangan tersendiri. Salah satu tantangan utama adalah kebutuhan akan kapasitas komputasi yang tinggi, terutama dalam pengolahan citra dengan resolusi sangat tinggi dan jumlah data yang besar. Proses SfM, misalnya, memerlukan waktu pemrosesan yang cukup lama serta perangkat keras dengan spesifikasi tinggi. Selain itu, kualitas hasil pengolahan sangat bergantung pada kualitas data input, seperti tingkat overlap foto, stabilitas pengambilan gambar, serta kondisi lingkungan saat akuisisi data.

Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah kesalahan geometrik yang dapat terjadi akibat ketidaktepatan posisi kamera atau kurangnya titik kontrol tanah (*Ground Control Points/GCP*). Penggunaan GCP atau sistem navigasi berbasis RTK-GNSS dapat meningkatkan akurasi georeferensi, sehingga menghasilkan *Orthomosaic* dan DEM yang lebih presisi (James et al., 2014). Dalam konteks terumbu karang, akurasi ini sangat penting karena kesalahan kecil dalam posisi dapat memengaruhi interpretasi hasil analisis, terutama dalam studi perubahan spasial dari waktu ke waktu.

Dengan demikian, pengolahan data berbasis *Orthomosaic* dan DEM merupakan tahap yang sangat penting dalam penginderaan jauh terumbu karang. Teknik ini tidak hanya memungkinkan visualisasi spasial yang akurat, tetapi juga membuka peluang untuk analisis struktural dan kuantitatif yang lebih mendalam. Dalam perkembangan teknologi saat ini, pendekatan ini menjadi semakin relevan karena mampu menjembatani kesenjangan antara data observasi lapangan dan analisis spasial berbasis citra, sehingga memberikan kontribusi signifikan dalam monitoring dan pengelolaan ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan.

➤ **Klasifikasi Tutupan Karang**

Klasifikasi tutupan karang merupakan tahap akhir yang sangat penting dalam rangkaian analisis penginderaan jauh untuk ekosistem terumbu karang, karena pada tahap inilah data citra yang telah diproses diubah menjadi informasi tematik yang dapat digunakan untuk

interpretasi ekologis dan pengambilan keputusan. Secara umum, klasifikasi bertujuan untuk mengelompokkan setiap piksel dalam citra ke dalam kategori tertentu berdasarkan karakteristik spektralnya, seperti karang hidup, karang mati, alga, lamun, pasir, dan berbagai jenis substrat lainnya. Hasil klasifikasi ini biasanya disajikan dalam bentuk peta tematik yang menggambarkan distribusi spasial dari masing-masing kelas, sehingga memungkinkan analisis kondisi dan dinamika ekosistem secara lebih komprehensif.

Dalam pendekatan penginderaan jauh, metode klasifikasi dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu klasifikasi berbasis piksel (*pixel-based classification*) dan klasifikasi berbasis objek (*object-based classification*). Pada klasifikasi berbasis piksel, setiap piksel dianalisis secara independen berdasarkan nilai reflektansi spektralnya tanpa mempertimbangkan konteks spasial di sekitarnya. Metode ini merupakan pendekatan klasik yang banyak digunakan karena relatif sederhana dan mudah diimplementasikan, terutama pada citra multispektral dengan resolusi sedang hingga tinggi. Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam menangani heterogenitas habitat bentik yang kompleks, karena seringkali menghasilkan efek *salt-and-pepper* akibat variasi spektral antar piksel yang tinggi (Hedley et al., 2016).

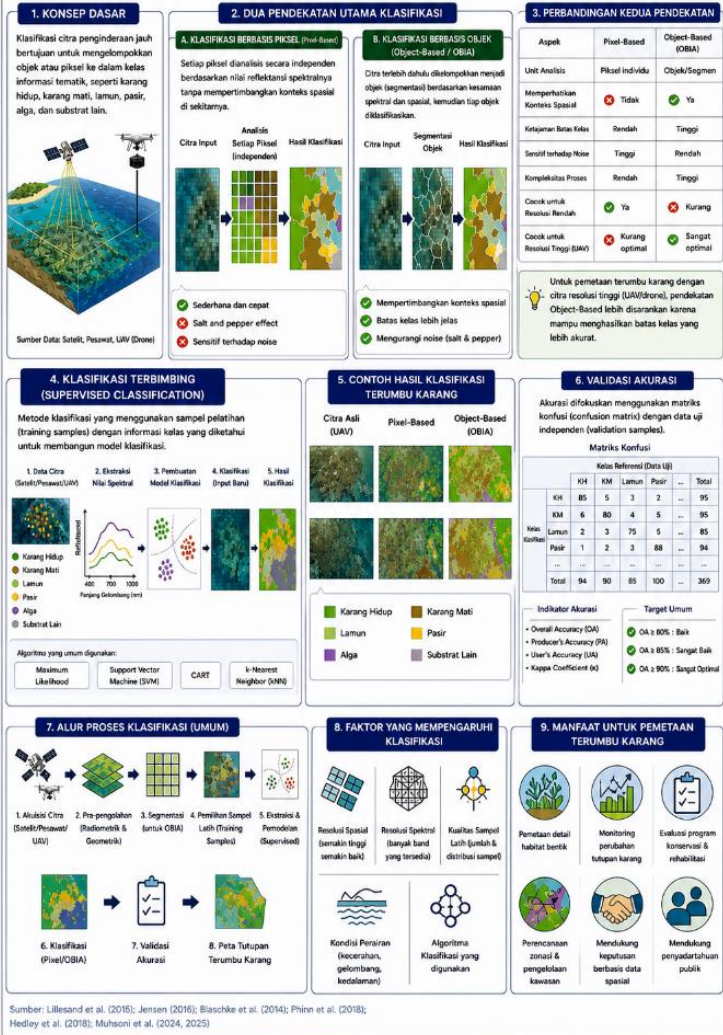
Sebagai alternatif, pendekatan klasifikasi berbasis objek (*Object-Based Image Analysis/OBIA*) mulai banyak digunakan dalam pemetaan terumbu karang, terutama dengan meningkatnya ketersediaan citra resolusi tinggi

dari UAV. Dalam metode ini, citra terlebih dahulu disegmentasi menjadi unit-unit objek yang memiliki kesamaan karakteristik spektral, tekstur, dan bentuk, kemudian setiap objek diklasifikasikan sebagai satu kesatuan. Pendekatan ini terbukti lebih efektif dalam menangani kompleksitas spasial habitat bentik karena mempertimbangkan konteks lingkungan sekitar, sehingga mampu meningkatkan akurasi klasifikasi (Blaschke & Geoffrey, 2001).

Salah satu metode klasifikasi yang paling umum digunakan dalam pemetaan terumbu karang adalah klasifikasi terbimbing (*supervised classification*). Dalam metode ini, algoritma dilatih menggunakan data referensi (*training data*) yang diperoleh dari lapangan atau interpretasi visual citra. Data pelatihan ini digunakan untuk membangun model statistik yang menggambarkan distribusi spektral masing-masing kelas substrat. Salah satu algoritma yang banyak digunakan adalah *maximum likelihood classifier*, yang bekerja dengan menghitung probabilitas setiap piksel untuk termasuk dalam kelas tertentu berdasarkan distribusi normal multivariat dari data pelatihan (Richards, 2013). Visualisasi metode Klasifikasi Pemetaan Terumbu Karang dapat dilihat pada Gambar 18.

METODE KLASIFIKASI DALAM PEMETAAN TERUMBU KARANG

Pixel-Based vs. Object-Based dan Klasifikasi Terbimbing (Supervised Classification)



Gambar 18. Metode Klasifikasi Pemetaan Terumbu Karang

Di Pulau Gili Labak, metode *maximum likelihood* digunakan untuk meng-klasifikasikan citra drone dan menghasilkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan nilai *overall accuracy* mencapai lebih dari 80% dan koefisien kappa yang mendekati 0,9. Hasil ini menunjukkan bahwa metode klasifikasi berbasis citra drone mampu memberikan representasi yang sangat baik terhadap kondisi nyata di lapangan, terutama ketika didukung oleh data pelatihan yang berkualitas dan representatif. Tingginya nilai kappa menunjukkan bahwa hasil klasifikasi memiliki kesesuaian yang tinggi dengan data referensi, sehingga dapat diandalkan untuk analisis lanjutan.

Selain metode statistik klasik, perkembangan teknologi juga telah mendorong penggunaan algoritma berbasis *machine learning* dan *deep learning* dalam klasifikasi tutupan karang. Algoritma seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine (SVM)*, dan *Convolutional Neural Networks (CNN)* telah menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam menangani data dengan kompleksitas tinggi dan distribusi spektral yang tumpang tindih (Beijbom et al., 2015). Pendekatan ini memungkinkan klasifikasi yang lebih akurat, terutama pada citra resolusi tinggi yang dihasilkan oleh UAV, di mana variasi tekstur dan bentuk objek dapat dimanfaatkan sebagai fitur tambahan dalam proses klasifikasi.

Setelah proses klasifikasi dilakukan, tahap berikutnya adalah validasi hasil klasifikasi untuk mengukur tingkat akurasi dan keandalan peta yang dihasilkan. Validasi ini biasanya dilakukan menggunakan *confusion matrix*, yaitu matriks yang membandingkan hasil

klasifikasi dengan data referensi atau data lapangan. Dari matriks ini dapat dihitung berbagai parameter akurasi, seperti *overall accuracy*, *producer's accuracy*, *user's accuracy*, serta koefisien kappa. Koefisien kappa merupakan ukuran statistik yang menunjukkan tingkat kesesuaian antara hasil klasifikasi dan data referensi dengan mempertimbangkan kemungkinan kesesuaian yang terjadi secara kebetulan (Congalton, 1991). Nilai kappa yang mendekati 1 menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi, sedangkan nilai mendekati 0 menunjukkan bahwa hasil klasifikasi tidak lebih baik dari tebakan acak.

Dalam konteks monitoring ekosistem terumbu karang, klasifikasi tutupan karang memiliki peran yang sangat penting karena menyediakan informasi mengenai distribusi spasial habitat bentik serta perubahan kondisi ekosistem dari waktu ke waktu. Informasi ini dapat digunakan untuk berbagai tujuan, seperti evaluasi kesehatan terumbu karang, identifikasi area yang mengalami degradasi, serta perencanaan dan evaluasi program konservasi. Selain itu, data klasifikasi juga dapat digunakan untuk analisis hubungan antara kondisi habitat dan keanekaragaman hayati, sehingga memberikan kontribusi penting dalam ekologi terumbu karang.

Namun demikian, akurasi klasifikasi sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kualitas data citra, resolusi spasial dan spektral, kondisi lingkungan saat akuisisi data, serta metode klasifikasi yang digunakan. Kekeruhan air, variasi kedalaman, serta efek

kolom air dapat memengaruhi nilai reflektansi piksel, sehingga menyulitkan proses klasifikasi. Oleh karena itu, penerapan koreksi kolom air serta penggunaan data tambahan seperti DEM dan informasi tekstur menjadi sangat penting dalam meningkatkan akurasi hasil klasifikasi (Lyzenga, 1981).

Selain itu, keterbatasan metode penginderaan jauh dalam membedakan kelas substrat yang memiliki karakteristik spektral yang mirip juga menjadi tantangan tersendiri. Misalnya, karang mati yang tertutup alga seringkali memiliki reflektansi yang mirip dengan lamun atau alga makro, sehingga memerlukan pendekatan klasifikasi yang lebih canggih atau data tambahan untuk membedakannya. Oleh karena itu, integrasi antara data penginderaan jauh dan data lapangan tetap menjadi pendekatan terbaik untuk memastikan hasil klasifikasi yang akurat dan dapat dipercaya (Green et al., 2000).

Dengan demikian, klasifikasi tutupan karang merupakan tahap yang sangat penting dalam analisis penginderaan jauh yang memungkinkan transformasi data citra menjadi informasi ekologis yang bermakna. Keberhasilan proses ini sangat bergantung pada pemilihan metode klasifikasi yang tepat, kualitas data yang digunakan, serta integrasi dengan data lapangan. Dalam konteks pengelolaan dan konservasi terumbu karang, hasil klasifikasi yang akurat dapat memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengambilan keputusan serta perencanaan strategi pengelolaan yang berkelanjutan.

BAB VI

Fotogrametri 3D Underwater

➤ Konsep Dasar Fotogrametri Bawah Air

Fotogrametri bawah air (*underwater photogrammetry*) merupakan salah satu pendekatan inovatif dalam pemetaan dan analisis ekosistem terumbu karang yang mengintegrasikan prinsip fotografi, geometri, serta rekonstruksi tiga dimensi (3D) untuk menghasilkan representasi digital yang akurat dari objek bawah laut. Pendekatan ini berkembang pesat dalam dua dekade terakhir seiring dengan kemajuan teknologi kamera digital resolusi tinggi, peningkatan kapasitas komputasi, serta perkembangan algoritma rekonstruksi berbasis *Structure from Motion* (SfM) dan *multi view stereo* (MVS). Dalam konteks ekologi terumbu karang, metode ini menjadi sangat penting karena mampu mengatasi keterbatasan metode konvensional berbasis dua dimensi yang hanya merepresentasikan aspek horizontal tanpa mempertimbangkan struktur vertikal habitat.

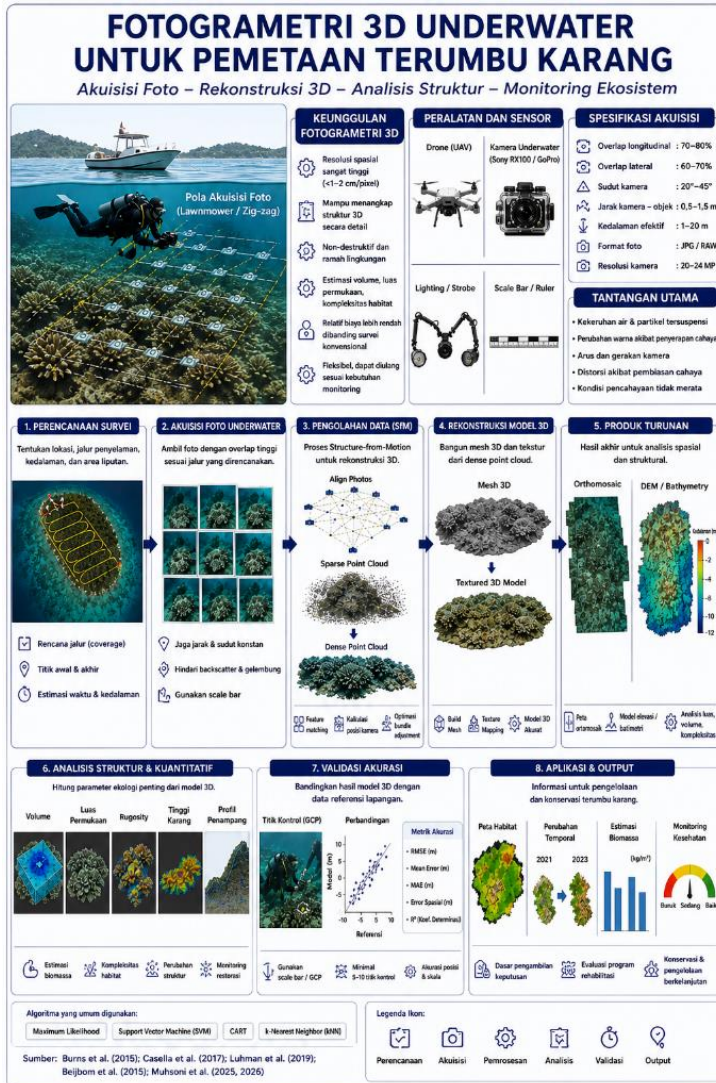
Berdasarkan prinsip triangulasi geometrik, di mana posisi tiga dimensi suatu objek dapat ditentukan melalui pengamatan dari berbagai sudut pandang yang berbeda. Dengan mengambil serangkaian citra yang memiliki tingkat tumpang tindih (*overlap*) tinggi, sistem akan mengidentifikasi titik-titik kesamaan (*feature matching*) antar gambar. Titik-titik ini kemudian digunakan untuk membangun *point cloud* tiga dimensi yang merepresentasikan bentuk dan struktur objek secara spasial. Pendekatan ini telah lama digunakan dalam pemetaan topografi darat, namun implementasinya di lingkungan bawah air menghadapi tantangan yang lebih kompleks akibat sifat optik air yang berbeda dengan udara.

Dalam lingkungan bawah air, cahaya mengalami berbagai proses fisik seperti pembiasan (*refraction*), penyerapan (*absorption*), dan hamburan (*scattering*) ketika melewati kolom air. Proses ini menyebabkan distorsi geometrik serta perubahan spektrum warna pada citra yang dihasilkan. González-Vera et al., (2020) menunjukkan bahwa efek pembiasan pada antarmuka air dapat memengaruhi akurasi rekonstruksi fotogrametri jika tidak diperhitungkan secara tepat. Oleh karena itu, penerapan fotogrametri bawah air memerlukan strategi koreksi khusus, baik melalui kalibrasi kamera maupun algoritma pemrosesan citra yang mempertimbangkan karakteristik optik lingkungan perairan.

Metode SfM tetap mampu menghasilkan model tiga dimensi dengan tingkat akurasi yang tinggi apabila prosedur akuisisi data dilakukan secara sistematis dan terstandarisasi. Magel et al., (2019) serta Marre et al.,

(2019) menegaskan bahwa fotogrametri bawah air merupakan metode yang akurat, presisi, dan relatif efisien untuk rekonstruksi habitat laut dengan resolusi tinggi. Bahkan, teknologi ini telah berkembang menjadi salah satu metode utama dalam monitoring habitat laut modern karena sifatnya yang non-destruktif, fleksibel, serta mampu menghasilkan data spasial detail.

Dalam konteks ekosistem terumbu karang, penggunaan fotogrametri 3D menjadi sangat relevan karena struktur fisik terumbu karang merupakan faktor kunci dalam menentukan fungsi ekologisnya. Terumbu karang memiliki kompleksitas struktural tinggi yang menciptakan berbagai relung ekologi bagi organisme laut. Kompleksitas ini berpengaruh langsung terhadap keanekaragaman hayati, kelimpahan ikan, serta stabilitas ekosistem. Oleh karena itu, kemampuan untuk mengukur parameter struktural seperti luas permukaan, volume, dan rugositas habitat menjadi sangat penting dalam studi ekologi terumbu karang. Hal ini juga ditegaskan dalam literatur bahwa pendekatan tiga dimensi memberikan informasi yang lebih representatif dibandingkan metode dua dimensi yang bersifat planar. Visualisasi fotogrametri Bawah Air untuk pemetaan terumbu karang ada pada Gambar 19.



Gambar 19. Fotogrametri Bawah Air untuk Pemetaan Terumbu Karang.

Lebih lanjut, di Pulau Gili Labak menunjukkan bahwa fotogrametri 3D mampu menghasilkan estimasi parameter fisik terumbu karang dengan tingkat akurasi yang tinggi. Dalam studi perhitungan volume karang menggunakan foto 3D, diperoleh nilai koefisien determinasi sebesar 0,9039 dengan nilai RMSE relatif rendah, yang menunjukkan bahwa model yang dihasilkan memiliki kesesuaian yang tinggi dengan kondisi aktual di lapangan. Hasil serupa juga diperoleh dalam estimasi volume dan berat karang menggunakan pendekatan SfM, di mana nilai koefisien determinasi mencapai sekitar 0,887–0,906 dengan tingkat kesalahan yang rendah, sehingga menunjukkan reliabilitas metode ini dalam analisis kuantitatif.

Keunggulan utama dari fotogrametri bawah air terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan data yang tidak hanya bersifat visual, tetapi juga kuantitatif. Berbeda dengan metode konvensional seperti LIT atau UPT yang hanya menghasilkan data persentase tutupan, fotogrametri 3D memungkinkan analisis lanjutan seperti estimasi biomassa, volume koloni karang, serta perubahan morfologi dari waktu ke waktu. Dengan demikian, metode ini tidak hanya berfungsi sebagai alat dokumentasi, tetapi juga sebagai instrumen analisis ekologi yang komprehensif.

Selain itu, metode ini juga bersifat non-destruktif, sehingga sangat sesuai untuk di kawasan konservasi atau ekosistem yang rentan. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan data tanpa merusak struktur karang, berbeda dengan metode tradisional yang seringkali

memerlukan pengambilan sampel fisik. Hal ini menjadikan fotogrametri 3D sebagai solusi yang lebih berkelanjutan dalam monitoring ekosistem laut.

Namun demikian, meskipun memiliki banyak keunggulan, penerapan fotogrametri bawah air juga memiliki beberapa keterbatasan. Metode ini memerlukan peralatan khusus seperti kamera bawah air berkualitas tinggi, perangkat lunak pengolahan data, serta kemampuan teknis dalam pengolahan citra. Selain itu, proses rekonstruksi model 3D memerlukan waktu dan sumber daya komputasi yang cukup besar, terutama untuk dataset dengan resolusi tinggi. Kondisi lingkungan seperti kekeruhan air, intensitas cahaya, dan arus juga dapat memengaruhi kualitas data yang dihasilkan.

Dalam perspektif yang lebih luas, integrasi fotogrametri 3D dengan metode monitoring lainnya seperti LIT, UPT, dan penginderaan jauh menjadi pendekatan yang semakin penting dalam ekosistem terumbu karang. Studi komparatif menunjukkan bahwa metode 3D memberikan representasi yang lebih akurat terhadap struktur habitat dibandingkan metode 2D, meskipun memerlukan biaya dan teknologi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, kombinasi berbagai metode monitoring menjadi strategi yang optimal untuk memperoleh data yang komprehensif, akurat, dan dapat digunakan dalam pengelolaan serta konservasi terumbu karang secara berkelanjutan.

➤ Teknik Akuisisi Data (*Overlap* dan Sudut Kamera)

Keberhasilan rekonstruksi model tiga dimensi (3D) dalam fotogrametri bawah air sangat ditentukan oleh kualitas data yang diperoleh pada tahap akuisisi. Tahap ini merupakan fondasi utama dalam keseluruhan proses, karena kesalahan atau ketidakkonsistenan dalam pengambilan citra tidak dapat sepenuhnya diperbaiki pada tahap pengolahan. Dalam konteks lingkungan bawah air, teknik akuisisi data harus dirancang secara cermat dengan mempertimbangkan aspek geometrik, optik, serta kondisi lingkungan yang kompleks. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai parameter-parameter kunci seperti *overlap*, sudut kamera, jarak pengambilan, serta kondisi perairan menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan memenuhi persyaratan rekonstruksi 3D berbasis *Structure from Motion* (SfM).

Salah satu parameter paling krusial dalam akuisisi data fotogrametri adalah tingkat *overlap* atau tumpang tindih antar citra. *Overlap* mengacu pada persentase area yang sama yang direkam dalam dua atau lebih gambar, yang memungkinkan sistem untuk mengidentifikasi titik-titik kesamaan (*feature matching*) sebagai dasar dalam proses rekonstruksi. Dalam praktik fotogrametri bawah air, *overlap* yang direkomendasikan umumnya berkisar antara 70–80% untuk arah longitudinal (*forward overlap*) dan 60–80% untuk arah lateral (*side overlap*). Tingkat *overlap* yang tinggi ini diperlukan untuk meningkatkan jumlah *tie points* yang dapat dikenali oleh algoritma SfM,

sehingga menghasilkan model 3D yang lebih akurat dan stabil (Burns et al., 2016; Storlazzi et al., 2016).

Dalam studi yang dilakukan pada ekosistem terumbu karang, tingkat overlap yang tinggi terbukti mampu meningkatkan kepadatan *point cloud* serta mengurangi kesalahan rekonstruksi akibat kehilangan informasi spasial. Muhsoni et al., (2026) menunjukkan bahwa kualitas model 3D sangat dipengaruhi oleh konsistensi overlap, di mana citra dengan overlap rendah cenderung menghasilkan model yang terfragmentasi dan kurang representatif terhadap kondisi sebenarnya. Oleh karena itu, strategi akuisisi data biasanya dirancang dalam pola jalur sistematis seperti *lawnmower pattern* atau pola zig-zag, yang memungkinkan cakupan area yang merata dengan tingkat overlap yang konsisten.

Selain overlap, sudut pengambilan kamera juga merupakan faktor penting dalam menentukan kualitas rekonstruksi model 3D. Pengambilan citra dari berbagai sudut memungkinkan sistem untuk memperoleh informasi kedalaman (*depth information*) yang lebih akurat melalui variasi perspektif. Dalam praktiknya, kombinasi antara sudut nadir (tegak lurus terhadap substrat) dan sudut oblique (miring sekitar 30°–45°) sangat dianjurkan. Sudut nadir berfungsi untuk menangkap distribusi horizontal substrat, sedangkan sudut oblique memberikan informasi tambahan mengenai struktur vertikal dan kompleksitas morfologi terumbu karang. Pendekatan ini terbukti mampu mengurangi efek bayangan (*shadowing effect*) serta

meningkatkan representasi struktur tiga dimensi secara keseluruhan (Burns et al., 2019; Figueira et al., 2015).

Pengambilan citra dengan sudut yang terlalu seragam dapat menyebabkan kurangnya variasi perspektif, yang pada akhirnya mengurangi kualitas rekonstruksi model. Hal ini karena algoritma SfM bergantung pada perbedaan posisi kamera untuk menghitung koordinat spasial objek. Oleh karena itu, penyelam atau operator kamera harus menjaga pergerakan yang stabil namun tetap memberikan variasi sudut pengambilan yang cukup. Dalam konteks ini, teknik pengambilan data yang terencana menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa setiap bagian area terumbu karang terekam dari berbagai sudut pandang.

Selain parameter overlap dan sudut kamera, jarak antara kamera dan objek juga harus dijaga secara konsisten untuk memastikan keseragaman skala dalam model yang dihasilkan. Umumnya, jarak ideal dalam fotogrametri bawah air berkisar antara 0,5 hingga 1 meter, tergantung pada resolusi kamera dan ukuran objek yang diamati. Jarak yang terlalu dekat dapat menyebabkan area cakupan menjadi sempit, sementara jarak yang terlalu jauh dapat mengurangi detail citra dan akurasi identifikasi substrat. Oleh karena itu, menjaga jarak yang konstan menjadi faktor penting dalam menghasilkan data yang konsisten dan berkualitas tinggi.

Penggunaan *scale bar* atau objek referensi ukuran juga sangat dianjurkan dalam proses akuisisi data. Alat ini berfungsi untuk memberikan referensi skala dalam model 3D yang dihasilkan, sehingga memungkinkan pe-

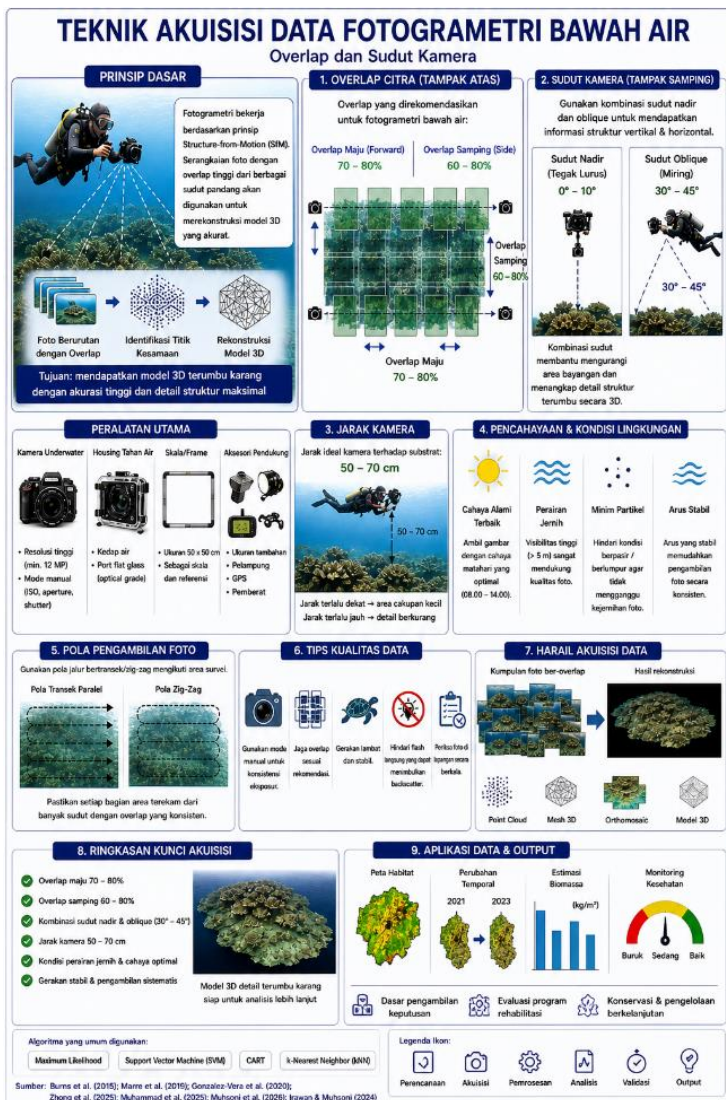
ngukuran parameter kuantitatif seperti panjang, luas, dan volume secara akurat. Penggunaan *ground control points* (GCP) atau penanda skala tambahan juga digunakan untuk meningkatkan akurasi geospasial model (Westoby et al., 2012).

Kondisi lingkungan perairan merupakan faktor eksternal yang sangat memengaruhi kualitas data yang dihasilkan. Kekeruhan air (*turbidity*) dapat mengurangi visibilitas dan menyebabkan penurunan kualitas citra akibat efek hamburan cahaya. Selain itu, arus laut yang kuat dapat menyulitkan penyelam dalam menjaga stabilitas posisi kamera, sehingga meningkatkan risiko blur pada gambar. Intensitas cahaya juga berperan penting dalam menentukan kualitas pencahayaan citra. Dalam kondisi perairan dengan cahaya rendah, penggunaan lampu tambahan atau *strobe* menjadi sangat penting untuk meningkatkan kualitas visual dan mengurangi efek bayangan.

González-Vera et al., (2020) menegaskan bahwa kondisi optik air memiliki pengaruh signifikan terhadap akurasi rekonstruksi fotogrametri, terutama terkait dengan efek pembiasan dan penyerapan cahaya. Oleh karena itu, pengambilan data sebaiknya dilakukan pada kondisi lingkungan yang optimal, yaitu perairan yang jernih, arus yang relatif tenang, serta pencahayaan yang cukup.

Secara keseluruhan, teknik akuisisi data dalam fotogrametri bawah air merupakan proses yang kompleks dan memerlukan perencanaan yang matang. Integrasi antara overlap yang tinggi, variasi sudut kamera,

konsistensi jarak pengambilan, serta kondisi lingkungan yang optimal menjadi kunci utama dalam menghasilkan model 3D yang akurat dan representatif. Dalam konteks monitoring ekosistem terumbu karang, kualitas data akuisisi tidak hanya menentukan keberhasilan rekonstruksi model, tetapi juga memengaruhi validitas analisis lanjutan seperti estimasi volume, biomassa, dan kompleksitas habitat. Oleh karena itu, tahap akuisisi data harus dipandang sebagai komponen kritis dalam keseluruhan workflow fotogrametri bawah air. Visualisasi teknis akuisisi data fotogrametri bawah air ada pada Gambar 20.



Gambar 20. Teknis Akuisisi Data Fotogrametri Bawah Air

➤ **Rekonstruksi Model 3D**

Proses rekonstruksi model tiga dimensi (3D) merupakan tahapan inti dalam pendekatan fotogrametri bawah air, di mana sekumpulan citra dua dimensi yang diambil dari berbagai sudut pandang diubah menjadi representasi spasial tiga dimensi yang dapat dianalisis secara kuantitatif dan visual. Dalam konteks pemetaan terumbu karang, rekonstruksi model 3D memberikan keunggulan signifikan dibandingkan metode konvensional dua dimensi, karena mampu merepresentasikan kompleksitas struktural habitat yang memiliki peran penting dalam menentukan keanekaragaman dan dinamika ekosistem laut. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa metode 3D mampu memberikan informasi yang lebih komprehensif terkait topografi dan morfologi terumbu karang dibandingkan metode 2D yang hanya terbatas pada aspek planar atau horizontal.

Secara umum, proses rekonstruksi model 3D berbasis fotogrametri melibatkan beberapa tahapan utama yang saling terintegrasi, yaitu *image alignment* (penyelarasan citra), pembentukan *sparse point cloud*, *dense point cloud generation*, *mesh construction*, dan *texture mapping*. Tahap pertama, yaitu *image alignment*, merupakan proses identifikasi titik-titik kesamaan (*feature matching*) antar citra yang diambil dengan tingkat overlap tinggi. Algoritma computer vision akan mendeteksi fitur unik pada setiap gambar, seperti tepi, sudut, atau pola tekstur, kemudian mencocokkannya dengan fitur yang sama pada gambar lain untuk

menentukan posisi relatif kamera dalam ruang tiga dimensi. Proses ini menghasilkan sparse point cloud, yaitu kumpulan titik-titik awal yang menggambarkan kerangka dasar struktur objek yang direkonstruksi. Menurut González-Vera et al. (2020), akurasi tahap ini sangat dipengaruhi oleh kualitas citra serta kemampuan sistem dalam mengoreksi efek refraksi pada batas medium air dan udara.

Tahap selanjutnya adalah pembentukan dense point cloud, yang merupakan pengembangan dari sparse point cloud dengan jumlah titik yang jauh lebih banyak dan distribusi yang lebih rapat. Pada tahap ini, sistem melakukan interpolasi dan rekonstruksi detail permukaan objek dengan tingkat presisi yang lebih tinggi. Dense point cloud menjadi dasar utama dalam menghasilkan model permukaan yang realistis, karena mampu merepresentasikan detail kecil seperti tekstur permukaan karang, celah, dan struktur mikro lainnya. Marre et al., (2019) menjelaskan bahwa peningkatan kepadatan point cloud secara signifikan akan meningkatkan resolusi spasial model 3D serta memungkinkan analisis ekologis yang lebih akurat.

Setelah dense *point cloud* terbentuk, proses dilanjutkan ke tahap *mesh construction*, yaitu pembentukan permukaan 3D dengan menghubungkan titik-titik dalam point cloud menjadi jaringan poligon (umumnya berbentuk segitiga). Mesh ini berfungsi sebagai representasi geometrik dari objek yang kontinu dan memungkinkan analisis bentuk serta volume secara lebih akurat. Tahap ini sangat penting dalam studi

terumbu karang karena memungkinkan estimasi parameter struktural seperti luas permukaan, volume, dan kompleksitas habitat yang berkaitan langsung dengan fungsi ekosistem. Di Pulau Gili Labak menunjukkan bahwa penggunaan model 3D berbasis fotogrametri mampu menghasilkan estimasi volume karang dengan tingkat akurasi yang tinggi, ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi sebesar 0,9039 serta nilai RMSE yang relatif rendah.

Tahap akhir dalam proses rekonstruksi adalah *texture mapping*, yaitu proses pemetaan informasi warna dari citra asli ke permukaan mesh yang telah terbentuk. Proses ini menghasilkan model 3D yang tidak hanya akurat secara geometrik, tetapi juga realistis secara visual. Model yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai tujuan analisis, mulai dari identifikasi jenis karang hingga visualisasi perubahan ekosistem dalam skala temporal. Dalam studi lanjutan, model 3D ini juga dapat dikombinasikan dengan teknik klasifikasi berbasis objek untuk meningkatkan akurasi interpretasi habitat bentik.

Dalam konteks aplikasi praktis, model 3D yang dihasilkan dari fotogrametri bawah air memiliki berbagai kegunaan penting dalam pengelolaan terumbu karang. Salah satu aplikasi utama adalah estimasi volume dan biomassa karang secara non-destruktif. Pendekatan ini menjadi sangat penting karena metode konvensional yang melibatkan pengukuran langsung sering kali bersifat invasif dan dapat merusak struktur karang. Model regresi berbasis fotogrametri 3D mampu menghasilkan estimasi volume dan berat karang dengan tingkat akurasi

tinggi, dengan nilai koefisien determinasi mencapai 0,887 untuk volume dan 0,906 untuk berat.

Selain itu, model 3D juga memungkinkan analisis kompleksitas struktural habitat, yang merupakan indikator penting dalam studi ekologi terumbu karang. Kompleksitas ini berkaitan erat dengan ketersediaan ruang hidup bagi organisme laut, sehingga memengaruhi keanekaragaman dan kelimpahan spesies. Dalam hal ini, penggunaan fotogrametri 3D memberikan keunggulan signifikan karena mampu menangkap dimensi vertikal yang tidak dapat diukur dengan metode 2D konvensional. Hal ini juga diperkuat oleh studi yang menyatakan bahwa metode 3D memberikan representasi yang lebih akurat terhadap perubahan morfologi terumbu karang dari waktu ke waktu.

Namun demikian, proses rekonstruksi model 3D tidak terlepas dari berbagai tantangan, terutama dalam lingkungan bawah air. Faktor seperti kekeruhan air, pencahayaan yang tidak merata, serta efek optik seperti refraksi dan scattering dapat memengaruhi kualitas citra yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan prosedur akuisisi data yang ketat serta penggunaan algoritma koreksi untuk meminimalkan distorsi geometrik. Zhong et al., (2025) menegaskan bahwa integrasi teknik fotogrametri dengan pendekatan computer vision modern mampu meningkatkan kualitas rekonstruksi model 3D bahkan dalam kondisi lingkungan yang kompleks. Visualisasi rekonstruksi model 3D dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. Rekonstruksi Model 3D

Secara keseluruhan, rekonstruksi model 3D berbasis fotogrametri merupakan pendekatan yang sangat potensial dalam pemetaan dan analisis terumbu karang. Metode ini tidak hanya memberikan representasi visual yang lebih realistis, tetapi juga memungkinkan analisis kuantitatif yang lebih mendalam terhadap struktur dan dinamika ekosistem. Dengan perkembangan teknologi kamera, perangkat lunak, serta algoritma pemrosesan data, penggunaan fotogrametri 3D diperkirakan akan semakin luas dalam mendukung konservasi dan pengelolaan terumbu karang secara berkelanjutan.

➤ **Software dan Workflow (*Agisoft Metashape*) dalam Fotogrametri Terumbu Karang**

Dalam perkembangan teknologi fotogrametri modern, perangkat lunak (*software*) memegang peranan yang sangat penting dalam mengolah data citra menjadi model tiga dimensi (3D) yang akurat dan dapat dianalisis secara kuantitatif. Salah satu perangkat lunak yang paling banyak digunakan dalam fotogrametri, termasuk dalam studi ekosistem terumbu karang, adalah *Agisoft Metashape* (sebelumnya dikenal sebagai *Agisoft Photoscan*). Software ini banyak dipilih karena kemampuannya dalam mengintegrasikan seluruh tahapan rekonstruksi 3D berbasis *Structure-from-Motion* (SfM) dan *Multi-View Stereo* (MVS) dalam satu *workflow* yang sistematis, fleksibel, dan relatif mudah digunakan.

Secara umum, workflow dalam *Agisoft Metashape* dimulai dari tahap impor citra yang diperoleh dari hasil akuisisi lapangan, baik menggunakan kamera bawah air maupun drone. Pada tahap ini, kualitas citra menjadi faktor yang sangat menentukan keberhasilan proses selanjutnya, karena citra yang buram, kurang overlap, atau memiliki pencahayaan yang tidak merata dapat menyebabkan kegagalan dalam proses rekonstruksi. Oleh karena itu, seperti yang ditunjukkan dalam fotogrametri di Gili Labak, citra yang digunakan umumnya memiliki tingkat overlap sekitar 70–80% untuk memastikan keberhasilan proses *feature matching*.

Tahap berikutnya adalah align photos (*image alignment*), yang merupakan proses inti dalam menentukan posisi relatif kamera serta orientasi setiap citra dalam ruang tiga dimensi. Pada tahap ini, Metashape menggunakan algoritma SfM untuk mendeteksi titik-titik kesamaan (*keypoints*) antar gambar dan menghubungkannya melalui proses *bundle adjustment*. Hasil dari tahap ini adalah sparse point cloud, yang merepresentasikan struktur dasar objek serta posisi kamera dalam sistem koordinat relatif. Menurut Burns et al. (2015), keberhasilan tahap ini sangat dipengaruhi oleh distribusi fitur yang merata dalam citra serta tingkat overlap yang cukup tinggi.

Setelah proses alignment selesai, workflow dilanjutkan dengan tahap build dense cloud, yang merupakan proses rekonstruksi detail permukaan objek menggunakan pendekatan *multi-view stereo* (MVS). Pada tahap ini, Metashape menghasilkan dense point cloud

yang memiliki jumlah titik jauh lebih banyak dibandingkan sparse point cloud, sehingga mampu merepresentasikan detail morfologi terumbu karang dengan resolusi tinggi. Dense point cloud ini menjadi dasar utama dalam analisis struktur habitat, karena dapat digunakan untuk menghitung parameter ekologis seperti kompleksitas struktural dan rugositas habitat, yang memiliki hubungan erat dengan keanekaragaman hayati (Graham & Nash, 2013).

Tahap selanjutnya adalah *build mesh*, yaitu proses pembentukan permukaan 3D yang kontinu dengan menghubungkan titik-titik dalam dense point cloud menjadi jaringan poligon (*triangular mesh*). Mesh ini berfungsi sebagai representasi geometrik dari objek yang dapat digunakan untuk analisis volumetrik dan morfologi. Di Pulau Gili Labak, penggunaan mesh berbasis fotogrametri memungkinkan estimasi volume karang secara akurat, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) mencapai 0,887 dan tingkat kesalahan (RMSE) yang relatif rendah, sehingga menunjukkan bahwa metode ini memiliki akurasi tinggi dibandingkan metode konvensional yang bersifat destruktif.

Setelah mesh terbentuk, proses dilanjutkan ke tahap build texture, yaitu pemetaan informasi warna dari citra asli ke permukaan mesh. Tahap ini menghasilkan model 3D yang tidak hanya akurat secara geometrik, tetapi juga realistis secara visual. Model bertekstur ini sangat penting dalam studi ekologi terumbu karang karena memungkinkan identifikasi jenis substrat, kondisi

kesehatan karang, serta analisis visual perubahan ekosistem dari waktu ke waktu.

Selain menghasilkan model 3D, *Agisoft Metashape* juga memiliki kemampuan untuk menghasilkan produk turunan seperti *Orthomosaic* dan *Digital Elevation Model* (DEM). *Orthomosaic* merupakan citra hasil penggabungan beberapa foto yang telah dikoreksi secara geometrik sehingga memiliki skala yang seragam dan bebas distorsi perspektif. Produk ini sangat berguna dalam analisis spasial dua dimensi, seperti pemetaan tutupan karang dan klasifikasi habitat benthik. Sementara itu, DEM memberikan informasi mengenai elevasi atau topografi permukaan, yang dalam konteks terumbu karang dapat digunakan untuk menganalisis struktur habitat dan kompleksitas morfologi.

Keunggulan utama *Agisoft Metashape* terletak pada kemampuannya dalam menangani dataset besar dengan resolusi tinggi, serta fleksibilitas dalam pengaturan parameter rekonstruksi. Software ini memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan tingkat akurasi, kepadatan point cloud, serta kualitas mesh sesuai dengan kebutuhan. Selain itu, *Metashape* juga mendukung integrasi dengan data geospasial seperti *Global Navigation Satellite System* (GNSS) dan *Ground Control Points* (GCP), yang sangat penting untuk meningkatkan akurasi absolut model. Penggunaan GCP dalam fotogrametri terbukti mampu meningkatkan akurasi posisi spasial secara signifikan, sebagaimana dijelaskan oleh Westoby et al., (2012) dalam studi mengenai penerapan SfM dalam geosains.

Integrasi antara workflow Metashape dengan data lapangan seperti LIT dan UPT menjadi pendekatan yang sangat kuat dalam menghasilkan analisis yang komprehensif. Data 3D yang dihasilkan tidak hanya dapat digunakan untuk pemetaan visual, tetapi juga untuk analisis kuantitatif seperti estimasi biomassa, volume karang, serta perubahan struktur habitat dari waktu ke waktu. Hal ini sejalan dengan temuan Muhsoni et al., (2025), yang menunjukkan bahwa kombinasi antara fotogrametri 3D dan penginderaan jauh mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam terhadap dinamika ekosistem terumbu karang.

Secara keseluruhan, *Agisoft Metashape* merupakan salah satu perangkat lunak yang sangat *powerful* dalam mendukung fotogrametri terumbu karang. Workflow yang terstruktur, kemampuan pengolahan data yang tinggi, serta integrasi dengan sistem geospasial menjadikan software ini sebagai alat yang sangat efektif dalam menghasilkan model 3D yang akurat, efisien, dan relevan serta konservasi ekosistem laut.

BAGIAN IV

INTEGRASI DAN ANALISIS SPASIAL

BAB VII

Integrasi Data Drone dan Foto 3D

➤ **Konsep Integrasi Multi-Skala dalam Monitoring Terumbu Karang**

Dalam perkembangan ilmu ekologi laut modern, khususnya dalam pemantauan ekosistem terumbu karang, konsep integrasi multi-skala (*multi-scale integration*) telah menjadi pendekatan yang sangat penting dan strategis. Pendekatan ini muncul sebagai respons terhadap keterbatasan metode tunggal dalam menangkap kompleksitas ekosistem yang bersifat heterogen, dinamis, dan multidimensional. Ekosistem terumbu karang memiliki karakteristik unik berupa variasi spasial yang tinggi, struktur tiga dimensi yang kompleks, serta dinamika temporal yang dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan dan antropogenik. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu mengintegrasikan informasi dari berbagai skala pengamatan untuk menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif.

Secara konseptual, integrasi multi-skala merujuk pada penggabungan data yang diperoleh dari berbagai resolusi spasial, temporal, dan struktural ke dalam satu kerangka analisis yang terpadu. Dalam konteks pemetaan terumbu karang, pendekatan ini umumnya mengombinasikan data skala luas (*broad-scale*) yang diperoleh dari teknologi penginderaan jauh seperti citra satelit atau drone (UAV), dengan data skala mikro (*fine-scale*) yang diperoleh dari metode in situ atau fotogrametri tiga dimensi (3D). Integrasi ini memungkinkan peneliti untuk memahami ekosistem tidak hanya dari sisi distribusi horizontal, tetapi juga dari aspek struktur vertikal dan kompleksitas habitat yang menjadi kunci dalam fungsi ekologis terumbu karang.

Citra drone (UAV) berperan sebagai sumber data pada skala menengah hingga luas dengan resolusi spasial yang sangat tinggi, umumnya berkisar antara 2–5 cm/pixel tergantung pada ketinggian terbang dan sensor yang digunakan. Resolusi ini memungkinkan identifikasi detail habitat benthik seperti karang hidup, karang mati, lamun, dan substrat lainnya secara spasial. Selain itu, drone memiliki keunggulan dalam fleksibilitas temporal, di mana data dapat diambil secara berulang dalam interval waktu tertentu, sehingga memungkinkan analisis perubahan kondisi ekosistem secara dinamis (Handoko et al., 2025).

Di sisi lain, fotogrametri 3D bawah air memberikan kontribusi penting pada skala mikro dengan kemampuan merekonstruksi struktur fisik terumbu karang secara detail. Metode ini memungkinkan pengukuran parameter

struktural seperti volume, luas permukaan, dan kompleksitas habitat, yang tidak dapat diperoleh dari data 2D. Fotogrametri 3D mampu menghasilkan estimasi volume dan biomassa karang dengan tingkat akurasi yang tinggi, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) mencapai lebih dari 0,88. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan 3D memiliki peran krusial dalam analisis kuantitatif ekosistem terumbu karang.

Lebih lanjut, integrasi multi-skala juga melibatkan metode konvensional seperti *Line Intercept Transect* (LIT) dan *Underwater Photo Transect* (UPT) sebagai sumber data validasi lapangan (*ground truthing*). Metode ini tetap memiliki peran penting dalam memberikan data referensi yang digunakan untuk kalibrasi dan validasi hasil klasifikasi dari citra drone maupun model 3D. Studi yang dilakukan dalam laporan integrasi drone dan foto bawah air 3D menunjukkan bahwa kombinasi berbagai metode ini mampu meningkatkan akurasi pemetaan kondisi terumbu karang secara signifikan.

Salah satu keunggulan utama dari pendekatan multi-skala adalah kemampuannya dalam menangkap variabilitas ekologi yang terjadi pada berbagai tingkat organisasi ekosistem. Pada skala luas, data drone memungkinkan identifikasi pola distribusi habitat dan perubahan tutupan karang secara spasial. Sementara itu, pada skala mikro, data 3D memungkinkan analisis struktur habitat yang berpengaruh langsung terhadap keanekaragaman dan kelimpahan organisme laut. Dengan demikian, integrasi ini memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai kondisi ekosistem.

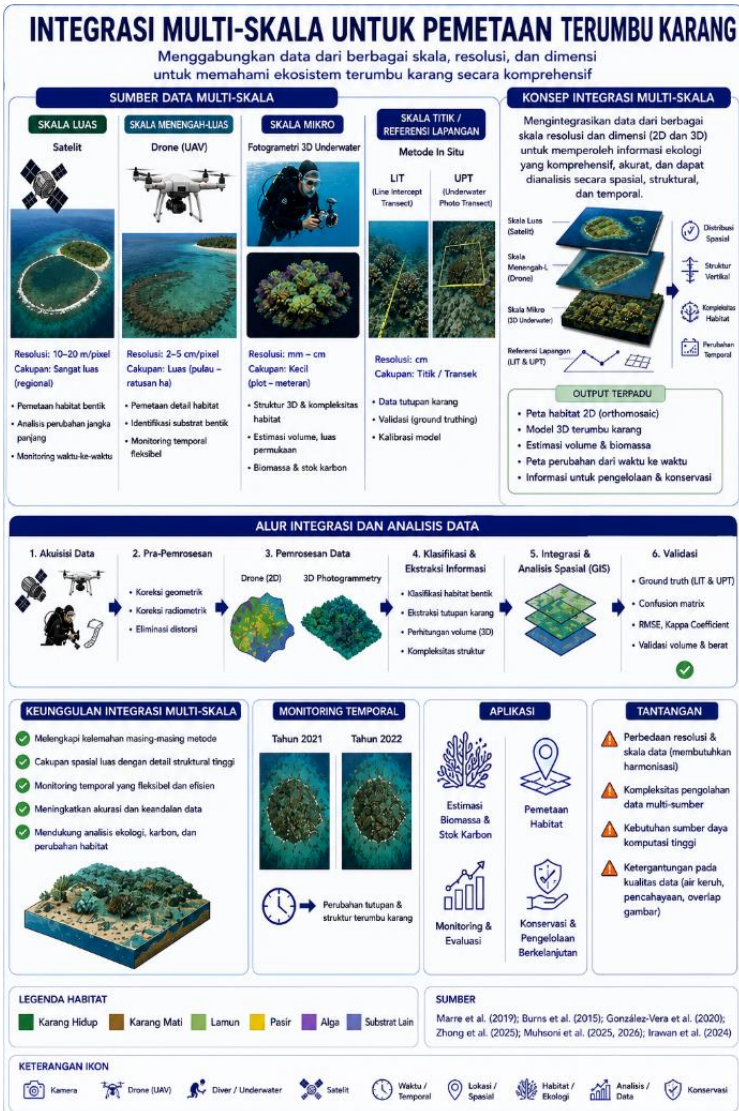
Dalam konteks dinamika temporal, integrasi multi-skala juga memberikan keuntungan yang signifikan. Data drone yang dapat diperoleh secara berkala memungkinkan pemantauan perubahan tutupan karang akibat gangguan seperti pemutihan, sedimentasi, atau aktivitas manusia. Sementara itu, data 3D memungkinkan analisis perubahan struktur fisik, seperti pertumbuhan atau degradasi karang. Kombinasi kedua jenis data ini memungkinkan analisis perubahan ekosistem secara lebih komprehensif, baik dari aspek spasial maupun struktural.

Selain itu, pendekatan multi-skala juga mendukung pengembangan model spasial dan prediktif yang lebih akurat. Dengan mengintegrasikan data 2D dan 3D dalam sistem informasi geografis (GIS), peneliti dapat mengembangkan model yang mampu memprediksi perubahan ekosistem berdasarkan berbagai skenario lingkungan. Hal ini sangat penting dalam mendukung pengelolaan ekosistem terumbu karang yang berbasis pada prinsip keberlanjutan.

- a. Namun demikian, implementasi integrasi multi-skala juga menghadapi beberapa tantangan, antara lain:
- b. Perbedaan resolusi dan skala data yang memerlukan proses harmonisasi
- c. Kompleksitas dalam pengolahan dan integrasi data multi-sumber
- d. Kebutuhan sumber daya komputasi yang tinggi
- e. Ketergantungan pada kualitas data akuisisi

Meskipun demikian, perkembangan teknologi komputasi dan perangkat lunak analisis spasial telah memungkinkan integrasi data multi-skala dilakukan dengan lebih efisien dan akurat.

Secara keseluruhan, konsep integrasi multi-skala merupakan pendekatan yang sangat penting dalam monitoring terumbu karang modern. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kualitas dan akurasi data, tetapi juga memperluas cakupan analisis yang dapat dilakukan. Dengan menggabungkan keunggulan berbagai metode, integrasi multi-skala memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai struktur, fungsi, dan dinamika ekosistem terumbu karang, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif dalam pengelolaan dan konservasi. Visualisasi integrasi multi skala untuk pemetaan terumbu karang dapat dilihat pada Gambar 22.



Gambar 22. Integrasi Multi Skala untuk Pemetaan Terumbu Karang

➤ Integrasi Data 2D dan 3D

Integrasi antara data dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D) dalam pemetaan terumbu karang merupakan salah satu pendekatan mutakhir yang semakin berkembang dalam ilmu kelautan dan ekologi spasial. Pendekatan ini berangkat dari kesadaran bahwa karakteristik ekosistem terumbu karang tidak hanya ditentukan oleh distribusi horizontal (planar), tetapi juga oleh kompleksitas struktur vertikal yang memainkan peran kunci dalam menentukan fungsi ekologis, produktivitas, serta daya dukung habitat terhadap keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, penggabungan informasi dari data 2D dan 3D menjadi sangat penting untuk memperoleh gambaran ekosistem yang lebih utuh, akurat, dan multidimensional.

Data 2D umumnya diperoleh dari teknologi penginderaan jauh seperti citra satelit dan drone (UAV), yang mampu menyediakan informasi spasial dengan cakupan area luas dan resolusi yang bervariasi. Citra ini sangat efektif untuk mengidentifikasi distribusi habitat bentik seperti karang hidup, karang mati, lamun, alga, dan substrat non-biologis seperti pasir dan rubble. Menurut Green et al., (2000), penginderaan jauh memungkinkan pemetaan habitat laut dangkal secara efisien pada skala regional hingga global, terutama dengan memanfaatkan spektrum biru-hijau yang mampu menembus kolom air. Lebih lanjut, citra drone dengan resolusi tinggi (hingga 2–5 cm/pixel) memungkinkan identifikasi objek bentik secara lebih detail dibandingkan citra satelit seperti Sentinel-2 yang memiliki resolusi 10–20 meter (Casella et al., 2017; Hedley et al., 2016).

Namun demikian, keterbatasan utama dari data 2D adalah sifatnya yang planar, di mana informasi yang diperoleh hanya merepresentasikan permukaan horizontal tanpa mempertimbangkan variasi ketinggian atau struktur vertikal. Padahal, dalam ekosistem terumbu karang, struktur tiga dimensi memiliki peran yang sangat penting dalam menyediakan habitat bagi berbagai organisme laut. Graham & Nash, (2013) menegaskan bahwa kompleksitas struktural terumbu karang memiliki hubungan langsung dengan keanekaragaman dan kelimpahan ikan karang, karena struktur tersebut menciptakan berbagai relung ekologi (*ecological niches*) yang mendukung kehidupan organisme.

Di sisi lain, data 3D yang diperoleh melalui teknik fotogrametri bawah air memberikan informasi yang jauh lebih detail terkait struktur fisik terumbu karang. Metode ini memungkinkan rekonstruksi objek dalam bentuk model tiga dimensi yang dapat digunakan untuk menghitung parameter seperti tinggi koloni, luas permukaan, volume, serta rugositas habitat. Burns et al., (2015) menunjukkan bahwa teknik *Structure-from-Motion* (SfM) dalam fotogrametri mampu menghasilkan model 3D dengan akurasi tinggi, bahkan dalam kondisi lingkungan bawah air yang kompleks. Di Gili Labak, pendekatan ini berhasil menghasilkan model estimasi volume karang dengan nilai koefisien determinasi (R^2) lebih dari 0,88 serta nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang relatif rendah, yang menunjukkan tingkat presisi yang tinggi dalam pengukuran (Irawan & Muhsoni, 2023).

Meskipun memiliki keunggulan dalam aspek detail struktural, data 3D juga memiliki keterbatasan yang signifikan, terutama dalam hal cakupan area yang relatif kecil serta kebutuhan sumber daya yang tinggi dalam proses akuisisi dan pengolahan data. Akuisisi data 3D memerlukan pengambilan foto dengan overlap tinggi, kondisi perairan yang jernih, serta keterampilan teknis penyelam. Selain itu, proses rekonstruksi model 3D membutuhkan komputasi yang intensif dan waktu yang relatif lama (Westoby et al., 2012). Oleh karena itu, penggunaan data 3D secara mandiri kurang efisien untuk pemetaan skala luas.

Dalam konteks tersebut, integrasi antara data 2D dan 3D menjadi solusi yang sangat relevan. Secara konseptual, integrasi ini dilakukan dengan menggabungkan keunggulan masing-masing jenis data, di mana data 2D digunakan untuk memberikan gambaran distribusi spasial pada skala luas, sementara data 3D digunakan untuk memberikan informasi detail pada skala mikro. Pendekatan ini memungkinkan analisis ekosistem terumbu karang secara holistik, yang mencakup aspek spasial, struktural, dan fungsional.

Secara teknis, integrasi data 2D dan 3D umumnya dilakukan melalui pendekatan geospasial dengan menggunakan sistem informasi geografis (GIS). Model 3D yang dihasilkan dari fotogrametri terlebih dahulu di-georeferensi menggunakan titik kontrol tanah (Ground Control Points/GCP) atau data GPS, sehingga memiliki sistem koordinat yang sama dengan citra drone atau satelit. Dengan demikian, kedua jenis data dapat

digabungkan dalam satu kerangka analisis yang terpadu (Phinn et al., 2012). Integrasi ini memungkinkan overlay antara peta tutupan benthik (2D) dengan model struktur habitat (3D), sehingga menghasilkan informasi yang lebih komprehensif.

Lebih lanjut, integrasi 2D dan 3D juga membuka peluang dalam pengembangan model prediktif yang lebih akurat. Misalnya, data tutupan karang (2D) dapat dikombinasikan dengan data volume dan kompleksitas struktur (3D) untuk mengestimasi biomassa dan stok karbon dalam ekosistem terumbu karang. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *blue carbon*, di mana ekosistem pesisir berperan dalam penyimpanan karbon dan mitigasi perubahan iklim (Ferrario et al., 2014). Selain itu, integrasi ini juga memungkinkan analisis perubahan ekosistem secara temporal, di mana data 2D digunakan untuk memantau perubahan tutupan, sementara data 3D digunakan untuk mengidentifikasi perubahan struktur fisik akibat gangguan seperti pemutihan karang, sedimentasi, atau aktivitas antropogenik.

Dalam praktiknya, integrasi data 2D dan 3D juga melibatkan metode konvensional seperti *Line Intercept Transect* (LIT) dan *Underwater Photo Transect* (UPT) sebagai sumber data validasi lapangan (*ground truthing*). Data in situ ini sangat penting untuk memastikan bahwa hasil klasifikasi dari citra drone maupun model 3D memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Menurut Hill & Wilkinson (2004) validasi lapangan merupakan komponen kunci dalam monitoring terumbu karang,

karena memberikan data referensi yang dapat digunakan untuk kalibrasi dan evaluasi hasil analisis.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, integrasi data 2D dan 3D juga menghadapi beberapa tantangan. Salah satu tantangan utama adalah perbedaan resolusi dan skala data, yang memerlukan proses harmonisasi agar data dapat dibandingkan secara konsisten. Selain itu, kompleksitas dalam pengolahan data multi-sumber serta kebutuhan sumber daya komputasi yang tinggi menjadi kendala dalam implementasi pendekatan ini. Faktor lain yang juga memengaruhi adalah kualitas data akuisisi, seperti kondisi kekeruhan air, pencahayaan, dan tingkat overlap foto, yang dapat memengaruhi akurasi hasil rekonstruksi dan klasifikasi (Hedley et al., 2016).

Dengan demikian, integrasi data 2D dan 3D merupakan pendekatan yang sangat penting dalam pemetaan dan monitoring ekosistem terumbu karang modern. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan akurasi dan detail informasi yang diperoleh, tetapi juga memperluas cakupan analisis yang dapat dilakukan. Dalam konteks pengelolaan dan konservasi, integrasi ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengambilan keputusan berbasis data, sehingga mendukung upaya pelestarian ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan. Visualisasi integrasi data 2D dan 3D untuk pemetaan terumbu karang dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Integrasi Data 2D dan 3D untuk Pemetaan Terumbu Karang

➤ **Perbandingan Metode Konvensional dan Teknologi Modern**

Perbandingan antara metode konvensional dan teknologi modern dalam pemantauan terumbu karang menunjukkan adanya transformasi mendasar dalam pendekatan ilmiah, dari metode observasi langsung berbasis pengalaman lapangan menuju pendekatan berbasis data spasial dan komputasi digital. Perubahan ini tidak hanya dipicu oleh perkembangan teknologi, tetapi juga oleh meningkatnya kebutuhan akan data yang lebih akurat, terstandarisasi, dan mampu menangkap kompleksitas ekosistem terumbu karang secara multidimensional, sebagaimana tercermin dalam integrasi data 2D dan 3D pada sistem monitoring modern.

Metode konvensional seperti *Line Intercept Transect* (LIT) dan *Underwater Photo Transect* (UPT) telah lama menjadi standar dalam monitoring terumbu karang karena sifatnya yang sederhana, ekonomis, dan relatif mudah diterapkan di berbagai kondisi lapangan. LIT, misalnya, bekerja berdasarkan prinsip pengukuran panjang substrat yang berpotongan dengan garis transek untuk menghasilkan estimasi persentase tutupan karang hidup. Metode ini telah distandarisasi secara global dan digunakan secara luas dalam program monitoring seperti Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN) (Hill & Wilkinson, 2004; English et al., 1997). Sementara itu, UPT merupakan pengembangan dari metode observasi langsung dengan memanfaatkan dokumentasi fotografi

bawah air yang memungkinkan analisis ulang dan meningkatkan objektivitas data (Kohler & Gill, 2006).

Meskipun demikian, kedua metode ini memiliki keterbatasan mendasar, terutama dalam hal representasi ruang. Data yang dihasilkan bersifat dua dimensi dan cenderung linear, sehingga tidak mampu menangkap kompleksitas struktur vertikal terumbu karang yang sangat penting dalam menentukan fungsi ekologis habitat. Graham & Nash (2013) menegaskan bahwa kompleksitas struktural merupakan salah satu faktor utama yang menentukan keanekaragaman hayati pada ekosistem terumbu karang. Dengan demikian, keterbatasan metode konvensional dalam menangkap dimensi vertikal menjadi kendala dalam analisis ekologi yang lebih mendalam.

Sebagai respons terhadap keterbatasan tersebut, teknologi modern seperti penginderaan jauh berbasis drone (UAV) dan fotogrametri 3D bawah air berkembang pesat dan menawarkan solusi yang lebih komprehensif. Citra drone memungkinkan pemetaan habitat bentik dengan resolusi sangat tinggi (hingga 2–5 cm/pixel), sehingga mampu mengidentifikasi detail substrat secara spasial pada skala luas (Casella et al., 2017; Hedley et al., 2016). Selain itu, fleksibilitas temporal drone memungkinkan pengambilan data secara berulang untuk memantau perubahan kondisi ekosistem secara dinamis.

Di sisi lain, fotogrametri 3D berbasis *Structure-from-Motion* (SfM) memungkinkan rekonstruksi model tiga dimensi terumbu karang dengan tingkat akurasi tinggi. Burns et al., (2015) menunjukkan bahwa teknik ini

mampu menghasilkan model struktur habitat yang detail, yang dapat digunakan untuk menghitung parameter seperti volume, luas permukaan, dan kompleksitas habitat. Di Gili Labak, metode ini menghasilkan hubungan yang kuat antara model estimasi dan pengukuran aktual, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) lebih dari 0,88 dan error yang relatif rendah, yang menunjukkan keandalan metode dalam analisis kuantitatif (Irawan & Muhsoni, 2023).

Namun demikian, teknologi modern tidak sepenuhnya bebas dari keterbatasan. Penggunaan drone dan fotogrametri 3D memerlukan biaya awal yang lebih tinggi, baik untuk pengadaan peralatan maupun perangkat lunak. Selain itu, proses pengolahan data relatif kompleks dan membutuhkan sumber daya komputasi yang besar. Faktor lingkungan seperti kekeruhan air, kondisi gelombang, dan pencahayaan juga dapat memengaruhi kualitas data yang diperoleh (Piñeros et al., 2024; Westoby et al., 2012).

Oleh karena itu, pendekatan yang paling efektif dalam monitoring terumbu karang saat ini adalah pendekatan integratif yang menggabungkan metode konvensional dan teknologi modern. Dalam pendekatan ini, metode konvensional seperti LIT dan UPT tetap digunakan sebagai sumber data validasi lapangan (*ground truthing*), sementara teknologi modern digunakan untuk memperluas cakupan analisis dan meningkatkan akurasi data. Integrasi ini memungkinkan penggabungan informasi spasial (2D) dan struktural (3D), sehingga menghasilkan pemahaman ekosistem yang

lebih komprehensif dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Untuk memperjelas perbandingan antara kedua pendekatan tersebut, berikut disajikan tabel komparatif yang merangkum karakteristik utama masing-masing metode:

Tabel 1. Perbandingan Metode Konvensional dan Teknologi Modern dalam Monitoring Terumbu Karang

Aspek	Metode Konvensional (LIT & UPT)	Teknologi Modern (Drone & Fotogrametri 3D)
Prinsip dasar	Observasi langsung & pengukuran linear	Penginderaan jauh & rekonstruksi digital
Jenis data	Data 2D (linear & visual)	Data 2D (spasial) + 3D (struktur)
Resolusi spasial	Rendah–sedang (terbatas pada transek)	Tinggi (cm-level untuk UAV)
Cakupan area	Terbatas (lokal)	Luas (drone) hingga regional (satelit)
Informasi struktural	Tidak tersedia	Tersedia (volume, rugositas, kompleksitas)
Akurasi	Bergantung pada pengamat	Tinggi dan konsisten (berbasis digital)
Bias pengamat	Tinggi (subjektif)	Rendah (analisis berbasis software)
Efisiensi lapangan	Cepat di lapangan	Lebih lama (akuisisi + processing)

Aspek	Metode Konvensional (LIT & UPT)	Teknologi Modern (Drone & Fotogrametri 3D)
Analisis ulang data	Terbatas	Sangat fleksibel (data tersimpan digital)
Kebutuhan peralatan	Sederhana dan murah	Relatif mahal dan kompleks
Kebutuhan komputasi	Rendah	Tinggi (SfM, GIS, klasifikasi)
Monitoring temporal	Sulit dilakukan secara rutin	Sangat memungkinkan (multi-temporal UAV)
Peran utama	Ground truthing & baseline data	Analisis spasial & struktural komprehensif

Metode konvensional unggul dalam kesederhanaan dan efisiensi lapangan, sementara teknologi modern unggul dalam akurasi, resolusi, dan kemampuan analisis yang lebih luas dan mendalam. Oleh karena itu, integrasi kedua pendekatan ini menjadi strategi yang paling efektif dalam menghadapi tantangan monitoring terumbu karang di era perubahan lingkungan global.

Pendekatan integratif ini tidak hanya meningkatkan kualitas data yang diperoleh, tetapi juga memperluas dimensi analisis yang dapat dilakukan, mulai dari distribusi spasial hingga kompleksitas struktural dan dinamika temporal. Dengan demikian, integrasi metode konvensional dan teknologi modern merupakan fondasi penting dalam pengembangan sistem monitoring terumbu karang yang berkelanjutan dan berbasis ilmu pengetahuan.

BAGIAN V

PEMODELAN KUANTITATIF TERUMBU KARANG

BAB VIII

Model Estimasi Volume dan Berat Karang

➤ Konsep Morfometri Karang

Konsep morfometri karang merupakan salah satu pendekatan fundamental dalam kajian ekologi terumbu karang modern, yang bertujuan untuk menghubungkan karakteristik bentuk fisik koloni karang dengan parameter kuantitatif seperti volume, luas permukaan, biomassa, serta kompleksitas struktural habitat. Morfometri tidak hanya terbatas pada pengukuran dimensi geometris, tetapi juga mencerminkan interaksi antara faktor biologis, fisiologis, dan lingkungan yang memengaruhi strategi pertumbuhan serta fungsi ekologis karang dalam ekosistem laut tropis.

Terumbu karang secara alami merupakan struktur tiga dimensi (3D) yang sangat kompleks dan heterogen, dibentuk oleh koloni karang scleractinian yang mensekresikan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai kerangka utama. Proses pembentukan ini berlangsung dalam jangka waktu panjang, mulai dari ratusan hingga ribuan tahun, melalui akumulasi pertumbuhan vertikal dan horizontal yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas cahaya, arus laut, sedimentasi, serta

kondisi kimia perairan. Struktur tiga dimensi ini tidak hanya berfungsi sebagai substrat fisik, tetapi juga sebagai habitat yang mendukung keanekaragaman hayati yang tinggi (Graham et al., 2006).

Dalam perspektif ekologi, kompleksitas morfologi karang memiliki hubungan langsung dengan fungsi ekosistem. Koloni karang yang memiliki struktur bercabang, rongga, dan relief permukaan yang tinggi cenderung menyediakan lebih banyak ruang bagi organisme lain, seperti ikan karang, invertebrata, dan mikroorganisme. Hal ini menjadikan parameter morfometri sebagai indikator penting dalam menilai kualitas habitat serta kesehatan ekosistem terumbu karang.

Namun demikian, pendekatan tradisional dalam analisis morfometri karang masih didominasi oleh metode dua dimensi (2D), seperti pengukuran persentase tutupan karang menggunakan metode *Line Intercept Transect* (LIT). Metode ini hanya mampu menggambarkan distribusi horizontal substrat benthik tanpa mempertimbangkan dimensi vertikal. Padahal, struktur vertikal memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan kapasitas habitat, perlindungan organisme, serta produktivitas ekosistem. Keterbatasan ini menyebabkan potensi bias dalam interpretasi kondisi ekosistem, terutama dalam analisis yang membutuhkan informasi struktural yang lebih kompleks.

Seiring dengan perkembangan teknologi, pendekatan morfometri berbasis fotogrametri tiga dimensi (3D) menjadi solusi inovatif yang mampu

mengatasi keterbatasan metode konvensional. Teknik ini memungkinkan rekonstruksi model digital karang secara realistis melalui serangkaian citra yang diambil dari berbagai sudut pandang. Model 3D yang dihasilkan tidak hanya merepresentasikan bentuk koloni secara visual, tetapi juga memungkinkan pengukuran parameter kuantitatif seperti volume, luas permukaan, dan kompleksitas habitat secara akurat dan non-destruktif.

Metode fotogrametri 3D mampu menghasilkan estimasi volume dan biomassa karang dengan tingkat akurasi yang tinggi. Dalam studi di Gili Labak, model berbasis 3D menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) lebih dari 0,88 dengan tingkat kesalahan (RMSE) yang relatif rendah, sehingga dapat digunakan sebagai pendekatan kuantitatif yang andal dalam analisis ekosistem. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan morfometri modern tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga analitis dan prediktif.

Dari sisi biologis, variasi morfologi karang sangat dipengaruhi oleh faktor genetik serta adaptasi terhadap lingkungan. Genus *Acropora*, misalnya, dikenal memiliki struktur bercabang (*branching*) yang kompleks dengan luas permukaan yang besar, sehingga lebih efisien dalam proses fotosintesis *zooxanthellae*. Sebaliknya, genus *Porites* memiliki bentuk masif (*massive*) yang lebih padat dan stabil terhadap gangguan fisik seperti gelombang dan arus kuat. Perbedaan morfologi ini berimplikasi langsung terhadap nilai volume, berat, serta kepadatan skeletal karang, yang menjadi variabel penting dalam

pengembangan model estimasi biomassa dan karbon biru.

Selain itu, morfometri karang juga berkaitan erat dengan strategi pertumbuhan dan ketahanan terhadap gangguan lingkungan. Karang bercabang cenderung memiliki pertumbuhan cepat namun lebih rentan terhadap kerusakan, sedangkan karang masif memiliki pertumbuhan lebih lambat tetapi lebih tahan terhadap stres lingkungan. Oleh karena itu, analisis morfometri tidak hanya memberikan informasi tentang struktur fisik, tetapi juga dinamika ekologis dan resiliensi ekosistem.

Integrasi antara pendekatan morfometri dengan teknologi seperti drone (UAV), fotogrametri 3D, serta analisis spasial berbasis GIS semakin memperluas cakupan analisis. Data morfometri dapat digunakan untuk:

- a. Estimasi volume dan biomassa karang
- b. Analisis kompleksitas habitat (*rugositas*)
- c. Pemodelan stok karbon ekosistem
- d. Monitoring perubahan struktur terumbu dari waktu ke waktu

Dengan demikian, konsep morfometri karang tidak hanya menjadi alat analisis struktur, tetapi juga menjadi dasar dalam pengambilan keputusan berbasis data untuk pengelolaan dan konservasi ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan. Visualisasi konsep morfometri karang dapat dilihat pada Gambar 24.



4. ALUR INTEGRASI DATA 2D DAN 3D

1 Akuisisi Data

2 Pra-Pemrosesan

- Koreksi geometrik
- Koreksi radiometrik
- Filtering & cleaning

3 Pembuatan Produk

2D

Peta tutupan bentuk

3D

Model 3D terumbu

4 Integrasi di GIS

5 Analisis

6 Validasi

- LIT
- UPT

7 Output Akhir

✓ Pendekatan morfometri berbasis fotogrametri 3D meningkatkan akurasi, efisiensi, dan keberlanjutan dalam penelitian serta pengelolaan ekosistem terumbu karang.

Gambar 24. Konsep Morfometri Karang

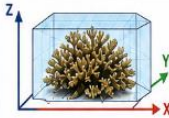
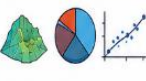
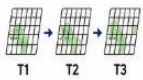
Tabel 2. Perbandingan Pendekatan Morfometri Karang

Aspek	Metode Konvensional (2D)	Fotogrametri 3D
Dimensi analisis	2D (horizontal)	3D (horizontal + vertikal)
Parameter utama	Tutupan (%)	Volume, luas permukaan, kompleksitas
Akurasi struktural	Rendah	Tinggi
Representasi habitat	Terbatas	Komprehensif
Dampak terhadap objek	Non-destruktif	Non-destruktif
Kebutuhan teknologi	Rendah	Tinggi
Potensi analisis lanjut	Terbatas	Sangat luas
Kemampuan monitoring	Baik	Sangat baik (multi-temporal & struktural)

Visualisasi perbandingan pendekatan morfologi karang lihat Gambar 25.

PERBANDINGAN PENDEKATAN MORFOMETRI KARANG

Perbandingan antara metode konvensional 2D dan fotogrametri 3D dalam pengukuran morfologi dan struktur terumbu karang

ASPEK	METODE KONVENSIONAL (2D)	FOTOGRAMETRI 3D
 Dimensi analisis	 2D (horizontal) Hanya menangkap informasi pada bidang datar	 3D (horizontal + vertikal) Menangkap informasi struktur secara vertikal dan horizontal
 Parameter utama	 Tutupan (%) Mengukur persentase tutupan karang hidup dan substrat lainnya	 Volume, luas permukaan, kompleksitas Menghasilkan data kuantitatif struktur 3D (volume, luas permukaan, rugositas/kompleksitas)
 Akurasi struktural	 Rendah Tidak mampu menangkap kerumitan struktur vertikal dan rongga	 Tinggi Merepresentasikan struktur nyata termasuk cabang, rongga, dan relief permukaan
 Representasi habitat	 Terbatas Hanya menggambarkan sebaran horizontal tanpa informasi kedalaman struktur	 Komprehensif Menggambarkan struktur habitat secara utuh, termasuk relief dan kompleksitas tiga dimensi
 Dampak terhadap objek	 Non-destruktif Tidak merusak karang saat pengukuran	 Non-destruktif Tidak merusak karang saat pengukuran
 Kebutuhan teknologi	 Rendah Peralatan sederhana, biaya relatif murah, mudah digunakan	 Tinggi Peralatan khusus (kamera bawah air), perangkat komputasi, perangkat lunak, dan keahlian analisis 3D
 Potensi analisis lanjut	 Terbatas Analisis lanjutan terbatas pada persentase tutupan dan perbandingan sederhana	 Sangat luas Dapat digunakan untuk estimasi biomassa, karbon, kompleksitas habitat, perubahan temporal, dan pemodelan ekosistem
 Kemampuan monitoring	 Baik Dapat digunakan untuk monitoring perubahan dari waktu ke waktu	 Sangat baik Mampu monitoring multi-temporal dengan detail struktural dan analisis perubahan 3D secara akurat

KESIMPULAN

Fotogrametri 3D memberikan representasi yang lebih akurat dan komprehensif terhadap struktur terumbu karang dibandingkan metode konvensional 2D, sehingga sangat mendukung penelitian, monitoring, dan pengelolaan ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan.

Gambar 25. Perbandingan Pendekatan Morfologi Karang

➤ Model Regresi Volume dan Berat

Model estimasi volume dan berat karang merupakan salah satu pendekatan kuantitatif yang sangat penting dalam kajian ekologi terumbu karang modern, terutama dalam konteks pengukuran biomassa, produktivitas, serta stok karbon ekosistem. Pengembangan model ini umumnya didasarkan pada pendekatan regresi matematis yang menghubungkan variabel hasil rekonstruksi digital khususnya dari fotogrametri tiga dimensi (3D) dengan nilai referensi yang diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan. Pendekatan ini memungkinkan estimasi parameter biologis dilakukan secara tidak langsung (*non-destructive*), sehingga sangat relevan dalam upaya konservasi dan monitoring jangka panjang ekosistem terumbu karang.

Dalam praktiknya, estimasi volume karang berbasis fotogrametri 3D diperoleh dari model mesh yang dihasilkan melalui proses rekonstruksi *Structure-from-Motion* (SfM). Model ini merepresentasikan permukaan koloni karang secara detail dalam ruang tiga dimensi, sehingga memungkinkan perhitungan volume secara numerik menggunakan algoritma komputasi. Nilai volume hasil model ini kemudian dikalibrasi menggunakan metode referensi, seperti prinsip Archimedes (*water displacement method*), yang selama ini dianggap sebagai standar dalam pengukuran volume objek biologis. Proses kalibrasi ini menjadi kunci dalam pengembangan model regresi yang akurat dan dapat diandalkan.

Salah satu bentuk model regresi yang paling umum digunakan adalah regresi linear, yang mengasumsikan hubungan linier antara volume hasil model 3D (variabel independen) dengan volume aktual (variabel dependen). Sebagai contoh, di Pulau Gili Labak menghasilkan model regresi linear dengan persamaan:

$$y = 0.4835x + 103.34$$

Dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.9039$ dan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 269 cm³. Nilai R^2 yang tinggi menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menjelaskan variabilitas data, sehingga hubungan antara hasil rekonstruksi 3D dan volume aktual dapat dianggap kuat dan signifikan secara statistik.

Namun demikian, dalam banyak kasus biologis, hubungan antara volume dan berat karang tidak selalu bersifat linear. Hal ini disebabkan oleh variasi kepadatan skeletal, porositas, serta struktur internal koloni karang yang berbeda antar spesies maupun genus. Oleh karena itu, model regresi non-linear, khususnya model pangkat (power regression), sering digunakan untuk meningkatkan akurasi estimasi berat karang. Contoh model yang digunakan adalah:

$$y = 2.4512x^{0.898}$$

Model ini menunjukkan bahwa hubungan antara volume dan berat mengikuti pola alometrik, di mana perubahan volume tidak selalu berbanding lurus dengan

perubahan massa. Pendekatan ini dianggap lebih representatif secara biologis karena mampu mengakomodasi variasi struktur internal karang, terutama pada genus dengan morfologi kompleks seperti *Acropora*.

Selain model linear dan pangkat, pendekatan lain yang digunakan dalam estimasi berat karang adalah model geometrik dan regresi polinomial. Model geometrik biasanya didasarkan pada asumsi bentuk ideal (misalnya silinder atau bola), namun pendekatan ini sering kali kurang akurat karena tidak mampu menangkap kompleksitas morfologi alami karang. Sementara itu, model polinomial memberikan fleksibilitas dalam menyesuaikan pola hubungan data, namun berpotensi mengalami overfitting jika tidak dikalibrasi dengan baik. Studi menunjukkan bahwa dibandingkan model lainnya, model pangkat (*power regression*) cenderung memberikan estimasi yang paling mendekati nilai aktual karena lebih sesuai dengan karakteristik biologis pertumbuhan karang.

Dalam konteks ekologi, model regresi volume dan berat karang memiliki implikasi yang sangat luas. Estimasi volume dapat digunakan untuk menghitung luas permukaan habitat, kompleksitas struktural, serta kapasitas ruang bagi organisme lain. Sementara itu, estimasi berat karang berkaitan langsung dengan biomassa dan stok karbon biru, yang menjadi indikator penting dalam studi perubahan iklim dan konservasi ekosistem laut.

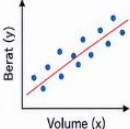
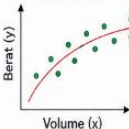
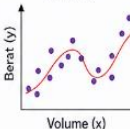
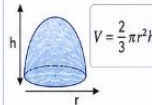
Namun demikian, akurasi model regresi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor kunci, antara lain:

- a. Kompleksitas morfologi karang, di mana struktur bercabang atau berongga dapat menyebabkan variasi signifikan dalam estimasi volume
- b. Kualitas model 3D, termasuk resolusi citra, tingkat overlap, serta akurasi rekonstruksi
- c. Jumlah dan distribusi sampel kalibrasi, yang menentukan representativitas model
- d. Metode pengukuran referensi, seperti akurasi metode Archimedes dalam menentukan volume aktual

Oleh karena itu, pengembangan model regresi yang robust memerlukan kombinasi antara desain sampling yang baik, kualitas data akuisisi yang tinggi, serta metode analisis yang tepat. Visualisasi perbandingan model regresi volume dan berat karang dapat dilihat pada Gambar 26.

TABEL 3. PERBANDINGAN MODEL REGRESI VOLUME DAN BERAT KARANG

Perbandingan karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan empat pendekatan model regresi yang digunakan untuk estimasi volume dan berat karang berbasis data fotogrametri 3D.

ASPEK	REGRESI LINEAR	REGRESI PANGKAT (POWER)	REGRESI POLINOMIAL	MODEL GEOMETRIK
Bentuk hubungan	Linear 	Non-linear (alometrik) 	Non-linear fleksibel 	Berdasarkan bentuk ideal 
Akurasi	 Tinggi (terbatas kondisi)	 Sangat tinggi	 Tinggi (berisiko overfit)	 Rendah-sedang
Kesesuaian biologis	 Sedang	 Tinggi	 Tinggi	 Rendah
Sensitivitas terhadap morfologi	 Rendah	 Tinggi	 Tinggi	 Rendah
Kebutuhan data kalibrasi	 Sedang (jumlah sedang)	 Tinggi (jumlah banyak)	 Tinggi (jumlah banyak)	 Rendah (jumlah sedikit)
Aplikasi utama	 Estimasi volume	 Estimasi berat/biomassa	 Model kompleks	 Estimasi kasar
Keunggulan	 • Sederhana • Mudah digunakan	 • Representatif biologis • Menggambarkan hubungan alometrik (volume-berat) dengan baik	 • Fleksibel • Dapat menyesuaikan pola hubungan kompleks	 • Cepat • Praktis • Tidak memerlukan data banyak
Keterbatasan	 Tidak menangkap variasi non-linear	 Lebih kompleks, perlu data kalibrasi yang cukup banyak	 Risiko overfitting jika orde polinomial terlalu tinggi	 Tidak realistis untuk struktur karang yang kompleks



Catatan: Pemilihan model regresi bergantung pada tujuan analisis, kompleksitas morfologi karang, kualitas data 3D, serta jumlah data kalibrasi yang tersedia.

● Linear ● Power ● Polinomial
● Geometrik

Gambar 26. Perbandingan Model regresi Volume dan Berat Karang

Tabel 3. Tabel Perbandingan Model Regresi Volume dan Berat Karang

Aspek	Regresi Linear	Regresi Pangkat (Power)	Regresi Polinomial	Model Geometrik
Bentuk hubungan	Linear	Non-linear (alometrik)	Non-linear fleksibel	Berdasarkan bentuk ideal
Akurasi	Tinggi (terbatas kondisi)	Sangat tinggi	Tinggi (berisiko overfit)	Rendah–sedang
Kesesuaian biologis	Sedang	Tinggi	Tinggi	Rendah
Sensitivitas terhadap morfologi	Rendah	Tinggi	Tinggi	Rendah
Kebutuhan data kalibrasi	Sedang	Tinggi	Tinggi	Rendah
Aplikasi utama	Estimasi volume	Estimasi berat/biomassa	Model kompleks	Estimasi kasar
Keunggulan	Sederhana, mudah digunakan	Representatif biologis	Fleksibel	Cepat dan praktis
Keterbatasan	Tidak menangkap variasi non-linear	Lebih kompleks	Risiko overfitting	Tidak realistis

➤ **Validasi Akurasi (RMSE dan *Error Spasial*)**

Validasi akurasi merupakan tahap yang sangat krusial dalam pengembangan dan penerapan model estimasi volume dan berat karang, khususnya dalam pendekatan berbasis fotogrametri tiga dimensi (3D). Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa model yang dihasilkan tidak hanya memiliki ketepatan matematis, tetapi juga mampu merepresentasikan kondisi biologis dan struktural terumbu karang secara realistis. Dalam konteks ini, evaluasi akurasi umumnya dilakukan melalui pendekatan kuantitatif dengan menggunakan parameter statistik seperti *Root Mean Square Error* (RMSE), serta analisis distribusi kesalahan secara spasial (*spatial error analysis*). Kedua parameter ini saling melengkapi dalam memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa model estimasi (Burns et al., 2015; Casella et al., 2017).

***Root Mean Square Error* (RMSE)**

RMSE merupakan salah satu ukuran statistik yang paling umum digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan antara nilai hasil estimasi model dengan nilai referensi yang diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan. Secara matematis, RMSE didefinisikan sebagai akar dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai prediksi dan nilai observasi, sehingga memberikan ukuran kesalahan dalam satuan yang sama dengan variabel yang diukur.

Dalam studi fotogrametri terumbu karang, RMSE digunakan untuk mengevaluasi akurasi estimasi volume maupun berat (biomassa) karang yang diperoleh dari model 3D dibandingkan dengan metode konvensional

seperti prinsip Archimedes atau penimbangan langsung. Nilai RMSE yang rendah menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap data referensi, sehingga dapat dianggap reliabel untuk analisis lebih lanjut (Ferrari et al., 2016).

Metode fotogrametri 3D mampu menghasilkan nilai RMSE yang relatif rendah. Sebagai contoh, studi di ekosistem terumbu karang tropis menunjukkan bahwa RMSE volume berada pada kisaran $\pm 269 \text{ cm}^3$ atau sekitar 21,5% dari nilai aktual, sementara RMSE biomassa berkisar antara 17,7% hingga 23,9% (Muhsoni et al., 2026). Nilai ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat deviasi, tingkat akurasi yang dihasilkan masih dalam batas yang dapat diterima untuk studi ekologi, terutama mengingat metode ini bersifat non-destruktif.

Lebih lanjut, hubungan antara nilai RMSE dan kompleksitas morfologi karang juga menjadi aspek penting. Karang dengan struktur sederhana seperti *Porites* cenderung memiliki nilai RMSE yang lebih rendah dibandingkan karang bercabang kompleks seperti *Acropora*, karena tingkat kesulitan dalam rekonstruksi model meningkat seiring kompleksitas struktur (Ferrari et al., 2016).

Berikut adalah rumus *Root Mean Square Error* (RMSE) yang digunakan untuk mengukur rata-rata kesalahan antara nilai prediksi (estimasi) dan nilai observasi (referensi):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Penjelasan:

- a. y_i = nilai observasi (data referensi/aktual)
- b. $\hat{y}_i$ = nilai prediksi (hasil model)
- c. n = jumlah data
- d. $(y_i - \hat{y}_i)$ = selisih (error) antara nilai aktual dan prediksi

RMSE mengukur seberapa besar rata-rata kesalahan model dalam satuan yang sama dengan data aslinya. Semakin kecil nilai RMSE, maka semakin baik akurasi model tersebut.

Analisis Error Spasial

Selain RMSE, evaluasi akurasi juga perlu mempertimbangkan distribusi kesalahan secara spasial. Error spasial tidak hanya menunjukkan besarnya kesalahan, tetapi juga bagaimana kesalahan tersebut tersebar dalam model 3D. Hal ini penting karena distribusi kesalahan yang tidak merata dapat memengaruhi interpretasi hasil, terutama dalam analisis struktural seperti kompleksitas habitat atau estimasi volume lokal.

Dalam konteks fotogrametri bawah air, error spasial dapat muncul akibat berbagai faktor, baik yang bersifat teknis maupun lingkungan. Beberapa sumber utama error spasial meliputi:

- a. Distorsi optik akibat pembiasan cahaya pada media air, yang menyebabkan perubahan geometri citra (Jordt-Sedlazeck & Reinhard Koch, 2013).
- b. Ketidaktepatan dalam proses *image alignment*, terutama jika jumlah titik kesamaan (*tie points*) terbatas atau distribusinya tidak merata

- c. Variasi pencahayaan dan visibilitas yang menyebabkan perbedaan kualitas citra antar foto
- d. Pergerakan air (arus dan gelombang) yang dapat menyebabkan blur atau ketidakkonsistenan posisi objek
- e. Noise akibat partikel tersuspensi (*turbidity*) yang mengganggu proses identifikasi fitur

Distribusi error spasial biasanya dianalisis menggunakan peta deviasi atau *error heatmap*, yang menunjukkan area dengan tingkat kesalahan tinggi dan rendah. Analisis ini sangat penting untuk mengidentifikasi bagian model yang kurang akurat dan membutuhkan perbaikan dalam proses akuisisi data atau rekonstruksi (Westoby et al., 2012).

Hubungan antara Kualitas Akuisisi Data dan Akurasi Model

Akurasi model fotogrametri sangat bergantung pada kualitas data input. Parameter seperti tingkat overlap antar foto, sudut pengambilan gambar, resolusi kamera, serta kondisi lingkungan memiliki pengaruh langsung terhadap nilai RMSE dan distribusi error spasial. Burns et al. (2015) menegaskan bahwa overlap minimal 70–80% dan variasi sudut pengambilan gambar sangat penting untuk meningkatkan kualitas rekonstruksi 3D.

Selain itu, penggunaan *ground control points* (GCP) atau *scale bars* juga terbukti mampu meningkatkan akurasi geometrik model secara signifikan, terutama dalam konteks analisis kuantitatif seperti estimasi volume dan biomassa (James et al., 2014).

Tabel 4. Perbandingan Parameter Validasi Akurasi

Aspek	RMSE (<i>Root Mean Square Error</i>)	Error Spasial
Definisi	Rata-rata kesalahan numerik antara nilai estimasi dan referensi	Distribusi kesalahan dalam ruang (spasial)
Fungsi utama	Mengukur akurasi global model	Mengidentifikasi lokasi kesalahan
Satuan	Sama dengan variabel (cm ³ , gram, dll.)	Biasanya dalam meter atau visual (<i>heatmap</i>)
Sensitivitas	Tinggi terhadap outlier	Tinggi terhadap distribusi data
Interpretasi	Nilai kecil = akurasi tinggi	Distribusi merata = model stabil
Keterbatasan	Tidak menunjukkan lokasi kesalahan	Tidak selalu menunjukkan besaran kesalahan
Aplikasi	Validasi model regresi volume/berat	Evaluasi kualitas rekonstruksi 3D

Implikasi dalam Studi Ekologi Terumbu Karang

Validasi akurasi tidak hanya memiliki implikasi metodologis, tetapi juga ekologis. Model yang akurat memungkinkan estimasi parameter penting seperti biomassa, stok karbon, dan kompleksitas habitat dengan tingkat kepercayaan yang tinggi. Hal ini sangat penting dalam konteks konservasi dan pengelolaan terumbu karang, terutama dalam menghadapi tekanan perubahan iklim dan aktivitas antropogenik (Graham & Nash, 2013).

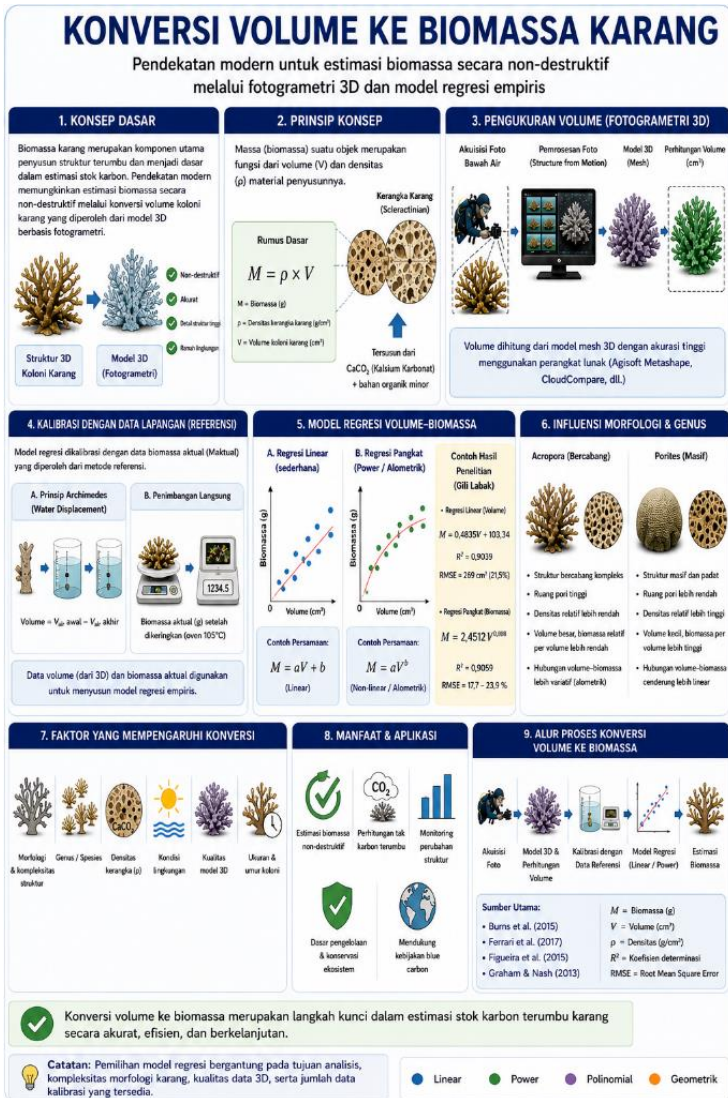
Sebaliknya, model dengan tingkat error yang tinggi dapat menghasilkan estimasi yang bias, yang pada akhirnya dapat mengarah pada keputusan pengelolaan yang kurang tepat. Oleh karena itu, proses validasi harus menjadi bagian integral dari setiap studi berbasis fotogrametri.

BAB IX

Estimasi Stok Karbon Terumbu Karang

➤ Konversi Volume ke Biomassa

Estimasi stok karbon pada ekosistem terumbu karang tidak dapat dilepaskan dari proses kuantifikasi biomassa karang sebagai komponen utama penyusun struktur terumbu. Biomassa karang merupakan representasi dari total massa organisme karang hidup maupun kerangka kalsium karbonatnya, yang berperan penting dalam siklus karbon laut. Dalam pendekatan modern, biomassa karang umumnya di-estimasi melalui konversi dari parameter geometrik, khususnya volume koloni karang yang diperoleh dari hasil rekonstruksi model tiga dimensi (3D) berbasis fotogrametri. Pendekatan ini menjadi semakin penting karena memungkinkan estimasi biomassa secara non-destruktif, sehingga tidak merusak ekosistem yang dikaji serta memungkinkan pengulangan pengukuran dalam studi monitoring jangka panjang (Burns et al., 2015; Ferrari et al., 2016). Visualisasi konversi volume ke biomassa karang dapat dilihat pada Gambar 27.



Gambar 27. Konversi Volume ke Biomassa Karang

Secara konseptual, hubungan antara volume dan biomassa karang didasarkan pada prinsip dasar fisika bahwa massa suatu objek merupakan fungsi dari volume dan densitas material penyusunnya, yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{Biomassa} = \text{Volume} \times \text{Densitas}$$

Pada karang scleractinian, densitas ini dipengaruhi oleh komposisi kalsium karbonat (CaCO_3) yang membentuk kerangka karang serta tingkat porositas internal koloni. Karang dengan struktur padat seperti *Porites* memiliki densitas tinggi, sedangkan karang bercabang seperti *Acropora* memiliki densitas lebih rendah akibat banyaknya ruang antar cabang dan rongga internal (Graham & Nash, 2013). Oleh karena itu, konversi volume ke biomassa tidak dapat dilakukan secara universal, melainkan memerlukan pendekatan empiris yang mempertimbangkan variasi morfologi dan densitas spesifik.

Dalam praktiknya, konversi volume ke biomassa biasanya menggunakan model regresi empiris yang dikalibrasi dengan data lapangan melalui metode referensi seperti prinsip Archimedes (pengukuran volume melalui perpindahan air) atau penimbangan langsung biomassa setelah pengeringan (Figueira et al., 2015). Metode kalibrasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan memiliki akurasi tinggi dan dapat diaplikasikan pada kondisi lapangan yang beragam.

Hubungan antara volume dan biomassa karang dapat dimodelkan menggunakan beberapa pendekatan matematis, baik linear maupun non-linear. Model regresi linear umumnya digunakan untuk estimasi sederhana karena mudah diterapkan dan diinterpretasikan. Namun demikian, dalam banyak kasus biologis, hubungan antara volume dan biomassa bersifat tidak linear (*alometrik*), sehingga model regresi pangkat (*power function*) sering dianggap lebih representatif. Model ini mencerminkan fakta bahwa pertumbuhan organisme tidak selalu proporsional secara linear, terutama pada organisme dengan struktur kompleks seperti karang bercabang (Graham & Nash, 2013).

Sebagai contoh, model regresi yang umum digunakan dalam fotogrametri karang meliputi:

a. Model linear:

$$y = ax + b$$

b. Model pangkat (alometrik):

$$y = ax^b$$

Dimana y merupakan biomassa dan x merupakan volume hasil rekonstruksi 3D. Model pangkat sering memberikan hasil yang lebih akurat karena mampu menangkap hubungan biologis yang kompleks antara ukuran dan massa organisme (Figueira et al., 2015).

Di wilayah tropis seperti Gili Labak menunjukkan bahwa estimasi volume berbasis fotogrametri 3D memiliki hubungan yang sangat kuat dengan biomassa aktual, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) lebih dari 0,88 serta nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang relatif rendah. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan

berbasis model 3D dapat digunakan secara efektif untuk estimasi biomassa karang dalam skala ekosistem, bahkan pada kondisi habitat yang kompleks (Muhsoni et al., 2026).

Selain itu, pendekatan fotogrametri 3D memiliki keunggulan dalam menangkap kompleksitas struktural habitat yang tidak dapat diperoleh melalui metode dua dimensi. Parameter seperti luas permukaan, rugositas, dan volume dapat diukur secara akurat, yang semuanya berkontribusi terhadap estimasi biomassa dan stok karbon. Hal ini menjadi sangat penting dalam konteks ekologi, karena struktur fisik terumbu karang memiliki hubungan langsung dengan keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem (Ferrari et al., 2016).

Namun demikian, konversi volume ke biomassa juga menghadapi sejumlah tantangan. Variasi morfologi antar genus dan spesies karang menyebabkan perbedaan signifikan dalam densitas dan struktur internal. Karang masif seperti *Porites* cenderung memiliki densitas tinggi dan struktur homogen, sementara karang bercabang seperti *Acropora* memiliki struktur kompleks dengan ruang pori yang tinggi. Perbedaan ini berimplikasi langsung terhadap nilai biomassa yang dihasilkan dari volume yang sama. Oleh karena itu, penggunaan faktor konversi spesifik atau model regresi berbasis genus menjadi sangat penting untuk meningkatkan akurasi estimasi.

Selain faktor biologis, kualitas model 3D juga sangat memengaruhi hasil estimasi. Kesalahan dalam proses rekonstruksi, seperti noise pada point cloud atau kesalahan mesh, dapat menyebabkan bias dalam perhitungan volume. Oleh karena itu, validasi model menggunakan parameter seperti RMSE dan error spasial menjadi tahap penting dalam memastikan keandalan hasil estimasi (Burns et al., 2015).

Lebih lanjut, integrasi antara data fotogrametri 3D dengan data penginderaan jauh (drone atau satelit) membuka peluang untuk melakukan estimasi biomassa dan stok karbon pada skala yang lebih luas. Data 3D digunakan untuk kalibrasi parameter struktural, sementara data 2D digunakan untuk ekstrapolasi spasial. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan model spasial stok karbon yang lebih akurat dan komprehensif.

Dengan demikian, konversi volume ke biomassa merupakan langkah fundamental dalam estimasi stok karbon terumbu karang. Pendekatan berbasis fotogrametri 3D memberikan solusi yang akurat, efisien, dan non-destruktif dibandingkan metode konvensional. Namun, keberhasilan metode ini sangat bergantung pada kualitas data, model regresi yang digunakan, serta pemahaman terhadap variasi morfologi karang. Oleh karena itu, integrasi antara pendekatan empiris, teknologi modern, dan data lapangan menjadi kunci dalam menghasilkan estimasi biomassa dan karbon yang akurat dan dapat diandalkan.

➤ Konsep *Blue carbon* dalam Ekosistem Terumbu Karang

Konsep *blue carbon* merujuk pada karbon yang diserap, disimpan, dan dikelola dalam ekosistem pesisir dan laut, termasuk mangrove, lamun, dan terumbu karang. Istilah ini pertama kali berkembang dalam konteks mitigasi perubahan iklim, di mana ekosistem pesisir dipandang sebagai penyerap karbon (*carbon sink*) yang sangat efektif dibandingkan dengan ekosistem daratan tertentu. Mangrove dan lamun secara luas diakui sebagai penyimpan karbon organik yang sangat besar dalam sedimen, sedangkan terumbu karang memiliki peran yang lebih kompleks dan sering kali tidak langsung dalam siklus karbon global (Moberg & Folke, 1999; Pendleton et al., 2012). Visualisasi konsep *blue carbon* dapat dilihat pada Gambar 28.

KONSEP BLUE CARBON

Karbon biru yang tersimpan dalam ekosistem pesisir dan laut

1. APA ITU BLUE CARBON?

Blue carbon merujuk pada karbon yang disimpan dalam ekosistem pesisir dan laut, terutama pada mangrove, lamun (seagrass), dan terumbu karang.



Mangrove dan lamun adalah penyimpan karbon biru utama secara global. Namun, terumbu karang memiliki peran penting dalam siklus karbon melalui proses biomineralisasi dan penyimpanan karbon dalam bentuk kalsium karbonat (CaCO_3).

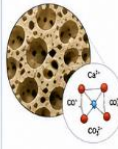
(Moberg & Folke, 1999)

2. BENTUK PENYIMPANAN KARBON PADA TERUMBU KARANG

Karbon pada terumbu karang tersimpan dalam dua bentuk utama:

1. KARBON ANORGANIK

Dalam bentuk CaCO_3 pada kerangka karang



CaCO_3 (Kalsium Karbonat) merupakan bentuk karbon anorganik yang tersimpan jangka panjang dalam struktur terumbu.

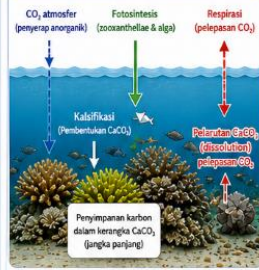
2. KARBON ORGANIK

Dalam jaringan biota dan komunitas terkait



Tersimpan dalam jaringan karang, zooxanthellae, ikan, invertebrata, dan mikroorganisme yang hidup di ekosistem terumbu.

3. SIKLUS KARBON PADA TERUMBU KARANG



Dinamika karbon pada terumbu karang bersifat kompleks karena melibatkan proses penyimpanan karbon melalui kalsifikasi dan fotosintesis, serta pelepasan karbon melalui respirasi dan pelarutan (CaCO_3 dissolution). (Gattuso et al., 1999)

4. PERAN TERUMBU KARANG DALAM BLUE CARBON



Mendukung stabilitas iklim melalui penyimpanan karbon biru.

Peran terumbu karang sering kali dianggap tidak langsung dibandingkan mangrove dan lamun, tetapi tetap signifikan dalam konteks stabilitas ekosistem pesisir dan interaksi antar ekosistem.

5. PENDEKATAN MODERN UNTUK ESTIMASI STOK KARBON

Studi terbaru menggunakan pendekatan integratif yang menggabungkan:



Integrasi data struktur 3D dan distribusi spasial habitat meningkatkan akurasi estimasi stok karbon dengan memasukkan parameter struktural seperti volume dan kompleksitas habitat. (Ferrari et al., 2017)

6. IMPLIKASI DAN MANFAAT

- Mendukung mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon biru.
- Informasi penting untuk perencanaan konservasi dan kebijakan pesisir.
- Mendukung penilaian ekonomi ekosistem dan jasa ekosistem (blue carbon market).
- Monitoring jangka panjang dan evaluasi kesehatan ekosistem terumbu karang.

7. FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KONVERSI

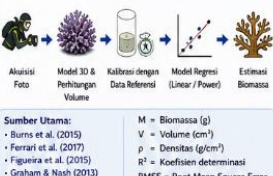


Morfologi & kompleksitas struktur, Genus / Spesies, CaCO_3 kerangka (g), Kondisi lingkungan, Kualitas model 3D, Ukuran & umur koloni.

8. MANFAAT & APLIKASI



9. ALUR PROSES KONVERSI VOLUME KE BIOMASSA



Sumber Utama:
 • Burns et al. (2015)
 • Ferrari et al. (2017)
 • Figueroa et al. (2015)
 • Graham & Nash (2013)

M = Biomassa (g)
 V = Volume (cm^3)
 ρ = Densitas (g/cm^3)
 R^2 = Koefisien determinasi
 RMSE = Root Mean Square Error

RINGKASAN

Konsep blue carbon pada terumbu karang mencakup penyimpanan karbon dalam bentuk anorganik (CaCO_3) dan organik (jaringan biota). Proses kalsifikasi menyimpan karbon jangka panjang, namun dinamika ekosistem juga melibatkan pelepasan karbon melalui respirasi dan pelarutan. Pendekatan modern berbasis data 3D dan drone memungkinkan estimasi stok karbon yang lebih akurat, non-destruktif, dan aplikatif untuk pemantauan berkelanjutan.

- Proses penyimpanan karbon
- Proses pelepasan karbon
- ↔ Pertukaran dengan atmosfer

KETERANGAN:
 CaCO_3 = Kalsium Karbonat
 CO_2 = Karbon Dioksida

Gambar 28. Konsep *Blue carbon*

Dalam konteks terumbu karang, karbon tersimpan dalam dua bentuk utama, yaitu karbon anorganik dan karbon organik. Karbon anorganik tersimpan dalam bentuk kalsium karbonat (CaCO_3) yang membentuk kerangka karang melalui proses biomineralisasi atau kalsifikasi. Proses ini melibatkan pengendapan ion kalsium (Ca^{2+}) dan karbonat (CO_3^{2-}) dari air laut untuk membentuk struktur padat yang menjadi dasar pembentukan terumbu. Di sisi lain, karbon organik tersimpan dalam jaringan hidup karang, *zooxanthellae* (alga simbiotik), serta komunitas organisme lain yang hidup dalam ekosistem terumbu (Allemand et al., 2004; J.-P. Gattuso et al., 1998).

Proses kalsifikasi pada karang memainkan peran penting dalam penyimpanan karbon jangka panjang karena karbon yang terikat dalam CaCO_3 dapat bertahan dalam skala waktu geologis. Namun demikian, proses ini juga memiliki implikasi yang kompleks terhadap siklus karbon global. Secara kimiawi, pembentukan CaCO_3 justru melepaskan karbon dioksida (CO_2) ke dalam kolom air, sehingga terumbu karang dapat berfungsi baik sebagai penyerap maupun sumber karbon tergantung pada kondisi lingkungan (J.-P. Gattuso et al., 1998). Oleh karena itu, kontribusi terumbu karang dalam *blue carbon* tidak dapat disederhanakan hanya sebagai penyerap karbon, melainkan sebagai bagian dari sistem dinamis yang melibatkan pertukaran karbon antara laut dan atmosfer.

Dinamika karbon pada ekosistem terumbu karang dipengaruhi oleh berbagai proses biologis dan fisik, termasuk fotosintesis oleh *zooxanthellae*, respirasi organisme, kalsifikasi, serta pelarutan (*dissolution*) kerangka karang. Fotosintesis berperan dalam menyerap CO₂ dan menghasilkan oksigen, sementara respirasi dan pelarutan dapat melepaskan kembali karbon ke lingkungan. Interaksi antara proses-proses ini menentukan apakah suatu ekosistem terumbu karang berfungsi sebagai *net carbon sink* atau *carbon source* (J.-P. Gattuso et al., 1998; Kleypas et al., 2011).

Meskipun kontribusi langsung terumbu karang terhadap penyimpanan karbon organik relatif lebih kecil dibandingkan mangrove dan lamun, peran ekologisnya tetap sangat signifikan dalam konteks *blue carbon*. Terumbu karang berfungsi sebagai penyedia habitat bagi berbagai organisme laut yang berkontribusi terhadap siklus karbon melalui rantai makanan dan proses biogeokimia. Selain itu, terumbu karang berperan sebagai pelindung pantai yang mengurangi erosi dan menjaga stabilitas sedimen pesisir, yang pada akhirnya mendukung keberlanjutan ekosistem penyimpan karbon lainnya seperti lamun dan mangrove (Moberg & Folke, 1999).

Pendekatan integratif yang menggabungkan data struktur tiga dimensi (3D) dan distribusi spasial habitat telah membuka peluang baru dalam estimasi stok karbon pada terumbu karang. Fotogrametri 3D memungkinkan pengukuran parameter struktural seperti volume, luas permukaan, dan kompleksitas habitat secara akurat dan

non-destruktif. Parameter ini sangat penting karena berkaitan langsung dengan kapasitas penyimpanan biomassa dan karbon (Bryson et al., 2017). Dengan mengintegrasikan data 3D dengan citra drone atau penginderaan jauh, estimasi stok karbon dapat dilakukan pada skala yang lebih luas dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi.

Selain itu, kompleksitas struktural terumbu karang juga memiliki hubungan erat dengan produktivitas ekosistem dan keanekaragaman hayati. Struktur yang kompleks menyediakan lebih banyak ruang hidup dan niche ekologis bagi organisme laut, yang pada gilirannya meningkatkan produksi biomassa dan potensi penyimpanan karbon. Oleh karena itu, parameter morfometri seperti rugositas dan volume menjadi indikator penting dalam analisis *blue carbon* berbasis terumbu karang (Graham & Nash, 2013).

Namun demikian, pendekatan *blue carbon* pada terumbu karang masih menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu tantangan utama adalah kompleksitas proses karbon yang melibatkan interaksi antara komponen organik dan anorganik. Selain itu, variabilitas lingkungan seperti suhu, pH, dan tingkat keasaman laut (*ocean acidification*) dapat mempengaruhi laju kalsifikasi dan stabilitas struktur karang. Kondisi ini menjadi semakin penting dalam konteks perubahan iklim global yang dapat mengganggu keseimbangan siklus karbon pada ekosistem terumbu karang (Kleypas et al., 2011).

Dengan demikian, konsep *blue carbon* pada terumbu karang harus dipahami sebagai sistem yang dinamis dan terintegrasi dengan ekosistem pesisir lainnya. Pendekatan berbasis teknologi modern seperti fotogrametri 3D dan penginderaan jauh memberikan peluang besar untuk meningkatkan akurasi estimasi stok karbon, namun tetap memerlukan integrasi dengan data lapangan dan pemahaman ekologi yang mendalam.

Tabel 5. Perbandingan Peran *Blue carbon* pada Ekosistem Pesisir

Aspek	Mangrove	Lamun	Terumbu Karang
Jenis karbon dominan	Organik (sedimen)	Organik (sedimen)	Anorganik (CaCO_3) + organik
Mekanisme utama	Penimbunan sedimen	Penyerapan karbon & sedimen	Kalsifikasi & biomineralisasi
Kapasitas penyimpanan	Sangat tinggi	Tinggi	Sedang (kompleks)
Peran sebagai carbon sink	Sangat kuat	Kuat	Variabel (sink/source)
Stabilitas jangka panjang	Tinggi	Tinggi	Sangat tinggi (CaCO_3)
Kompleksitas proses karbon	Rendah–sedang	Sedang	Tinggi

Aspek	Mangrove	Lamun	Terumbu Karang
Peran ekologis tambahan	Perlindungan pantai	Habitat & stabilisasi sedimen	Habitat & pelindung pantai
Pendekatan estimasi modern	Sediment core, remote sensing	Remote sensing, biomassa	3D photogrammetry + UAV

Secara keseluruhan, konsep *blue carbon* pada ekosistem terumbu karang mencerminkan peran yang kompleks dan multidimensional dalam siklus karbon global. Meskipun tidak berfungsi sebagai penyerap karbon utama seperti mangrove dan lamun, terumbu karang memiliki kontribusi penting melalui penyimpanan karbon anorganik dalam bentuk CaCO_3 serta perannya dalam menjaga stabilitas ekosistem pesisir. Integrasi teknologi modern seperti fotogrametri 3D dan penginderaan jauh memberikan peluang besar untuk meningkatkan pemahaman dan akurasi estimasi stok karbon pada terumbu karang. Oleh karena itu, pendekatan integratif dan multi-skala menjadi kunci dalam pengembangan dan pengelolaan *blue carbon* di masa depan.

➤ **Metode Estimasi Karbon pada Ekosistem Terumbu Karang**

Estimasi stok karbon pada ekosistem terumbu karang merupakan aspek penting dalam kajian perubahan iklim dan pengelolaan sumber daya pesisir, terutama dalam kerangka *blue carbon*. Berbeda dengan ekosistem mangrove dan lamun yang dominan menyimpan karbon organik dalam sedimen, terumbu karang menyimpan karbon dalam bentuk yang lebih kompleks, yaitu kombinasi antara karbon anorganik dalam bentuk kalsium karbonat (CaCO_3) dan karbon organik dalam jaringan biota serta komunitas terkait (J.-P. Gattuso et al., 1998; Moberg & Folke, 1999). Oleh karena itu, metode estimasi karbon pada terumbu karang memerlukan pendekatan multidisiplin yang mampu mengakomodasi karakteristik struktural dan ekologis yang unik. Visualisasi model estimasi karbon pada terumbu karang dapat dilihat pada Gambar 29.

Secara umum, metode estimasi karbon pada terumbu karang dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama, yaitu pendekatan konvensional dan pendekatan berbasis teknologi modern. Kedua pendekatan ini memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan masing-masing, sehingga sering kali digunakan secara komplementer dalam ekosistem terumbu karang.



Gambar 29. Model Estimasi Karbon Pada Terumbu Karang

Pendekatan konvensional merupakan metode yang telah lama digunakan dalam studi ekologi terumbu karang dan umumnya berbasis pada pengukuran langsung di lapangan. Metode ini melibatkan pengambilan sampel biomassa secara langsung, baik melalui teknik destruktif maupun semi-destruktif, serta estimasi tutupan karang menggunakan metode seperti *Line Intercept Transect* (LIT) dan *Underwater Photo Transect* (UPT). Dalam pendekatan ini, biomassa karang dihitung melalui penimbangan langsung atau menggunakan metode referensi seperti prinsip Archimedes untuk menentukan volume dan massa koloni karang (Figueira et al., 2015).

Selain itu, pendekatan konvensional juga sering menggunakan faktor konversi empiris untuk mengestimasi kandungan karbon dari biomassa yang diukur. Faktor konversi ini biasanya diperoleh dari studi sebelumnya yang menghubungkan biomassa dengan kandungan karbon berdasarkan jenis organisme atau habitat tertentu. Meskipun metode ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi pada skala lokal, pendekatan ini memiliki beberapa keterbatasan utama. Cakupan area yang dapat diamati relatif kecil, sehingga sulit untuk merepresentasikan kondisi ekosistem secara luas. Selain itu, metode destruktif dapat menyebabkan kerusakan pada ekosistem yang sedang dikaji, sehingga kurang sesuai untuk studi jangka panjang dan konservasi.

Seiring dengan perkembangan teknologi, pendekatan berbasis teknologi modern semakin banyak digunakan dalam estimasi stok karbon terumbu karang.

Pendekatan ini memanfaatkan teknologi fotogrametri 3D, penginderaan jauh (remote sensing), serta integrasi data dalam sistem informasi geografis (GIS) untuk menghasilkan estimasi karbon yang lebih komprehensif dan non-destruktif.

Fotogrametri 3D merupakan salah satu metode yang paling inovatif dalam estimasi biomassa karang. Dengan menggunakan teknik *Structure-from-Motion* (SfM), metode ini mampu merekonstruksi model tiga dimensi koloni karang dari serangkaian citra yang diambil dengan overlap tinggi. Model 3D yang dihasilkan memungkinkan pengukuran parameter struktural seperti volume, luas permukaan, dan kompleksitas habitat secara akurat (Burns et al., 2015; Ferrari et al., 2017). Parameter-parameter ini kemudian digunakan untuk mengestimasi biomassa melalui model regresi empiris, yang pada akhirnya dikonversi menjadi estimasi karbon.

Di sisi lain, penginderaan jauh menggunakan drone (UAV) dan satelit memungkinkan pemetaan distribusi habitat terumbu karang pada skala yang lebih luas. Citra drone dengan resolusi tinggi (2–5 cm/pixel) memungkinkan identifikasi detail substrat bentik seperti karang hidup, karang mati, lamun, dan pasir, sementara citra satelit seperti Sentinel-2 memberikan cakupan area yang lebih luas meskipun dengan resolusi yang lebih rendah (Hedley et al., 2016). Integrasi data ini dalam sistem GIS memungkinkan analisis spasial dan temporal yang lebih komprehensif, termasuk pemantauan perubahan tutupan karang dan estimasi stok karbon dalam skala regional.

Pendekatan berbasis teknologi modern memiliki beberapa keunggulan utama, yaitu bersifat non-destruktif, memiliki cakupan area yang luas, serta memungkinkan monitoring jangka panjang dengan resolusi temporal yang tinggi. Namun demikian, pendekatan ini juga memiliki tantangan, seperti kebutuhan akan peralatan dan perangkat lunak yang canggih, kompleksitas pengolahan data, serta ketergantungan pada kondisi lingkungan seperti kekeruhan air dan pencahayaan (Ferrari et al., 2017).

Dalam praktiknya, tidak ada satu metode yang mampu secara sempurna mengestimasi stok karbon pada ekosistem terumbu karang. Oleh karena itu, pendekatan integratif yang menggabungkan metode konvensional dan teknologi modern menjadi strategi yang paling efektif. Metode konvensional digunakan sebagai *ground truth* untuk kalibrasi dan validasi data, sementara metode berbasis teknologi digunakan untuk ekstrapolasi dan analisis skala luas.

Pendekatan integratif ini memungkinkan penggabungan keunggulan masing-masing metode, sehingga menghasilkan estimasi karbon yang lebih akurat, representatif, dan efisien. Hal ini sejalan dengan perkembangan paradigma ekologi modern yang menekankan pentingnya integrasi data multi-skala dan multi-sumber dalam memahami kompleksitas ekosistem (Ferrari et al., 2017).

Tabel 6. Perbandingan Metode Estimasi Karbon

Aspek	Metode Konvensional	Fotogrametri 3D	Drone/UAV
Skala analisis	Lokal	Mikro (detail)	Luas
Parameter utama	Tutupan, biomassa langsung	Volume, kompleksitas	Distribusi habitat
Akurasi	Tinggi (lokal)	Sangat tinggi	Tinggi
Dampak terhadap ekosistem	Destruktif	Non-destruktif	Non-destruktif
Cakupan area	Terbatas	Terbatas	Luas
Kebutuhan teknologi	Rendah	Tinggi	Sedang–tinggi
Kemampuan monitoring	Rendah	Tinggi	Sangat tinggi

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode estimasi karbon pada terumbu karang telah mengalami perkembangan signifikan dari pendekatan konvensional menuju pendekatan berbasis teknologi modern. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan keterbatasan yang saling melengkapi, sehingga pendekatan terbaik dalam estimasi karbon adalah integrasi multi-metode. Kombinasi antara pengukuran lapangan, fotogrametri 3D, dan penginderaan jauh memungkinkan estimasi karbon yang lebih akurat, efisien, dan berkelanjutan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kualitas data, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan berbasis ilmiah

dalam pengelolaan dan konservasi ekosistem terumbu karang di tengah tantangan perubahan iklim global.

➤ **Integrasi Data 3D dan Drone**

Integrasi antara data fotogrametri tiga dimensi (3D) dan citra drone (*Unmanned Aerial Vehicles/UAV*) merupakan salah satu pendekatan multi-skala yang semakin berkembang dalam studi ekosistem terumbu karang modern. Pendekatan ini berangkat dari kesadaran bahwa ekosistem terumbu karang memiliki kompleksitas spasial dan struktural yang tinggi, sehingga tidak dapat direpresentasikan secara optimal hanya dengan satu jenis data atau metode pengamatan. Oleh karena itu, integrasi berbagai sumber data menjadi solusi untuk menghasilkan informasi yang lebih komprehensif, akurat, dan relevan dalam analisis ekologi serta pengelolaan sumber daya pesisir (Casella et al., 2017; Ferrari et al., 2017).

Secara konseptual, integrasi ini menggabungkan dua dimensi utama dalam analisis ekosistem, yaitu dimensi horizontal (2D) dan dimensi vertikal (3D). Citra drone berfungsi sebagai sumber data spasial yang mampu merepresentasikan distribusi habitat bentik secara horizontal dengan resolusi spasial sangat tinggi, umumnya berkisar antara 2–5 cm/pixel tergantung pada ketinggian terbang dan spesifikasi sensor yang digunakan. Resolusi ini memungkinkan identifikasi detail habitat seperti karang hidup, karang mati, lamun, dan substrat lainnya secara presisi dalam skala area yang relatif luas (Joyce et al., 2019; Phinn et al., 2012).

Di sisi lain, fotogrametri 3D bawah air menyediakan informasi yang tidak dapat diperoleh dari citra 2D, yaitu dimensi vertikal dan kompleksitas struktur habitat. Melalui teknik *Structure-from-Motion* (SfM), model 3D yang dihasilkan mampu merekonstruksi bentuk koloni karang secara detail, termasuk parameter morfometri seperti volume, luas permukaan, dan tingkat rugositas. Parameter-parameter ini memiliki peran penting dalam menentukan fungsi ekologis terumbu karang, seperti penyediaan habitat, perlindungan organisme, serta kontribusi terhadap siklus karbon (Burns et al., 2015; Graham & Nash, 2013).

Integrasi kedua jenis data ini memungkinkan analisis ekosistem terumbu karang secara lebih holistik, karena menggabungkan informasi distribusi spasial dengan karakteristik struktural habitat. Hal ini menjadi sangat penting dalam estimasi stok karbon, di mana perhitungan tidak hanya bergantung pada luas tutupan karang, tetapi juga pada volume dan kompleksitas struktur yang memengaruhi biomassa dan kandungan karbon. Dengan demikian, pendekatan integratif ini mampu meningkatkan akurasi estimasi karbon dibandingkan metode berbasis satu dimensi saja (Ferrari et al., 2017; Muhsoni et al., 2026).

Dalam praktiknya, proses integrasi data 2D dan 3D dilakukan melalui beberapa tahapan teknis yang saling berkaitan. Tahap pertama adalah georeferensi model 3D, di mana model hasil fotogrametri disesuaikan ke dalam sistem koordinat geografis yang sama dengan citra drone. Proses ini umumnya menggunakan *Ground*

Control Points (GCP) atau data GPS untuk memastikan kesesuaian posisi spasial. Tahap selanjutnya adalah overlay data dalam sistem informasi geografis (GIS), yang memungkinkan penggabungan berbagai layer informasi dalam satu platform analisis. Melalui GIS, data distribusi habitat dari drone dapat dikombinasikan dengan parameter struktural dari model 3D untuk menghasilkan peta yang lebih informatif dan analitis.

Tahap berikutnya adalah pengembangan model regresi spasial yang menghubungkan parameter 3D (misalnya volume) dengan variabel biologis seperti biomassa dan stok karbon. Model ini biasanya dikalibrasi menggunakan data lapangan (*ground truth*) untuk meningkatkan akurasi prediksi. Pendekatan ini memungkinkan estimasi biomassa dan karbon secara non-destruktif dalam skala yang lebih luas, sehingga sangat mendukung prinsip konservasi berkelanjutan (Beijbom et al., 2015; Figueira et al., 2015).

Pendekatan integratif ini membuka peluang untuk berbagai jenis analisis lanjutan. Salah satunya adalah estimasi stok karbon berbasis kombinasi luas habitat dan volume struktur, yang memberikan gambaran lebih realistis mengenai kapasitas penyimpanan karbon pada terumbu karang. Selain itu, integrasi data multi-temporal memungkinkan analisis perubahan kondisi ekosistem dari waktu ke waktu, seperti dampak pemutihan karang, sedimentasi, atau aktivitas antropogenik. Lebih lanjut, data yang terintegrasi juga dapat digunakan untuk mengembangkan model prediktif berbasis skenario

lingkungan, yang sangat penting dalam perencanaan konservasi dan mitigasi perubahan iklim.

Integrasi data multi-sumber mampu meningkatkan akurasi pemetaan habitat hingga lebih dari 80%, serta menghasilkan estimasi biomassa yang lebih representatif dibandingkan metode tunggal (Beijbom et al., 2015; Casella et al., 2017; Muhsoni et al., 2026). Hal ini menegaskan bahwa pendekatan multi-skala merupakan arah perkembangan utama dalam studi ekosistem terumbu karang modern.

Namun demikian, implementasi integrasi data 3D dan drone juga menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu tantangan utama adalah perbedaan resolusi spasial dan temporal antara kedua jenis data, yang memerlukan proses harmonisasi agar dapat dianalisis secara konsisten. Selain itu, kompleksitas pengolahan data yang melibatkan berbagai tahapan fotogrametri dan analisis GIS membutuhkan keahlian teknis serta sumber daya komputasi yang cukup besar. Faktor lingkungan seperti kekeruhan air, pencahayaan, dan kondisi cuaca juga dapat memengaruhi kualitas data yang diperoleh, sehingga berdampak pada akurasi hasil akhir.

Meskipun demikian, dengan perkembangan teknologi dan peningkatan kapasitas komputasi, tantangan-tantangan tersebut semakin dapat diatasi. Oleh karena itu, pendekatan integratif berbasis data 2D dan 3D ini semakin diakui sebagai masa depan dalam monitoring ekosistem terumbu karang, khususnya dalam konteks estimasi stok karbon dan pengelolaan sumber daya pesisir berbasis data ilmiah. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kualitas informasi yang dihasilkan, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dan berkelanjutan dalam menghadapi tekanan perubahan lingkungan global.

DAFTAR PUSTAKA

- Allemand, D., Ferrier-pagès, C., Furla, P., Houlbrèque, F., & Darwin, C. (2004). Biomineralisation in reef-building corals: from molecular mechanisms to environmental control. *General Palaeontology*, 3, 453–467.
<https://doi.org/10.1016/j.crpv.2004.07.011>
- Alvarez-filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Watkinson, A. R., & Co, I. M. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings The Royal Society*, 276, 3019–3025.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0339>
- Anderson, K., Gaston, K. J., Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). *Frontiers in Ecology and the Environment*. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138–146. <https://doi.org/10.1890/120150>
- Beijbom, O., Edmunds, P. J., Roelfsema, C., Smith, J., Kline, D. I., Neal, B. P., Dunlap, M. J., Moriarty, V., Fan, T. Y., Tan, C. J., Chan, S., Treibitz, T., Gamst, A., Mitchell, B. G., & Kriegman, D. (2015). Towards automated annotation of benthic survey images: Variability of human experts and operational modes of automation. *PLoS ONE*, 10(7), 1–22.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130312>

- Blaschke, T., & Geoffrey, J. (2001). Object-oriented image analysis and scale-space: theory and methods and evaluating multiscale landscape structure. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(Part 4/W5), 22–29.
- Bryson, M., Ferrari, R., Figueira, W., Pizarro, O., Madin, J., Williams, S., & Byrne, M. (2017). Characterization of measurement errors using structure-from-motion and photogrammetry to measure marine habitat structural complexity. *Ecology and Evolution*, 7(15), 5669–5681. <https://doi.org/10.1002/ece3.3127>
- Buckland, S. T., Borchers, D. L., Johnston, A., Henrys, P. A., & Marques, T. A. (2007). Line transect methods for plant surveys. *Biometrics*, 63(4), 989 – 998. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2007.00798.x>
- Burke, L., Reyter, K., Spalding, M., & Perry, A. (2012). *Reefs at Risk Revisited*. World Resources Institute.
- Burns, J. H. R., Delparte, D., Gates, R. D., & Takabayashi, M. (2015). Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ*, 2015(7). <https://doi.org/10.7717/peerj.1077>
- Burns, J. H. R., Delparte, D., Kapon, L., & Belt, M. (2016). Assessing the impact of acute disturbances on the structure and composition of a coral community using innovative 3D reconstruction techniques. *Methods in Oceanography*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.04.001>

- Burns, J. H. R., Fukunaga, A., Pascoe, K., & Craig, B. (2019). 3D Habitat Complexity Of Coral Reefs In The Northwestern Hawaiian Islands Is Driven By Coral Assemblage Structure. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2(W10), 61–67. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-61-2019>
- Casella, E., Collin, A., Harris, D., Ferse, S., Bejarano, S., Parravicini, V., Hench, J. L., & Rovere, A. (2017). Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs*, 36, 269–275. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1522-0>
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Correa, D., Villegas-Sánchez, C. A., Pérez-España, H., & Alvarez-Filip, L. (2024). Reef health status of the southwestern Gulf of Mexico and Mexican Caribbean coral reefs. *Ciencias Marinas*, 50(1). <https://doi.org/10.7773/cm.y2025.3501>
- Cortés, J., & Reyes-Bonilla, H. (2017). Human Influences On Eastern Tropical Pacific Coral Communities and Coral Reefs. *Coral Reefs of the World*, 8, 549 – 563. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_20

- Costanza, R., Groot, R. De, Sutton, P., Ploeg, S. Van Der, Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 2014.
- Crabbe, M. J. C. (2016). The impact of climate change and the environment on coral growth. In *The Cnidaria, past, present and Future: The World of Medusa and her Sisters*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31305-4_35
- David Lyzenga. (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.
- English, S., Wilkinson, C., & Baker, V. (1997). Survey manual for tropical marine resources. In *Australian Institute of Marine Science, Townsville (2nd Edition)*. Australian Institute of Marine Science.
- Eric J Hochberg, Marlin J Atkinson, & Serge Andréfouët. (2003). Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 85(2), 159–173.
- Falkowski, P. G., Dubinsky, Z., Muscatine, L., & Porter, J. W. (1984). Light and the Bioenergetics of a Symbiotic Coral. *BioScience*, 34(11), 705–709. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1309663>

- Ferrari, R., Figueira, W. F., Pratchett, M. S., Boube, T., Adam, A., Kobelkowsky-Vidrio, T., Doo, S. S., Atwood, T. B., & Byrne, M. (2017). 3D photogrammetry quantifies growth and external erosion of individual coral colonies and skeletons. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16408-z>
- Ferrari, R., McKinnon, D., He, H., Smith, R. N., Corke, P., González-Rivero, M., Mumby, P. J., & Upcroft, B. (2016). Quantifying multiscale habitat structural complexity: A cost-effective framework for underwater 3D modelling. *Remote Sensing*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/rs8020113>
- Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Aioldi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5(May), 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Figueira, W., Ferrari, R., Weatherby, E., Porter, A., Hawes, S., & Byrne, M. (2015). Accuracy and Precision of Habitat Structural Complexity Metrics Derived from Underwater Photogrammetry. *Remote Sensing*, 2015(7), 16883–16900. <https://doi.org/10.3390/rs71215859>

- Ford, A. K., Eich, A., McAndrews, R. S., Mangubhai, S., Nuges, M. M., Bejarano, S., Moore, B. R., Rico, C., Wild, C., & Ferse, S. C. A. (2018). Evaluation of coral reef management effectiveness using conventional versus resilience-based metrics. *Ecological Indicators*, 85(September 2017), 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.002>
- Foster, N. L., Box, S. J., & Mumby, P. J. (2008). Competitive effects of macroalgae on the fecundity of the reef-building coral *Montastraea annularis*. *Marine Ecology Progress Series*, 367(Lirman 2001), 143–152. <https://doi.org/10.3354/meps07594>
- Gomez, E. D., & Yap, H. T. (1988). Monitoring reef conditions. Rostsea.
- González-Vera, A. S., Wilting, T. J. S., Holten, A. P. C., van Heijst, G. J. F., & Duran-Matute, M. (2020). High-resolution single-camera photogrammetry: incorporation of refraction at a fluid interface. *Experiments in Fluids*, 61(1). <https://doi.org/10.1007/s00348-019-2826-y>
- Good, A. M., & Bahr, K. D. (2021). The coral conservation crisis: interacting local and global stressors reduce reef resiliency and create challenges for conservation solutions. *SN Applied Sciences*, 3(3). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04319-8>

- Graham, N. A. J., Wilson, S. K., Jennings, S., Polunin, N. V. C., Bijoux, J. P., & Robinson, J. (2006). Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(22), 8425–8429. <https://doi.org/10.1073/pnas.0600693103>
- Green, E. P., Mumby, P. J., Edwards, A. J., & Christopher D. Clark. (2000). *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management* Edmund. UNESCO.
- Green, R. H., & Smith, S. R. (1997). Sample program design and environmental impact assessment on coral reefs. *Proc 8th Int Coral Reef Sym*, 1459–1464.
- Handoko, A., Muhsoni, F. F., & Irawan, D. (2025). Estimation of coral reef area volume and weight using a three dimensions (3D) photogrammetry. *EPJ Web of Conferences*, 01043.
- Hedley, J. D., Roelfsema, C. M., Chollett, I., Harborne, A. R., Heron, S. F., Weeks, S. J., Skirving, W. J., Strong, A. E., Mark Eakin, C., Christensen, T. R. L., Ticzon, V., Bejarano, S., & Mumby, P. J. (2016). Remote sensing of coral reefs for monitoring and management: A review. *Remote Sensing*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/rs8020118>
- Hill, J., & Wilkinson, C. (2004). Methods for ecological monitoring of coral reefs. In *Australian Institute of Marine Science*, Townsville. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Hochberg, E. J., & Marlin J Atkinson. (2003). Capabilities of remote sensors to classify coral, algae, and sand as pure and mixed spectra. *Remote Sensing of Environment*, 85(1), 174–189. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00202-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00202-X)
- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50(8), 839–866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/MF99078>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Dietzel, A., Eakin, C. M., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Liu, G., McWilliam, M. J., Pears, R. J., Pratchett, M. S., Skirving, W. J., Stella, J. S., & Torda, G. (2018). Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature*, 556(7702), 492–496. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2>
- Irawan, D., & Muhsoni, F. F. (2023). *Metode Foto 3D Underwater Untuk Terumbu Karang*. UTM PRESS.
- Irawan, D., & Muhsoni, F. F. (2024). Perbandingan Teknik Pengukuran Terumbu Karang Menggunakan Metode 2 Dimensi Dan 3 Dimensi Di Pulau Gili Labak, Sumenep. *Jurnal Kelautan*, 17(3), 235–242.
- Irawan, D., Mukti, A. T., Andriyono, S., & Muhsoni, F. F. (2023). Assessment of coral reef condition using up (underwater photo transect) method on gili labak island madura indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1273(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1273/1/012062>

- J.-P. Gattuso, M. Frankignoulle, & Wollast, R. (1998). Carbon And Carbonate Metabolism In Coastal Aquatic Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 29, 405–434. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.405>
- James, M. R., Robson, S., Centre, L. E., & Engineering, G. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. 1420(June), 1413–1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>
- Jordt-Sedlazeck, A., & Reinhard Koch. (2013). Refractive Structure-from-Motion on Underwater Images. *EEE International Conference on Computer Vision*.
- Joyce, K. E., Duce, S., Leahy, S. M., Leon, J., & Maier, S. W. (2019). Principles and practice of acquiring drone-based image data in marine environments. *Marine and Freshwater Research*, 70(7), 952–963. <https://doi.org/10.1071/MF17380>
- Kench, P. S., & Owen, S. D. (2015). Coral Reef Systems and the Complexity of Hazards. In *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396483.00015-7>
- Kleypas, J. A., Anthony, K. R. N., & Jean-Pierre Gattuso. (2011). Coral reefs modify their seawater carbon chemistry – case study from a barrier reef (Moorea, French Polynesia). *Global Change Biology*, 1–12. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02530.x>

- Kohler, K. E., & Gill, S. M. (2006). Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Computers and Geosciences*, 32(9), 1259–1269. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.009>
- Lazuardi, W., Wicaksono, P., & M A Marfai. (2021). Remote sensing for coral reef and seagrass cover mapping to support coastal management of small islands Remote sensing for coral reef and seagrass cover mapping to support coastal management of small islands. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/686/1/012031>
- Leujak, W., & Ormond, R. F. G. (2007). Comparative accuracy and efficiency of six coral community survey methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 351(1–2), 168–187. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.028>
- Macedo, T., & van Woesik, R. (2026). Growth rates of coral reefs peaked at 25 °C through the Holocene. *PLOS ONE*, 21(3 March). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0342527>
- Magel, J. M. T., Burns, J. H. R., Gates, R. D., & Baum, J. K. (2019). Effects of bleaching-associated mass coral mortality on reef structural complexity across a gradient of local disturbance. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37713-1>

- Marre, G., Holon, F., Luque, S., Boissery, P., & Deter, J. (2019). Monitoring marine habitats with photogrammetry: A cost-effective, accurate, precise and high-resolution reconstruction method. *Frontiers in Marine Science*, 6(May). <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00276>
- McCord, S. E., Webb, N. P., Van Zee, J. W., Courtright, E. M., Billings, B., Duniway, M. C., Edwards, B. L., Kachergis, E., Moriasi, D., Morra, B., Nafus, A., Newingham, B. A., Scott, D. A., & Toledo, D. (2025). Optimizing sampling across transect-based methods improves the power of agroecological monitoring data. *Journal of Environmental Quality*, 54(3), 706 – 719. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20678>
- Mcfield, M., Kramer, P., & Mcpherson, M. (2007). *Healthy Reefs for Healthy People A Guide to Indicators of Reef Health and Social Well-being in the Mesoamerican Reef Region* Authors Maya Gorrez. Healthy Reefs for Healthy People Initiative.
- McWilliam, M., Anthony, K., Ceccarelli, D. M., Crocker, R., Emslie, M. J., Iwanaga, T., Koenig, K., Ferrari, R., Matthews, S., Heneghan, R., Hoey, A. S., Wilson, S. K., & Pratchett, M. S. (2026). Capturing the dimensions of coral reef biodiversity. *Ecological Indicators*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2026.114866>
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics* 29, 29, 161747.

- Mobley, C. (1994). *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press.
- Muhsoni, F. F., Choiron, M., Hamim, S., Irawan, D., Zainuri, M., & Sofarini, D. (2026). Comparison of line intercept transect method, underwater photo transect , underwater 3D photo , drone , and satellite imagery in coral reef survey. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, April. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2026.04.002>
- Muhsoni, F. F., & Efendy, M. (2017). Coral reefs eco tourism sustainability management In the Gili Labak Island using rapfish method. *Jurnal Kelautan*, 10(2), 192–204. <https://doi.org/10.21107/jk.v10i2.3235>
- Muhsoni, F. F., Salsabil, A. T. S., Safa, Zainuri, M., Samba, A. B., Fauzyah, E., & Irawan, D. (2025). Mapping coral reefs growth using drone imagery in Gili Labak Island , Sumenep District , East Java , Indonesia. *Biodiversitas*, 26(3), 1180–1188. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d260317>
- Muhsoni, F., & Irawan, D. (2023). Calculation of coral reef volume using 3D underwater photos on Gili Labak Island, Indonesia. *AACL Bioflux*, 16(3), 1210–1219. <http://www.bioflux.com.ro/aac>
- N. A. J. Graham, & K. L. Nash. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs*, 32, 315–326.
- Nadon, M.-O., & Field, G. S. (2005). Field and simulation analyses of visual methods for sampling coral cover. In *Coral Reefs*. <https://doi.org/10.1007/s00338-005-0074-5>

- Nomani, S. Z., Oli, M. K., & Carthy, R. R. (2012). Line Transects by Design : The Influence of Study Design, Spatial Distribution and Density of Objects on Estimates of Abundance. *The Open Ecology Journal*, 5(1), 25–44.
- Nybakken, & Willard, J. (2005). *Marine biology: An ecological approach* (5th ed.). Benjamin Cummings.
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Megonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D., & Baldera, A. (2012). Estimating Global “Blue Carbon” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS ONE*, 7(9).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>
- Phinn, S. R., Roelfsema, C. M., & Mumby, P. J. (2012). International Journal of Remote analysis for mapping geomorphic and ecological zones on coral reefs. *International Journal of Remote Sensing*, 33(12), 3768–3797. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2011.633122> PLEASE
- Piñeros, V. J., Reveles-Espinoza, A. M., & Monroy, J. A. (2024). From Remote Sensing to Artificial Intelligence in Coral Reef Monitoring. *Machines*, 12(10), 1–32.
<https://doi.org/10.3390/machines12100693>

- Putri, R. A., & Muhsoni, F. F. (2025). Status dan Kondisi Terumbu Karang Menggunakan Metode Line Intercept Transect (LIT) di Pulau Gili Labak Sumenep. *Samakia: Jurnal Ilmu Perikanan*, 16(1), 106–113.
- Richards, J. A. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-88087-2>
- Rodríguez-Díaz, E., Jiménez-Rodríguez, L. O., Vélez-Reyes, M., Gilbes, F., & DiMarzio, C. A. (2003). Subsurface Detection of Coral Reefs in Shallow Waters using Hyperspectral Data. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5093, 538 – 546. <https://doi.org/10.1117/12.486311>
- Silvia, D., & Muhsoni, F. (2024). Analisis Status Pengelolaan Ekowisata Di Pulau Gili Labak Sumenep Menggunakan Metode Rapfish. *Journal Of Marine Research*, 13(3), 397–406.
- Spalding, D., & Ravilious, C. (2002). World atlas of coral reefs. In *Choice Reviews Online* (Vol. 39, Issue 05). <https://doi.org/10.5860/choice.39-2540>
- Storlazzi, C. D., Dartnell, P., Hatcher, G. A., & Gibbs, A. E. (2016). End of the chain? Rugosity and fine-scale bathymetry from existing underwater digital imagery using structure-from-motion (SfM) technology. *Coral Reefs*, 35(3), 889–894. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1462-8>

- Suryadi, L. P. F., Irwan, Amiluddin, M., Hawati, & Irwansyah. (2025). The Influence of Oceanographic Factors on the Growth Rate of Transplanted *Acropora muricata* in Bone Bay, Indonesia. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(5), 2067 – 2077. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.420196.6508>
- Urbina-Barreto, I., Garnier, R., Elise, S., Pinel, R., Dumas, P., Mahamadaly, V., Facon, M., Bureau, S., Peignon, C., Quod, J. P., Dutrieux, E., Penin, L., & Adjeroud, M. (2021). Which Method for Which Purpose? A Comparison of Line Intercept Transect and Underwater Photogrammetry Methods for Coral Reef Surveys. *Frontiers in Marine Science*, 8(May). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.636902>
- Veron, J. E. N., Devantier, L. M., Turak, E., & Green, A. L. (2009). Delineating the Coral Triangle. *Journal of Coral Reef Studies*, 11, 91–100.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Zhong, J., Li, M., Gruen, A., Liao, X., Qin, J., & Wang, B. (2025). A High-Quality Underwater 3D Reconstruction Solution for Coral Reef Environments Leveraging Advanced Photogrammetric Computer Vision Techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 91(6), 361 – 370. <https://doi.org/10.14358/PERS.24-00156R3>

BIODATA PENULIS



Dr. Firman Farid Muhsoni, S.Pi., M.Sc. merupakan dosen dan peneliti di bidang perikanan dan kelautan dengan kepakaran pada penginderaan jauh, geomatika pesisir, serta pengelolaan sumber daya pesisir dan laut. Lahir di Malang pada 26 Juni 1977, saat ini

beliau bekerja di Universitas Trunojoyo Madura. Riwayat pendidikan beliau dimulai dari Program Sarjana di Universitas Brawijaya pada bidang Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan (1997–2002), kemudian melanjutkan studi Magister di Universitas Gadjah Mada pada bidang Penginderaan Jauh (2006–2008), dan meraih gelar Doktor di Universitas Brawijaya pada bidang Ilmu Perikanan dan Kelautan (2015–2019). Kegiatan yang dilakukan berfokus pada pengelolaan ekosistem pesisir dan laut berbasis teknologi, seperti pemanfaatan citra drone, foto bawah air 3D, serta pendekatan spasial untuk analisis terumbu karang, mangrove, dan ekowisata bahari. Dalam lima tahun terakhir, beliau aktif memimpin dan terlibat dalam berbagai riset terkait pengembangan ekowisata berkelanjutan, estimasi stok karbon, serta rehabilitasi terumbu karang. Selain itu, telah menghasilkan berbagai publikasi ilmiah di jurnal nasional dan

internasional bereputasi, khususnya pada topik ekowisata, pemodelan sumber daya pesisir, dan teknologi penginderaan jauh. Beliau juga menulis beberapa buku, di antaranya *Karbon Mangrove* dan *Metode Foto 3D Underwater untuk Terumbu Karang*.



Dedi Irawan, S.Si., M.Si. adalah akademisi dan peneliti di bidang ilmu kelautan dengan fokus pada pengelolaan pesisir dan laut berbasis teknologi spasial. Lahir di Sumenep pada 19 November 1993, ia aktif mengembangkan ekosistem terumbu karang, pesisir, fotogrametri bawah air, dan pemodelan tiga dimensi. Beliau menyelesaikan pendidikan Sarjana Ilmu Kelautan di Universitas Trunojoyo Madura (2012–2016) dengan kajian tentang prevalensi penyakit karang di Pulau Gili Labak. Selanjutnya, ia melanjutkan studi Magister di Universitas Airlangga (2021–2023) mengenai pemodelan tiga dimensi untuk estimasi stok karbon pada karang masif, yang menjadi salah satu fokus keilmuan utamanya hingga saat ini. Sebagai pengajar di Universitas Trunojoyo Madura, ia mengampu berbagai mata kuliah seperti oseanografi, ekologi perairan, serta pemetaan sumber daya pesisir dan laut yang berfokus pada terumbu karang. Dedi Irawan telah menghasilkan sejumlah publikasi ilmiah di jurnal nasional dan internasional bereputasi, serta aktif sebagai pemakalah dalam forum

ilmiah. Ia juga merupakan penulis buku *Metode 3 Dimensi Underwater Fotogrametri* (2024) yang menjadi kontribusi penting dalam pengembangan metode survei terumbu karang berbasis teknologi modern di Indonesia.