

METODE FOTO 3D UNDERWATER

UNTUK TERUMBU KARANG



DEDI IRAWAN
FIRMAN FARID MUHSONI

METODE FOTO 3D UNDERWATER UNTUK TERUMBU KARANG

**DEDI IRAWAN., S.Si., M.Si.
Dr. FIRMAN FARID MUHSONI., S.Pi., M.Sc.**

Penerbit:

UTMPress
UNIVERSITAS TRUNOJOYO MADURA

Sanksi Pelanggaran

**Undang-Undang Nomor 19 Tahun 2002
Tentang Hak Cipta**

Pasal 72

1. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal 2 ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima milyar rupiah).
2. Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksudkan dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

**METODE FOTO 3D UNDERWATER
UNTUK TERUMBU KARANG**

Penulis:

**Dedi Irawan., S.Si., M.Si.
Dr. Firman Farid Muhsoni., S.Pi., M.Sc.**

Cetakan Pertama, Oktober 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak isi buku ini, baik sebagian
Maupun seluruhnya, dalam bentuk apapun
Tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Diterbitkan oleh UTM PRESS
Jl.Raya Telang, PO Box 2 Kamal, Bangkalan-Madura
Telp.(031) 3011146, Fax.(031) 3011506

ISBN 978-623-5972-20-6



KATA PENGANTAR

Puji syukur pada Tuhan Yang Maha Esa atas Rahmat dan Hidayah-Nya karena Buku "**METODE FOTO 3D UNDERWATER UNTUK TERUMBU KARANG**" dapat diselesaikan. Buku ini merupakan hasil dari penelitian yang dilakukan secara mandiri. Atas terselesaikannya buku ini penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah mendukung dan memberi arahan untuk selesainya buku ini. Semoga dokumen ini bermanfaat dalam pengembangan pemantauan terumbu karang kedepan.

Bangkalan, 13 Oktober 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
METODE PENGUKURAN TERUMBU KARANG	1
Sebaran Terumbu Karang	3
Terumbu Karang Fungsi dan Manfaat	4
Faktor yang Mempengaruhi Terumbu Karang.	5
Klasifikasi Terumbu Karang.....	8
Pengukuran Terumbu Karang Menggunakan 3 Dimensi	10
Karbon Terumbu Karang	11
METODE FOTO 3D UNTUK ESTIMASI BERAT TERUMBU KARANG	13
Tahapan Estimasi Berat Karang dari Foto 3D	17
METODE FOTO 3D UNTUK ESTIMASI VOLUME TERUMBU KARANG ..	31
Perhitungan Konversi Volume Foto 3D ke Volume Karang.....	35
Pengambilan Data Terumbu Karang 3D di Pulau Gili Labak untuk Estimasi Volume.....	37
ESTIMASI KARBON TERUMBU KARANG	45
Estimasi Stok Karbon Terumbu Karang di Pulau Gili Labak	46
PENERAPAN METODE 3D DENGAN AREA LUAS	49
Area Terumbu Karang Plot A.	49
Area Terumbu Karang Plot B.	51
PERBANDINGAN METODE 2D DAN 3D.....	55
Perbandingan Metode 2D (UPT) dan Foto 3D.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	61

METODE PENGUKURAN TERUMBU KARANG

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan terbesar di dunia, sehingga memiliki keanekaragaman hayati dan nonhayati kelautan terbesar terutama terumbu karang. Sebagai salah satu ekosistem utama pesisir dan laut, terumbu karang dengan beragam biota asosiatif dan keindahan yang mempesona, memiliki nilai ekologis dan ekonomis yang tinggi. Selain berperan sebagai pelindung pantai dari hempasan ombak dan arus kuat, terumbu karang juga sebagai tempat mencari makanan, tempat asuhan dan tumbuh besar, serta tempat pemijahan bagi berbagai biota laut. Nilai ekonomis terumbu karang yang menonjol adalah sebagai tempat penangkapan berbagai jenis biota laut dan berbagai jenis ikan hias, bahan konstruksi dan perhiasan, bahan baku farmasi, dan sebagai obyek wisata bahari yang sangat menarik. Wilayah ini juga sebagai tempat atau rumah bagi sebagian biota laut karena dapat dijadikan sebagai daerah pemijahan (*spawning ground*), daerah pengasuhan (*nursery ground*), daerah mencari makan (*feeding ground*) dan daerah pembesaran (*rearing*). Selain itu, hal yang sedang trend dibicarakan saat ini yaitu koral dapat dijadikan sebagai sumber senyawa bioaktif farmakologi bahari. Bila sumber senyawa bioaktif pada tanaman biasanya berasal dari tanaman darat tingkat tinggi, akan tetapi sebaliknya untuk biota dilaut diketahui sumber senyawa bioaktif ada pada organisme tingkat rendah atau invertebrata dan karang (Yeihel *et al.*, 2019). Terumbu karang adalah salah satu ekosistem yang paling beragam dan lebih terancam punah di planet ini, terumbu karang memiliki nilai estetik yang tinggi yang dapat digunakan sebagai pengembangan bidang seni, budaya dan sektor wisata bahari (*marine tourism*), namun euforia wisata menimbulkan tekanan terhadap lingkungan dan ekosistem pesisir, terutama jika belum ada pengelolaan pariwisata yang detail. Wisatawan dan pelaku pariwisata yang datang dalam jumlah besar dapat melakukan aktivitas tanpa memperhatikan kerentanan dan daya dukung yang ada (Kurniawan dan Darus, 2017).

Akhir-akhir ini isu pemanasan global menjadi isu yang mendunia. Pemanasan global mengakibatkan terjadi perubahan iklim. Perubahan iklim ini disebabkan karena terjadi peningkatan gas di atmosfer atau yang sering disebut gas rumah kaca. Gas rumah kaca ini akibat akumulasi karbon di atmosfer karena pembakaran bahan bakar fosil (kendaraan bermotor, industri) (IPCC, 2001; Komiyama *et al.*, 2008). Disahkannya Undang Undang no 6 tahun 1994 tentang pengesahan konvensi kerangka kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa mengenai perubahan iklim (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) menjadikan Indonesia harus berperan aktif dengan negara internasional lainnya untuk mencegah peningkatan

konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Hal ini disebabkan karena Indonesia mempunyai hutan tropis terbesar kedua di dunia dan merupakan negara kepulauan yang memiliki laut terluas yang mempunyai fungsi penyerap gas rumah kaca. Perubahan iklim yang drastis akibat kegiatan manusia telah menyumbangkan gas karbon dioksida yang cukup banyak ke udara dan atmosfer bumi. Karbon dioksida (CO₂) memiliki kontribusi yang paling tinggi terhadap kandungan gas rumah kaca yaitu sebesar 55% dari emisi karbon oleh aktivitas manusia (IPCC, 2001; Kennedy *et al.*, 2010)

Kabupaten Sumenep merupakan salah satu kabupaten di Jawa Timur yang mempunyai pulau terbanyak (kurang lebih 115 pulau yang bernama). Kondisi ini menjadikan wilayah ini mempunyai potensi terumbu karang dan mangrove yang besar (Muhsoni dkk, 2011). Pulau-pulau tersebut mempunyai potensi yang besar untuk dikembangkan sebagai kawasan wisata, antara lain Sapudi (Muhsoni 2016b), Gili Labak (Muhsoni, 2016a; Efendy dan Muhsoni, 2018; Muhsoni, 2017; Muhsoni dan Efendy, 2017). Pulau Gili Labak ini mempunyai potensi besar untuk pengembangan ekowisata selam, ekowisata snorkeling, ekowisata pantai. Hasil survei tahun 2016, Luas terumbu karang di Pulau Gili Labak mencapai 66 ha. Kondisi karang hidup mencapai 48,7% dan terumbu karang mati mencapai 51,3%. Jenis karang yang mendominasi adalah *Stylophora (Branching)* mencapai 29,27% (Muhsoni 2016a). Tahun 2020 penutupan *lifeform* karang di pulau Gili Labak mencapai 74% karang hidup termasuk pada kategori baik (Insafitri *et al.*, 2020) dan unsur abiotik sebesar 22%. Karang yang mendominasi adalah *Acropora Branching* (19,88%) dan *Coral Foliose* (10,25%) (Insafitri *et al.*, 2021).

Pulau Gili Labak mulai dikenal sebagai wisata sejak tahun 2015 dan semakin dikenal sejak beberapa program televisi nasional meliput keindahan pulau tersebut (acara *My Trip My Adventure*). Tumbuhnya wisata di Pulau Gili Labak akan menumbuhkan perekonomian masyarakat Gili Labak yang didominasi sebagai nelayan. Namun di sisi lain juga dapat menimbulkan ancaman yang serius terhadap ekosistem terumbu karang dan habitat lain di pulau tersebut. Prinsip-prinsip konservasi dalam manajemen ekowisata di Pulau Gili Labak masih diabaikan karena terkonsentrasi pada upaya untuk menarik wisatawan sebanyak mungkin (Rahardjanto *et al.* 2019). Persentase tutupan *life form* karang *massive* di pulau Gili Labak mencapai 10,25% (Insafitri *et al.*, 2021). Karang *massive* mempunyai bentuk pertumbuhan menyerupai bongkahan batu dan tidak mudah patah seperti karang bercabang, sehingga melihat kondisi tersebut karang *massive* mempunyai resiko lebih rendah dalam pengambilan data foto bawah air 3D.

Metode survei terumbu karang sangat beragam seperti, yaitu : metode Manta Tow (Gel *et al.* 2013), metode *line intercept transect (LIT)* (Sarhini *et*

a.,/ 2016) metode *point intercept transect (PIT)* (M. Takdir Umanailo *et al.*, 2015) metode Belt Transect (Fastawa1, 2016) dan metode Transek Kuadrat (Linnaeus *et al.* 2014). Metode-metode tersebut digunakan dalam mengidentifikasi kondisi terumbu karang. Metode Foto Bawah Air merupakan salah satu metode yang saat ini banyak berkembang, metode ini didasar dengan foto 2D (Purnama Sari *et al.*, 2021; Satyawan dan Artiningrum, 2021; Sirait, Luthfi dan Isdianto, 2021), namun metode-metode ini kurang menggambarkan pertumbuhan terumbu karang yang mempunyai pertumbuhan vertikal dan horizontal (volume).

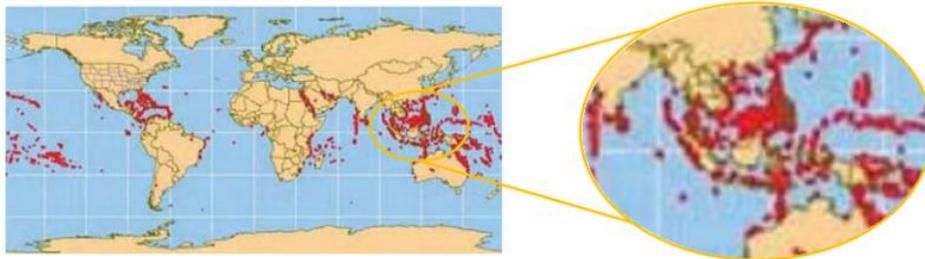
Pemodelan tiga dimensi (3D) merupakan metode yang belum banyak dimanfaatkan. Penyajian data (3D) dapat menyajikan data efektif untuk menggambarkan kerusakan pada terumbu karang. Metode akustik saat ini banyak digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek bawah laut. Sistem akustik sangat efektif untuk mengeksplorasi lingkungan bawah laut (Blondel 2009).

Pengembangan metodologi untuk memungkinkan memasukkan metrik 3D ke dalam pemantauan terumbu karang sangat diperlukan. Proporsi tutupan karang hidup di terumbu adalah salah satu metrik yang paling banyak digunakan dari kesehatan terumbu (Leujak dan Ormond, 2007). Metode ini digunakan sebagai proxy untuk menghitung biomassa terumbu karang dan hampir semua teknik yang digunakan untuk menilai melibatkan linear atau perkiraan horisontal planar (Hill dan Wilkinson, 2004; Leujak dan Ormond, 2007). Metode 2D untuk memperkirakan tutupan karang bukan indikator terbaik untuk menilai kesehatan terumbu (Bamford dan Forrester, 2003). Sedangkan 3D terumbu karang menyediakan struktur informasi berharga tentang kesehatan terumbu (Dickens *et al.* 2011). Luas permukaan dan volume 3D dapat memberikan metrik kelimpahan karang yang lebih dekat, dan memungkinkan menangkap perubahan pada terumbu lebih akurat. Penelitian ini mengembangkan metode foto bawah air dengan pendekatan 3D untuk menghitung estimasi volume terumbu karang yang diaplikasikan untuk estimasi stok karbon karang.

Sebaran Terumbu Karang

Terumbu karang tersebar di laut dangkal di daerah tropis hingga subtropis diantara 30° lintang utara hingga 30° lintang selatan mengelilingi bumi tiga daerah besar terumbu karang yaitu Laut Karibia, Samudera Hindia dan Indo-Pasifik. Karang tumbuh dengan baik di daerah Indo-Pasifik hingga mencapai kurang lebih 80 marga, yang disebabkan oleh faktor alami pendukung pertumbuhan karang untuk berkembang dengan baik di Indo-Pasifik Barat. Keanekaragaman spesies karang yang tersebar di wilayah

Indo-Pasifik tercatat di daerah Melanesia. Tutupan terumbu karang di dunia diperkirakan 284,300 km² dan sebagian besar ditemukan di Indo-Pasifik. Hal inilah yang menyebabkan Indonesia dikenal sebagai pusat keanekaragaman jenis karang (Reef 2006). Persebaran terumbu karang di dunia dapat dilihat di Gambar 1.



Gambar 1. Persebaran Terumbu Karang di Dunia (kiri) dan di Indonesia (kanan) (Reef 2006)

Karang di Indonesia tersebar mulai dari Sabang hingga utara Jayapura. Sebaran karang tidak merata di seluruh perairan Indonesia, ada daerah tertentu dimana karang tidak dapat tumbuh dengan baik dan pada daerah lainnya tumbuh dengan sangat baik. Secara umum, kondisi terkini terumbu karang di Indonesia sedikit mengalami perubahan dibandingkan dengan tahun sebelumnya, terumbu kategori jelek sebanyak (36.18%), terumbu kategori cukup sebanyak (34.3%), terumbu kategori baik sebanyak (22.96%) dan kategori sangat baik sebesar (6.56%) . Apabila dibandingkan dengan tahun sebelumnya, terumbu kategori baik dan cukup mengalami penurunan, namun sebaliknya terumbu kategori sangat baik dan jelek mengalami peningkatan. Dalam hal ini, beberapa terumbu kategori baik naik menjadi sangat baik dan beberapa turun menjadi jelek, sedangkan kategori cukup mengalami penurunan ke kategori jelek (Hadi et al. 2018).

Terumbu Karang Fungsi dan Manfaat

Terumbu karang adalah ekosistem yang terbentuk dari sekumpulan hewan karang atau polip yang bersimbiosis dengan sejenis alga yang disebut *zooxanthellae*. Jenis alga yang bersimbiosis dalam jaringan karang dan berfotosintesis lalu menghasilkan oksigen yang berguna untuk kehidupan hewan karang disebut *zooxanthella*. Terumbu karang memiliki dua kata yaitu terumbu dan karang. Terumbu adalah endapan masif batu kapur terutama kalsium karbonat (CaCO₃), sedangkan karang adalah hewan sessile renik tak bertulang belakang yang termasuk dalam fillum Coelenterata (hewan berongga) atau Cnidaria bersama hewan laut lain seperti *soft coral*, hydra dan anemone laut yang mampu mensekresi CaCO₃. Komponen biota

terpenting dalam suatu terumbu karang adalah karang batu (*Stony coral*), hewan yang tergolong dalam ordo Sceleractinia yang kerangkanya terbuat dari rangka kapur. Penyebaran dan pertumbuhan terumbu karang dipengaruhi oleh salinitas, suhu, pH, arus, substrat, cahaya dan kejernihan (Nontji 2005).

Berdasarkan kemampuannya dalam memproduksi kapur, ada dua tipe karang yaitu karang yang membentuk bangunan kapur (*Hermatypic corals*) dan karang yang tidak dapat membentuk bangunan kapur (*Ahermatypic corals*). *Hermatypic corals* dalam hidupnya bersimbiosis dengan *zooxanthellae* yang hidup di jaringan polip hewan karang dan melakukan fotosintesis. Hasil sampingan fotosintesis tersebut adalah endapan kalsium karbonat yang struktur dan bangunannya khas. Demikian peranan sinar matahari bagi kehidupan karang *Hermatypic corals* sangat penting sehingga karang tersebut hidup di perairan pantai/laut dangkal. Selain itu hewan karang memerlukan suhu antara 25-32°C (Supriharyono 2007).

Fungsi dan manfaat terumbu karang adalah sebagai sumber daya perikanan sangat tinggi, sebanyak 132 jenis ikan yang bernilai ekonomi di Indonesia dengan 32 jenis diantaranya hidup pada terumbu karang (Nyabakken 1992). Banyak ikan karang yang dapat dijadikan sebagai komoditi ekspor yang bernilai ekonomi tinggi. Terumbu karang dapat dijadikan sebagai obyek wisata bawah air yang sangat menarik. Masyarakat dapat memanfaatkan sebagai sumber ekonomi wilayah dengan mendirikan pusat penyelaman, restoran hingga penginapan. Terumbu karang dapat dijadikan sebagai sumber dan bahan makanan, sumber keanekaragaman hayati dan obat-obatan. Terumbu karang melindungi pantai dari abrasi dan erosi. Strukturnya yang keras dapat menahan gelombang dan arus sehingga dapat mencegah rusaknya dua ekosistem perairan dangkal lainnya, seperti lamun dan mangrove. Terumbu karang dapat dijadikan sebagai laboratorium alam penunjang penelitian dan pendidikan. Terumbu karang adalah suatu ekosistem yang pertumbuhannya sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan kualitas perairan.

Faktor yang Mempengaruhi Terumbu Karang.

Adapun faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan terumbu karang adalah:

a. Suhu

Suhu perairan dapat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan terumbu karang. Menurut (Nyabakken 1992) suhu optimal

perairan untuk mendukung pertumbuhan karang berkisar 22-29 °C. Umumnya perairan dengan suhu yang baik untuk pertumbuhan terumbu karang adalah perairan dangkal daerah tropis dengan suhu minimum dan maksimum yaitu 16-36 °C. Suhu yang berubah secara drastis 4-6 °C juga dapat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan kematian karang. Karang dapat hidup pada suhu perairan di atas 18o C. Suhu ideal untuk pertumbuhan karang berkisar antara 27-29°C. Adanya kenaikan suhu air laut di atas suhu normalnya, akan menyebabkan pemutihan karang (coral bleaching) sehingga warna karang menjadi putih. Bila hal tersebut berlanjut hingga beberapa minggu, akan menyebabkan kematian (Giyanto et al. 2017)

b. Salinitas

Salinitas adalah kadar garam pada perairan yang dapat mempengaruhi pertumbuhan terumbu karang. Salinitas yang sesuai untuk pertumbuhan terumbu karang adalah berkisar 32–35‰ (Nyabakken 1992). Salinitas ideal bagi pertumbuhan adalah berkisar antara 30-36 ‰. Air tawar dengan salinitas rendah dapat membunuh karang, oleh karena itu karang tidak dijumpai di sungai ataupun muara sungai yang memiliki salinitas yang rendah (Giyanto et al. 2017).

c. Sedimentasi

Menurut (Ayu Ariani 2006) mengatakan bahwa sedimentasi memiliki dampak negatif terhadap pertumbuhan terumbu karang, karena terumbu karang sangat sensitif terhadap endapan sedimentasi. Endapan sedimen juga dapat menghambat cahaya matahari masuk ke dalam perairan sehingga proses fotosintesis biota yang bersimbiosis dengan hewan karang terganggu. Sedimentasi juga menyebabkan penyumbatan saluran makanan pada hewan karang sehingga dapat menyebabkan kematian. Butiran sedimen dapat menutupi polip karang, dan bila berlangsung lama bisa menyebabkan kematian karang. Oleh karena itu, karang tidak dijumpai pada perairan yang tingkat sedimentasinya tinggi (Giyanto et al. 2017)

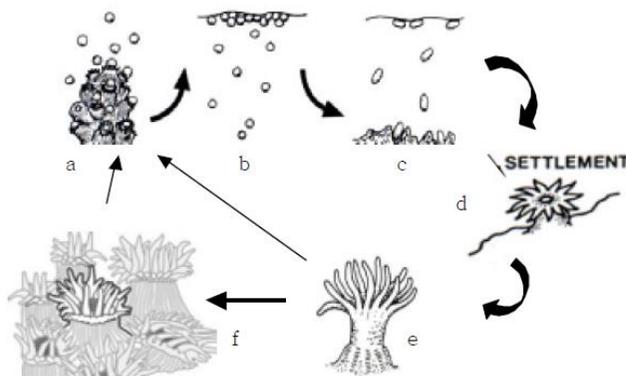
d. Substrat

Menurut Burke, Selig and Spalding, (2002) substrat adalah tempat hewan karang tumbuh, hewan karang membutuhkan substrat yang kompak dan keras untuk menempel. Jenis substrat keras berupa benda padat di dasar laut seperti batu, cangkang molusca dan potongan kayu. Larva hewan karang yaitu pada larva planula untuk pembentukan koloni baru dari karang yang membutuhkan substrat keras. Larva karang yang disebut planula memerlukan substrat yang keras dan stabil untuk menempel, hingga tumbuh menjadi karang dewasa. Substrat yang labil, seperti pasir akan sulit bagi planula untuk menempel (Giyanto et al. 2017)

Reproduksi Hewan Karang

Reproduksi adalah proses pembentukan individu baru dari induk, dan dapat terjadi melalui cara aseksual atau seksual. Jenis aseksual karang yang paling umum reproduksi adalah melalui fragmentasi, dan sering melibatkan pemisahan fisik sebagian dari kerangka yang dilapisi jaringan. Cara lain dari reproduksi aseksual dapat terjadi melalui peluruhan jaringan atau bail out polip, dan bit jaringan bersilia yang dihasilkan dapat menyebar ke atas yang lebih jauh dan menunjukkan perilaku penyelesaian selektif (Sammarco 1982). Larva juga bisa diproduksi melalui partenogenesis, dan meskipun secara genetik identik dengan koloni induk, menunjukkan perilaku larva. Reproduksi seksual melibatkan pelepasan sperma dan sel telur (gamet) yang dihasilkan oleh jantan dan betina dari masing-masing spesies. Reproduksi seksual menghasilkan dua peluang untuk meningkatkan variabilitas genetik: satu melalui kontribusi dari dua jenis yang berbeda untuk *offspring* dan lainnya melalui “*crossing over*” di antara kromosom yang terjadi selama profase satu tahap meiosis, pembelahan reduksi yang membuat gamet haploid ($1n$) yang melebur menjadi organisme diploid ($2n$). Tidak peduli bagaimana keturunan terbentuk, mereka tidak berkontribusi pada populasi kecuali mereka berhasil merekrut, dan di situlah perilaku muncul.

Menurut (Nybakken 1988) proses reproduksi aseksual dengan pembentukan tunas secara terus-menerus merupakan mekanisme pada hewan karang untuk menambah ukuran koloni bukan untuk membentuk koloni baru. Berikut adalah gambar tentang rekrutmen karang atau reproduksi karang secara seksual yang dipaparkan oleh (English, Wilkinson, and Baker 1998) Pada (Gambar) 2. di bawah ini adalah proses terjadinya pelepasan eksternal yang melibatkan sel gamet atau sering disebut juga sebagai peristiwa *spawning*. *Spawning* yaitu proses terjadinya pelepasan sel gamet (sel telur dan sel sperma) ke kolom atau badan perairan sehingga terjadi fertilisasi secara eksternal.



Gambar 2. Proses Spawning Pada Karang. Sumber: (Timotius 2003)

Gambar 2. menjelaskan bahwa siklus reproduksi karang tersebut secara umum adalah sebagai berikut: telur & spema dilepaskan ke kolom air (a), fertilisasi menjadi *zygot* terjadi di permukaan air (b), *zygot* berkembang menjadi larva planula yang kemudian mengikuti pergerakan air. Bila menemukan dasaran yang sesuai, maka planula akan menempel di dasar (c), planula akan tumbuh menjadi polip (d), terjadi kalsifikasi (e), membentuk koloni karang (f), namun karang soliter tidak akan membentuk koloni.

Klasifikasi Terumbu Karang

Dilihat dari bentuk pertumbuhannya, karang dibedakan menjadi enam kategori utama, yaitu : (1) karang bercabang (*branching*); (2) karang padat (*massive*); (3) karang mengerak (*encrusting*); (4) karang meja (*tabulate*); (5) karang berbentuk daun (*foliose*); dan (6) karang jamur (*mushroom*) (Coremap II, 2007). Sedangkan berdasarkan struktur geomorphologi dan proses pembentukannya, terumbu karang terdiri atas 4 (empat) tipe terumbu, yaitu : (1) terumbu karang tepi (*fringing reef*); (2) terumbu karang penghalang (*berrier reef*); (3) terumbu karang cincin (*attol*); dan (4) terumbu karang takat/ gosong (*Patch reef*) (Suharsono 2008).

1. Kategori terumbu karang menurut bentuknya.

Gambar 3 adalah gambar bentuk terumbu karang yang di bagi menurut pertumbuhannya menurut (Suharsono 2008) yaitu :

a. Karang bercabang (*branching*)

Karang ini memiliki bentuk bercabang-cabang, cabang memiliki panjang melebihi ukuran diameternya. Terumbu ini sering di temui di tepi dan dan bagian atas lereng terutama yang terlindungi atau setengah terbuka.

b. Karang padat (*massive*)

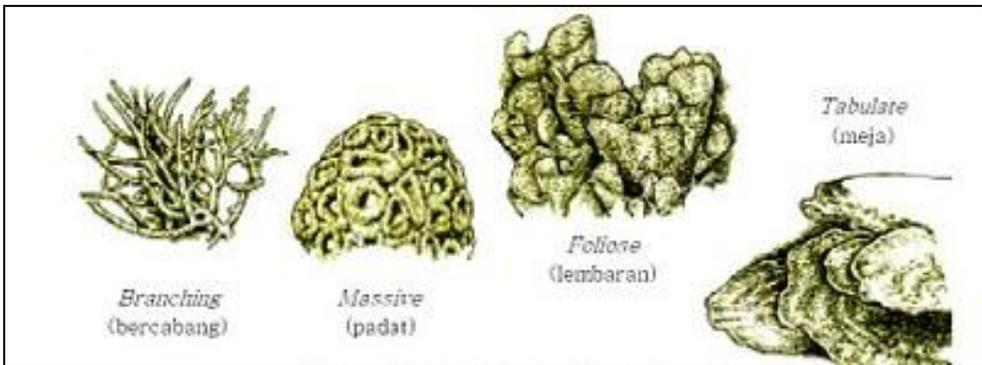
Terumbu jenis ini memiliki bentuk padat dengan ukuran yang bervariasi serta beberapa bentuk seperti bongkahan batu. Pada permukaan karang ini halus dan padat, pada umumnya terumbu ini sering ditemui di tepi terumbu karang.

c. Karang berbentuk daun atau lembaran (*foliose*)

Terumbu karang ini memiliki bentuk lembaran-lembaran yang menonjol pada dasar terumbu, berukuran kecil dan membentuk lipatan atau melingkar.

d. Karang meja (*tabulate*)

Karang *tabulate* atau yang disebut juga dengan karang meja memiliki bentuk yang bercabang dengan arah mendatar dan rata seperti meja. Karang ini ditopang dengan batang yang berpusat atau bertumpu pada satu sisi membentuk sudut atau datar.



Gambar 3. Bentuk Terumbu Karang Berdasarkan Bentuk. Sumber: (Timotius 2003)

2. Tipe Terumbu Karang Menurut Geomorphologi dan Proses Pembentukannya

Gambar 4. menurut (Tomas *et al.*, 1997), bentuk terumbu karang bisa diklasifikasikan atau dibagi menjadi tiga tipe, yaitu :

a. Terumbu karang tepi (*fringing reefs*)

Terumbu karang tepi atau karang penerus berkembang di mayoritas pesisir pantai dari pulau-pulau besar. Perkembangannya bisa mencapai kedalaman 40 meter dengan pertumbuhan ke atas dan ke arah luar menuju laut lepas. Dalam proses perkembangannya, terumbu ini berbentuk melingkar yang ditandai dengan adanya bentukan ban atau bagian endapan karang mati yang mengelilingi pulau. Pada pantai yang curam, pertumbuhan terumbu jelas mengarah secara vertikal. Contoh: Bunaken (Sulawesi), dan Nusa Dua (Bali).

b. Terumbu karang penghalang (*barrier reefs*)

Terumbu karang ini terletak pada jarak yang relatif jauh dari pulau, sekitar 0.52 km ke arah laut lepas dengan dibatasi oleh perairan berkedalaman hingga 75 meter. Terkadang membentuk *lagoon* (kolom air) atau celah perairan yang lebarnya mencapai puluhan kilometer. Umumnya karang penghalang tumbuh di sekitar pulau sangat besar atau benua dan membentuk gugusan pulau karang yang terputus-putus. Contoh : Spermonde (Sulawesi Selatan), Banggai Kepulauan (Sulawesi Tengah).

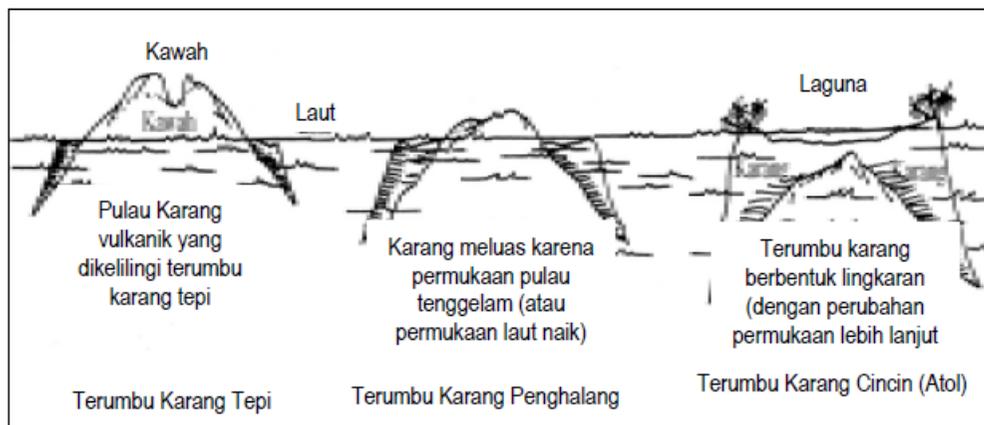
c. Terumbu karang cincin (*atolls*)

Terumbu karang yang berbentuk cincin yang mengelilingi batas dari pulau-pulau vulkanik yang tenggelam sehingga tidak terdapat perbatasan dengan daratan. Contoh: Taka Bone Rate (Sulawesi), Maratua (Kalimantan Timur), Pulau Dana (NTT), Mapia (Papua).

d. Terumbu karang datar atau gosong terumbu (*patch reefs*)

Gosong terumbu (*patch reefs*), terkadang disebut juga sebagai pulau datar (*flat island*). Terumbu ini tumbuh dari bawah ke atas sampai ke

permukaan dan, dalam kurun waktu geologis, membantu pembentukan pulau datar. Umumnya pulau ini akan berkembang secara horizontal atau vertikal dengan kedalaman relatif dangkal. Contoh: Kepulauan Seribu (DKI Jakarta). (Castro, 2005).



Gambar 4. Bentuk Terumbu Karang Berdasarkan Faktor Geologis. (Suharsono 2008)

Pengukuran Terumbu Karang Menggunakan 3 Dimensi

Terumbu karang merupakan adalah satu ekosistem di laut dangkal tropis, dengan penyusun utamanya karang batu, dan berasosiasi dengan berbagai biota lainnya. Metode UPT (*Underwater Photo Transect*) atau Transek Foto Bawah Air merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk pemetaan kondisi terumbu karang menggunakan kamera digital dengan pelindung (*housing*) (Giyanto, 2013a; Adji *et al.*, 2016; Sagai, Roeroe dan Manembu, 2017; Nurrahman *et al.*, 2020). Beberapa penelitian foto bawah air 3 dimensi ini dicoba untuk dipergunakan pada analisis arkeologi bawah air atau artefak Jaklič *et al.*, 2015; Price *et al.*, 2019; Calders *et al.*, 2020; Fukunaga dan Burns, (2020) menggunakan foto (3D) untuk ekosistem terumbu karang, dan hasil dari citra (3D) ini memberikan informasi struktural, kuantitatif dan terperinci, yang memberikan wawasan baru tentang organisme individu dan hubungannya dengan lingkungannya. de Oliveira *et al.*, 2021 juga melakukan rekonstruksi (3D) terumbu karang menggunakan metode *Multiscale Geometrical Classification* (MGC), *Colour and Geometrical Classification* (CGC) dan *Object-Based Image Classification* (OBIA).

Fukunaga dan Burns, (2020) menjelaskan pengukuran struktur habitat (3D) terumbu karang merupakan aspek penting dari pemantauan terumbu karang, karena konstruksi habitat mempengaruhi kelimpahan dan keanekaragaman organisme terumbu karang. Teknik fotogrametri untuk menghasilkan rekonstruksi (3D) terumbu karang dan memeriksa hubungan

antara tutupan bentik dan berbagai metrik habitat. Urbina-Barreto *et al.*, (2021a) melakukan pemodelan (3D) terumbu karang dan mendapatkan data tingkat koloni, diameter, luas planar, permukaan dan volume penampangan terumbu karang.

Fotogrametri awalnya digunakan untuk mengukur kompleksitas struktural biologi kelautan target di habitat intertidal. Metode populer dan digunakan untuk mengukur kompleksitas struktural karang dan organisme laut lainnya. Fotogrametri melibatkan rekonstruksi model (3D) skala nyata dari objek atau skenario tertentu dari serangkaian foto yang tumpang tindih, diambil dari berbagai perspektif. Metode ini hanya membutuhkan kamera digital, fotogrametri bawah air telah terbukti menjadi teknik yang relatif akurat untuk morfologi pengukuran karang (Figueira *et al.* 2015).

Sementara penelitian yang melihat kompleksitas skala kecil (misalnya, koloni karang individu), menghasilkan alat fotogrametri untuk menggantikan metode yang lebih konvensional dan destruktif untuk memperkirakan penting karakteristik seperti luas permukaan dan volume, pengembangan sistem telah berhasil memetakan dan memodelkan area habitat bentik yang luas (hingga ~500 m²) atau bahkan transek sepanjang 1 km dengan berbagai paket perangkat keras dan perangkat lunak yang dibuat khusus. (Figueira *et al.* 2015).

Karbon Terumbu Karang

Terumbu karang, sebagai salah satu ekosistem laut yang paling produktif, menyerap CO₂ yang masuk ke laut untuk proses fotosintesis yang dilakukan oleh zooxantellae dan pembentukan kerangka kapur. Zooxantellae membutuhkan produk metabolisme berupa nutrisi dan CO₂ dari karang untuk fotosintesis, ditambah dengan sinar matahari sebagai sumber utamanya (Widiastuti *et al.* 2021). Hewan karang dapat mendaur ulang karbon dioksida, yang peningkatan karbon dioksida di alam dapat meningkatkan pemanasan global. Karbon dioksida (CO₂) masuk air laut melalui proses difusi atau terbawa oleh air hujan kemudian bereaksi dengan kalsium dan ion magnesium untuk membentuk garam kalsium karbonat (CaCO₃) dan magnesium karbonat (MgCO₃). Penyerapan atau pemanfaatan karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah yang sangat besar untuk pengapuran yang kemudian menghasilkan di terumbu karang menyebar secara vertikal dan horizontal secara luas, menjadikan terumbu karang sebagai penyerap karbon (Al-Horani *et al.*, 2003).

Proses fotosintesis yang dilakukan oleh *zooxantellae* ini menghasilkan oksigen yang kemudian dikonsumsi oleh hewan karang, sedangkan CO₂ dihasilkan dari respirasi hewan karang yang merupakan pemasok utama karbon. Pasokan karbon ini tidak hanya datang dari respirasi hewan karang, tetapi juga berasal dari lingkungan eksternal yang digunakan oleh karang hewan untuk fotosintesis dan pengapuran (Widiastuti et al. 2021).

METODE FOTO 3D UNTUK ESTIMASI BERAT TERUMBU KARANG

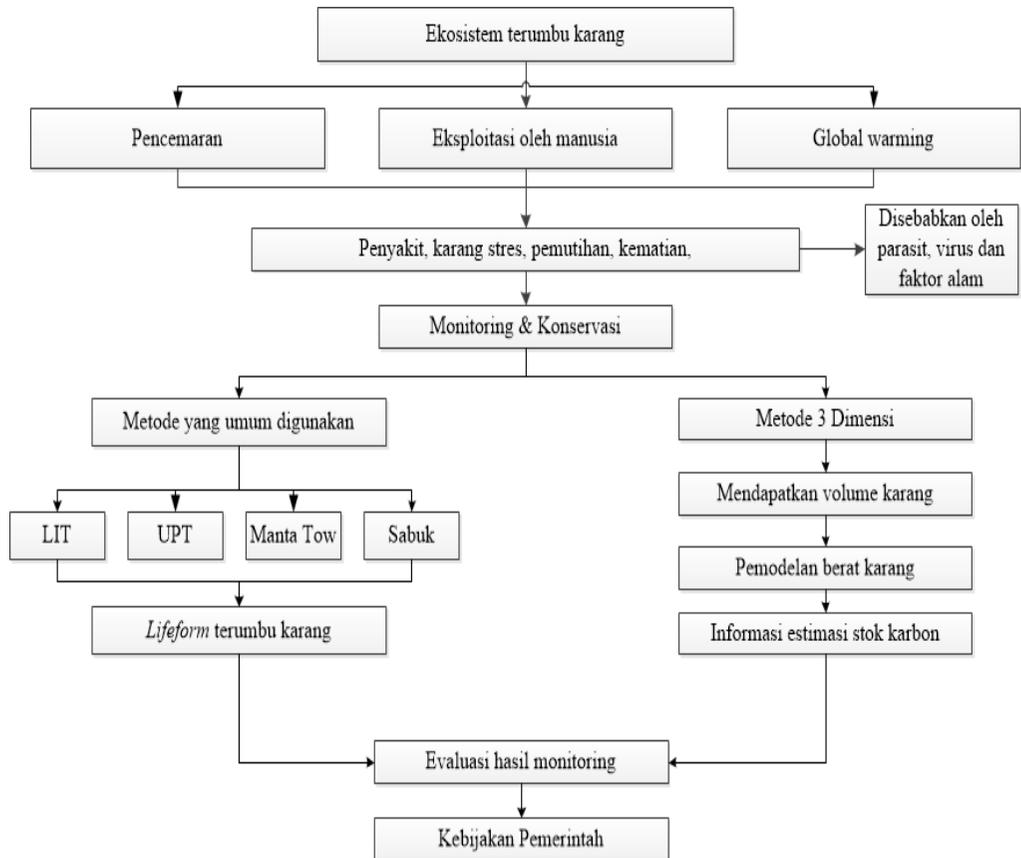
Terumbu karang merupakan satu ekosistem di laut dangkal tropis, dengan penyusun utamanya karang batu, dan berasosiasi dengan berbagai biota lainnya. Metode pemantauan terumbu karang yang ada sampai saat ini sebagian besar bergantung pada perkiraan tutupan karang satu Dimensi 1D *Line Intercept Transect* (LIT) atau dua dimensi 2D *Underwater Photo Transect* (UPT) sehingga data yang didapat hanya berupa pertumbuhan, tutupan, dan kelimpahan yang mengabaikan perubahan aspek ekologis yang signifikan dan tidak memasukkan informasi vertikal atau volume terumbu karang. Idealnya pengukuran terumbu karang dilakukan dari tiap sisi karena terumbu karang mengalami pertumbuhan dan setiap saat mengalami perubahan bentuk. Metode *Underwater Photo Transect* (UPT) atau Transek Foto Bawah Air merupakan metode yang memetakan kondisi terumbu karang menggunakan kamera digital dengan pelindung (*housing*) (Sagai *et al.*, 2017; Nurrahman *et al.*, 2020). Namun metode ini hanya menghasilkan informasi 2D (Benjamin *et al.*, 2019; Harahap *et al.*, 2019), dan dalam satuan persen (Utami *et al.*, 2018; Riskiani *et al.*, 2019).

Perhitungan volume menggunakan metode foto 3D dan berat karang dengan pendekatan regresi, mendapatkan model yang paling sesuai untuk estimasi berat karang. Model hasil pendekatan regresi ini dilakukan uji akurasi menggunakan *Mean Squared Error* (RMSE) untuk mendapatkan model yang paling akurat (Hatcher *et al.* 2020). Selanjutnya model diuji coba area terumbu karang di Pulau Gili Labak. Uji coba model menggunakan metode foto 3 dimensi *Coral Photogrammetry* (CP) yang dilakukan dengan menyelam SCUBA menggunakan kamera bawah air (Ahmad *et al.*, 2020b).

Peneliti menggunakan metode 3D untuk mempermudah meneliti terumbu karang yang tidak memiliki keahlian secara langsung dalam mengidentifikasi terumbu karang di dalam laut, sehingga nantinya peneliti dapat mengolah data dan mengidentifikasi terumbu karang di darat tanpa harus mengidentifikasi secara langsung di dalam air. Metode ini sama dengan metode fotogrametri 3D, salah satu kelebihan dalam menggunakan metode ini adalah mendapatkan data yang lebih terkontrol dan bisa dicek kembali kebenarannya dibandingkan metode-metode sebelumnya. Fukunaga *et al.*, (2019) menjelaskan pengukuran struktur habitat 3D terumbu karang merupakan aspek penting dari pemantauan terumbu karang, karena konstruksi habitat mempengaruhi kelimpahan dan keanekaragaman organisme terumbu karang. Teknik fotogrametri untuk menghasilkan rekonstruksi 3D terumbu karang dan memeriksa hubungan

antara tutupan bentik dan berbagai metrik habitat. Urbina-Barreto *et al.*, (2021) melakukan pemodelan 3 dimensi terumbu karang dan mendapatkan data tingkat koloni, diameter, luas planar, permukaan dan volume penampangan terumbu karang. Figueira *et al.*, (2015) meneliti aplikasi penginderaan jauh dan fotogrametri untuk pemetaan struktur dari perangkat lunak sebagai teknik membuat model 3D terumbu karang, yang mempunyai sifat biofisik dan struktur yang kompleks. Casella *et al.*, (2017) menggunakan teknik mengukur fitur 3D skala kecil dari terumbu karang air dangkal menggunakan drone yang dilengkapi dengan kamera, GPS, dan menggunakan algoritma *Structure from Motion* (SfM). Hatcher *et al.*, (2020) menggunakan Perangkat Pencitraan Bawah Air Kuantitatif SfM dengan Lima Kamera (SQUID-5), kendaraan permukaan yang diderek dengan Sistem Satelit Navigasi Global (GNSS) tingkat survei dan lima kamera menghadap ke bawah dengan gambar yang tumpang tindih. Widiastuti *et al.*, (2021) menghitung stok karbon terumbu karang dengan mengambil sampel pada setiap koloni terumbu karang yang ditanam menggunakan media. Terumbu karang, sebagai salah satu ekosistem laut yang paling produktif, menyerap CO₂ yang masuk ke laut untuk proses fotosintesis yang dilakukan oleh zooxantellae dan pembentukan kerangka kapur. *Zooxantellae* membutuhkan produk metabolisme berupa nutrisi dan CO₂ dari karang untuk fotosintesis, ditambah dengan sinar matahari sebagai sumber utamanya (Widiastuti *et al.* 2021). Hewan karang dapat mendaur ulang karbon dioksida, yang peningkatan karbon dioksida di alam dapat meningkatkan pemanasan global. Karbon dioksida (CO₂) masuk air laut melalui proses difusi atau terbawa oleh air hujan kemudian bereaksi dengan kalsium dan ion magnesium untuk membentuk garam kalsium karbonat (CaCO₃) dan magnesium karbonat (MgCO₃), Penyerapan atau pemanfaatan karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah yang sangat besar untuk pengapuran yang kemudian menghasilkan di terumbu karang menyebar secara vertikal dan horizontal secara luas, menjadikan terumbu karang sebagai penyerap karbon (Al-Horani *et al.*, 2003). Kerangka konseptual penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.

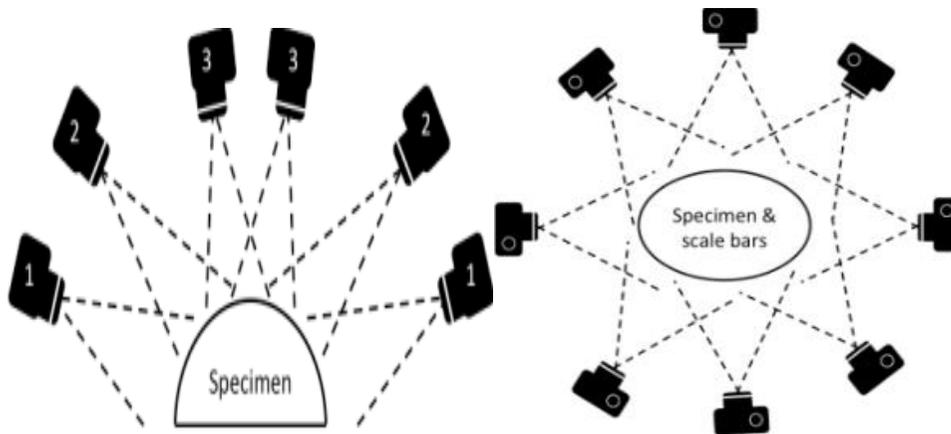
Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat selam, kolam kecil, *Frame besi* 50x50 cm, *Frame besi* 30x30 cm, *Frame besi* 58x44 cm, kamera olympus TG-6, *Roll meter*, GPS, *Software* CPCe, *Software* agisoft metashape, DO meter, pH meter, Secchi disk, termometer, palu, besi, oven, spektrofotometer.



Gambar 4. Kerangka Konsep Penelitian

Tahap pertama untuk membangun model estimasi berat karang dengan pendekatan foto 3D. Model dibangun dengan menggunakan sampel karang sebanyak 30 buah karang *massive* (mati) yang diambil dari lapang. Karang yang diambil adalah karang yang sudah mati agar tidak merusak lingkungan. Karang sampel difoto pada bagian atas dan samping rata-rata sebanyak 112 gambar menggunakan kamera digital Olympus TG-6. Posisi kamera menghadap pada sudut objek karang (pengambilan *underwater camera* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5. Pengambilan foto *underwater* untuk karang sampel dilakukan dalam kolam, dengan menggunakan transek *frame* 50x50 cm. Selain itu pada karang sampel juga ditimbang berat untuk setiap karang. Model didapatkan dengan pendekatan regresi linier dan non linier antara volume karang yang didapatkan dari foto 3D dengan berat karang. Bythell dan Pan, (2001); J H R Burns *et al*, (2015) menjelaskan pemotretan foto bawah air dilakukan secara terus menerus baik dari sudut planar maupun miring untuk mendapatkan foto yang menangkap seluruh permukaan koloni dengan overlap 70-80%. Foto 3D untuk

mendapatkan volume karang dilakukan dengan foto karang dianalisis menggunakan *software Agisoft Metashape Professional*.



Gambar 5. Pengaturan kamera untuk menangkap semua arah dan sudut model (Ahmad *et al*, 2020b).

Pengambilan foto 3D terumbu karang dilakukan sebanyak 3 kali yaitu: (i) Foto untuk membangun model dilakukan di dalam kolam, dengan pendekatan regresi linier dan non linier (30 sampel karang *massive*); (ii) Foto 3D untuk uji akurasi model dilakukan di dalam kolam; (iii) Foto 3D dilakukan di lapang untuk uji coba model di pulau Gili Labak.

Transek simulasi di lapang menggunakan *Frame* besi 50x50 cm. Siku *frame* berfungsi sebagai titik ikat *Ground Control Point* (GCP) dalam foto untuk menghitung volume terumbu karang. Koloni karang *massive* diambil pada kedalaman 7-12 meter di pulau Gili labak. (Ahmad *et al.*, 2020b) menjelaskan uji coba model menggunakan metode foto 3D *Coral Photogrammetry* (CP) yang dilakukan dengan menyelam SCUBA menggunakan kamera bawah air Stal *et al.*, (2012) menjelaskan geometri 3D dibangun dari gambar 2D menggunakan parameter ekstrinsik yang dihitung selama proses penyalarsan foto dengan parameter intrinsik dan fokus yang diperoleh dari metadata foto. Burns *et al*, (2015) menjelaskan penanda secara manual ke semua *Ground Control Point* (GCP), dan lokasi setiap penanda ditinjau dan dikoreksi di semua foto yang berisi GCP (*Ground Control Point*). Nilai x,y,z yang diketahui untuk setiap GCP (*Ground Control Point*) dimasukkan ke dalam perangkat lunak untuk mengoptimalkan penyalarsan gambar dan memastikan orientasi interior dan eksterior yang akurat dari model yang dihasilkan.

Pemotretan foto bawah air 3D dilakukan secara terus menerus baik dari sudut planar maupun miring untuk mendapatkan foto yang menangkap

seluruh permukaan koloni dengan overlap 70-80% (Bythell dan Pan, 2001); (Burns *et al*, 2015). Luas pengambilan 3D dalam penelitian ini adalah lebar 2 meter dan panjang 14 meter. Penanda secara manual ke semua GCP, dan lokasi setiap penanda ditinjau dan dikoreksi di semua foto yang berisi GCP. Nilai x,y,z yang diketahui untuk setiap GCP dimasukkan ke dalam perangkat lunak untuk mengoptimalkan penyelarasan gambar dan memastikan orientasi interior dan eksterior yang akurat dari model yang dihasilkan (Burns *et al*, 2015).

Tahapan Estimasi Berat Karang dari Foto 3D

a. Analisis Foto 3D

Hasil foto karang dianalisis menggunakan *software* Agisoft Metashape Professional. Tahapan sebagai berikut : (i) memperkirakan kualitas gambar foto bawah air sebagai fungsi ketajaman, eksposur, fokus, resolusi, dan kedalaman bidang gambar; (ii) menyelaraskan kamera dan *Build Dense Cloud* dengan perangkat lunak; (iii) menskalakan menggunakan skala; (iv) membangun *dense point cloud*, dengan informasi kedalaman untuk setiap kamera dan algoritma densifikasi; (v) membangun jaring 3D. *Build Texture (opsional)* meskipun langkah ini tidak diwajibkan untuk melakukan pengukuran dan analisis 3D. Semua model diorientasikan oleh proyeksi planar menggunakan tampilan fotografi, kemudian diisolasi (model koloni karang “pembersihan” dari elemen rekonstruksi lain seperti pondasi terumbu) dan pengeditan Agisoft Metashape. Model diekspor untuk analisis kuantitatif dan penghitungan volume (Kabiri *et al.*, 2020; de Oliveira *et al*, 2021).

Westoby *et al*, (2012) menjelaskan semua gambar diunggah ke perangkat lunak *software* Agisoft Metashape dan melakukan kalibrasi kamera dengan informasi fokus yang berasal dari metadata kamera. Setelah foto diunggah, perangkat lunak akan menyelaraskan foto menggunakan algoritme yang mampu mendeteksi fitur invarian yang tumpang tindih di antara gambar berurutan. Fitur invarian digunakan untuk mengembangkan matriks proyeksi geometris dan menentukan posisi dan orientasi kamera untuk setiap gambar yang sesuai.

b. Analisis Regresi Linier dan Regresi Non Linier untuk Mendapatkan Estimasi Berat Karang

Analisis regresi digunakan untuk mengetahui pola hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat pada berat dan volume hasil foto 3D terumbu karang (Scott *et al.*, 1991). Berdasarkan pola hubungannya, analisis regresi terbagi atas analisis regresi linear dan analisis regresi non-linear.

Regresi Linier dibedakan lagi menjadi dua yaitu:

1. Regresi Linier Sederhana

Regresi Sederhana adalah analisis data yang hanya terdiri dari satu variabel bebas (X) dan satu variabel terikat (Y). secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Y=a+bX+e$$

keterangan:

a : Konstanta

b : Koefisien regresi

x : Variabel bebas

y : Variabel terikat

e : eror

2. Regresi Non Linier

Dari data foto volume 3 dimensi dan berat karang karang *massive* mati, dilakukan analisis statistik atas 4 macam model persamaan regresi non-linier, yaitu Ekspotensial, logaritmik, polynominal dan Power/geometrik. Persamaan yang memenuhi syarat secara statistik kemudian dilanjutkan ke pemodelan spasial berbasis regresi untuk menghasilkan estimasi berat karang *massive* di daerah penelitian

- o Eksponensial : $Y = a * e^{bX}$
- o Logaritmik : $Y = a + b * \ln(x)$
- o Polynomial : $Y = a + bX + cX^2$
- o Power/geometrik : $Y = a * X^b$

(Wahyuni, 2014; Yu *et al.*, 2014; Danoedoro *et al.*, 2015; Candra *et al.*, 2016)

c. Hasil Estimasi Berat Terumbu Karang dari Foto 3D

Estimasi berat terumbu karang didapatkan dari pemodelan dengan pendekatan regresi (linier dan non linier) antara volume hasil foto 3D dengan berat sampel terumbu karang. Volume hasil foto 3D didapatkan dari sampel terumbu karang (30 karang *massive*) dilakukan pemfotoan di dalam air (pengambilan *underwater camera*) dengan berbagai posisi kamera menghadap pada obyek karang. Foto pada seluruh permukaan karang dengan overlap > 70% untuk menghasilkan gambar 3D. Hasil analisis menggunakan *software Agrisoft Metashape Professional* akan mendapatkan volume karang. Selain itu semua sampel karang juga ditimbang beratnya. Model dibangun dengan melakukan analisis regresi (linier dan nonlinier) pada data volume karang hasil foto 3D dengan berat karang. Mendapatkan akurasi model dilakukan dengan uji RMSE dan MAPE.

Pemodelan volume 3D dari sampel karang mati yang diambil dari lapang, agar tidak mengambil dan menggunakan sampel karang hidup sehingga tidak merusak ekosistem karang di lokasi penelitian. Pengambilan

foto pada sampel karang mati diambil dari percobaan dengan titik ikat *frame* 30x30 cm. Pada pojok *frame* di beritanda nomor berfungsi sebagai titik ikat, tujuan titik ikat yaitu sebagai *Ground Control Point* (GCP). Hasil pengambilan foto dan pembuatan titik ikat dapat dilihat pada Lampiran 1.

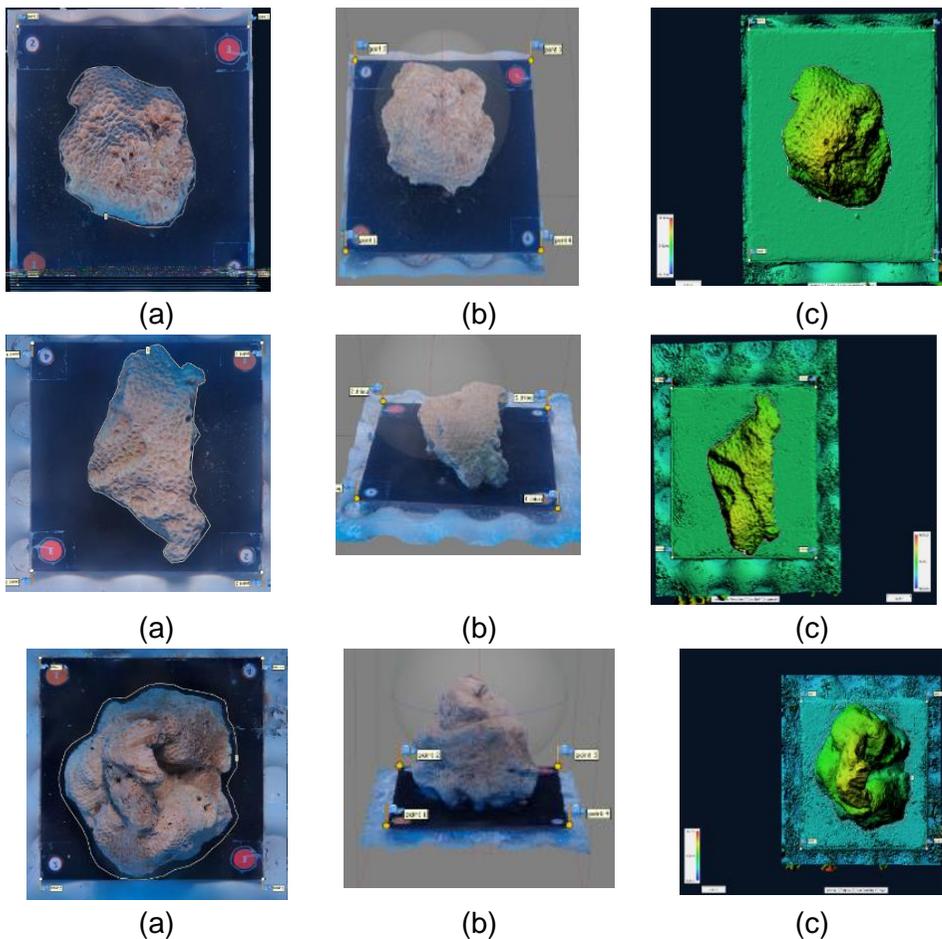
Hasil analisis *underwater* foto 3D menggunakan *software Agisoft Metashape Professional* pada 30 koloni karang *massive* (mati) dalam kolam mendapatkan volume pemodelan 3D pada sampel karang, pengambilan gambar dilakukan pada seluruh permukaan karang (Fukunaga et al. 2020). Rata-rata jumlah foto pada masing-masing sampel karang sebanyak 102 gambar. Selanjutnya hasil foto dianalisis menggunakan *software Agisoft Metashape* (Kabiri et al., 2020; de Oliveira et al., 2021). Hasil analisis *RMSE control point* pada hasil analisis foto 3 Dimensi karang di dalam kolam dapat dilihat pada Tabel 3. Beberapa foto sampel karang ada pada Gambar 6.

Tabel 1. RMSE *control point* pada hasil analisis foto 3 dimensi karang sampling di dalam air

No Karang	Jumlah Foto	RMSE kolam				
		X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
1	97	0.55387	1.13955	0.77888	1.26703	1.48728
2	100	0.27418	0.18195	0.04357	0.32906	0.33193
3	96	0.86821	0.86821	2.64072	1.18693	2.89520
4	94	0.44546	0.40574	0.48895	0.60255	0.77597
5	102	0.16377	0.31121	0.01835	0.35167	0.35215
6	95	0.23989	0.26469	0.32463	0.35722	0.48270
7	89	0.01553	0.23047	0.15672	0.23099	0.27913
8	96	0.31492	0.28618	0.41279	0.42553	0.59285
9	110	0.26506	0.24065	0.15519	0.35801	0.39020
10	82	0.19772	0.57799	0.20527	0.60183	0.63587
11	89	0.06381	0.21831	0.12998	0.22744	0.26196
12	115	0.26025	0.42471	0.20647	0.49811	0.53921
13	114	0.26427	0.30750	0.20589	0.40546	0.45474
14	114	0.10470	0.33880	0.18488	0.35461	0.39992
15	95	0.15410	0.33145	0.23749	0.36552	0.43590
16	100	0.10025	0.36274	0.18387	0.37634	0.41886
17	102	0.05425	0.34436	0.16343	0.34861	0.38502
18	104	0.11650	0.13726	0.14757	0.18004	0.23279
19	93	0.30765	0.43068	0.06607	0.52928	0.53339
20	100	0.26892	0.42773	0.26986	0.50525	0.57280
21	110	0.08382	0.15316	0.26245	0.17459	0.31522
22	113	0.08055	0.18929	0.28779	0.20571	0.35375

Metode Foto 3D Underwater Untuk Terumbu Karang
Dedi Irawan., S.Si., M.Si. Dr. Firman Farid Muhsoni., S.Pi., M.Sc.

No Karang	Jumlah Foto	RMSE kolom				
		X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
23	114	0.16094	0.20679	0.04977	0.26204	0.26673
24	111	2.18783	5.24739	0.98116	5.68522	5.76926
25	110	0.14644	0.34430	0.68882	0.37415	0.52542
26	119	0.51075	0.23892	0.66404	0.56387	0.87115
27	94	0.10643	0.17073	0.18373	0.20119	0.27246
28	108	0.08465	0.21065	0.01163	0.22703	0.22733
29	101	0.07523	0.20130	0.13604	0.21490	0.25434
30	103	0.17461	0.25764	0.08381	0.31109	0.32218
Rata-rata	102	0.29206	0.50167	0.34566	0.59070	0.72119



Gambar 6. Foto 3 Dimensi hasil analisis software Agisoft Metashape Professional. (a) tampak atas; (b) tampak samping; (c) 3 Dimensi (DEM)

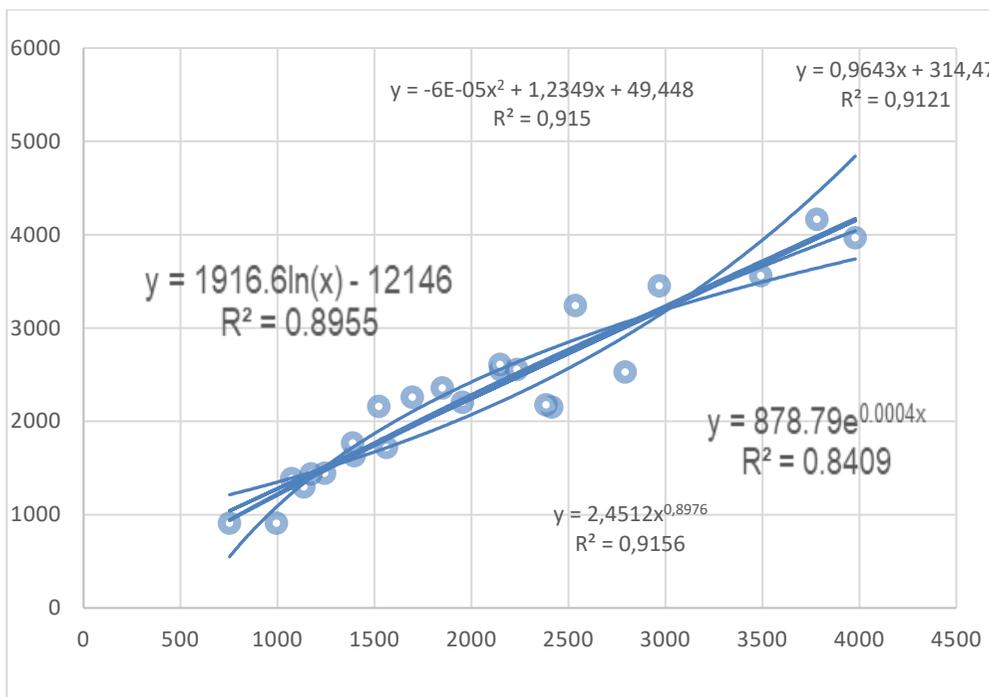
Foto dianalisis (3D) dengan software agisoft Metashape 1.7.4, mendapatkan nilai RMSE control point. Hasil analisis foto 3 dimensi didapatkan rata-rata RMSE terumbu karang untuk foto dalam kolam kecil dengan foto rata-rata sebanyak 102 foto, rata-rata X error 0.29206 mm, Y error 0.50167 mm, Z error 0.34566 mm, XY error 0.59070 dan total error mencapai 0.72119 mm.. Hal ini menunjukkan bahwa error hasil foto 3 dimensi dalam air kolam tidak sampai 1 mm. Bahwa pengaruh air yang bisa menyebabkan distorsi pada kamera.

Sampel karang juga ditimbang untuk mendapatkan berat karang *massive* sebenarnya. Semua sampel karang hasil volume foto 3D dan berat karang mati digunakan untuk mendapatkan model estimasi berat karang. Hasil volume dan berat karang dalam percobaan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Volume dan berat karang hasil analisis

No karang	Berat(g) hasil penimbangan	Volume (m ³)		
		Above	below	Total
1	2202.5	0.00196	0.00008	0.00195
2	2152.0	0.00241	0.00005	0.00241
3	2253.5	0.00291	0.00011	0.00290
4	1632.5	0.00139	0.00002	0.00139
5	2358.0	0.00186	0.00012	0.00184
6	907.5	0.00099	0.00002	0.00099
7	1442.5	0.00124	0.00004	0.00124
8	3966.5	0.00399	0.00012	0.00397
9	3893.5	0.00557	0.00005	0.00556
10	2010.0	0.00283	0.00019	0.00281
11	2177.5	0.00239	0.00008	0.00238
12	2551.5	0.00216	0.00012	0.00215
13	2258.0	0.00170	0.00008	0.00169
14	4164.0	0.00382	0.00043	0.00378
15	2608.0	0.00215	0.00009	0.00214
16	3559.5	0.00349	0.00006	0.00349
17	1296.0	0.00113	0.00002	0.00113
18	2554.5	0.00225	0.00018	0.00223
19	2375.5	0.00304	0.00011	0.00303
20	1384.5	0.00107	0.00004	0.00107
21	3240.5	0.00254	0.00007	0.00253
22	2527.5	0.00279	0.00006	0.00279
23	1719.0	0.00156	0.00004	0.00156
24	1766.5	0.00139	0.00004	0.00138

No karang	Berat(g) hasil penimbangan	Volume (m ³)		
		Above	below	Total
25	3450.0	0.00297	0.00001	0.00296
26	1438.0	0.00117	0.00002	0.00117
27	5429.0	0.00327	0.00007	0.00326
28	4307.0	0.00316	0.00002	0.00316
29	2159.5	0.00152	0.00005	0.00152
30	908.5	0.00075	0.00001	0.00075
Rata-rata	2489.7	0.00231	0.00008	0.00230



Gambar 7. Grafik pemodelan linier dan non-linier untuk berat hasil penimbangan (y) dengan volume hasil foto 3D (x)

Hasil rata-rata berat karang *massive* yaitu 2489.7 gram, hasil rata-rata Above volume karang *massive* yaitu 0.00231 m³, hasil rata-rata below volume karang yaitu 0.00008 m³, dan hasil rata-rata total volume karang yaitu 0.00230 m³

Volume hasil foto 3D dan berat karang pada (Tabel 2) digunakan untuk membangun model dengan pendekatan persamaan regresi linier dan non-linier. Hasil pemodelan regresi dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan pemodelan regresi linier dan non linier data volume dan berat paling baik adalah power/Geometrik diperoleh persamaan $y = 2,4512x^{0.8976}$

, $R^2 = 0.9156$, Polynomial $y = -0.0005x^2 + 1,2349x + 49,448$, $R^2 = 0.915$, Linier $y = 0,9643x + 314.47$, $R^2 = 0.9121$, Eksponensial $y = 878.79e^{0.0004x}$, $R^2 = 0.8409$, dan Logaritmik $y = 1916.6\ln(x) - 12146$, $R^2 = 0.8955$. Model dilakukan dengan pendekatan regresi non linier diambil dari pendekatan yang terbaik.

d. Uji akurasi model estimasi berat karang dari foto 3D menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Tahap selanjutnya pengujian akurasi model. Pengujian akurasi model pada sampel karang yang berbeda (sebanyak 21 buah). Karang sampel untuk uji akurasi juga dilakukan pemotretan 3D untuk mendapatkan volume karang. Kemudian volume karang dimasukkan dengan persamaan model terbaik untuk mendapatkan berat karang. Berat hasil persamaan model dibandingkan dengan berat hasil penimbangan. Hatcher *et al.*, (2020) menjelaskan untuk mendapatkan nilai akurasi didapatkan dari perhitungan *Root Mean Square Error (RMSE)* dan *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*, dengan membandingkan berat karang hasil persamaan model dengan berat hasil penimbangan.

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan besarnya tingkat kesalahan hasil prediksi, dimana semakin kecil (mendekati 0) nilai RMSE maka hasil prediksi akan semakin akurat. Membuktikan persamaan yang terbaik menghasilkan nilai estimasi volume terumbu karang yang baik, maka dilakukan uji akurasi. Uji akurasi ini dilakukan untuk mengetahui sampai seberapa besar nilai error persamaan regresi tersebut dengan menggunakan uji RMSE. Uji RMSE ini dilakukan dengan membandingkan nilai hasil estimasi volume Foto 3D menggunakan persamaan regresi dengan data volume hasil pengukuran langsung. Persamaan RMSE sebagai berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{i}{n} \sum_{i=1}^n (x_1 - y_1)^2}$$

$$RMSE \% = 100\% \times \frac{RMSE}{\bar{Y}}$$

Dimana :

x_1 = Nilai hasil pengukuran 3D,

y_1 = Prediksi nilai 3D,

\bar{Y} = Rata-rata hasil pengukuran 3D (Suprayogi *et al.*, 2014; Gurchiek *et al.*, 2017).

Penggunaan *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)* pada evaluasi dari hasil peramalan dapat melihat tingkat akurasi terhadap

angka peramalan dan angka realisasi. Nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t}}{n} \times 100\%$$

Dimana :

F_t : Nilai estimasi pada waktu t

A_t : Nilai actual pada waktu t

n : Jumlah data (t=1,2,.....,n)

keakuaratan model uji MAPE terdiri atas tiga kriteria, yaitu (a) MAPE < 5% (sangat akurat); (b) 5% < MAPE < 10% (akurat); dan (3) MAPE > 10%, tapi masih bisa dilanjutkan (tidak akurat) (Nabillah and Ranggadara 2020)

Hasil pemeriksaan uji akurasi RMSE dan MAPE pada terumbu karang *massive* sampel ke dua dengan menggunakan koloni karang mati jenis *massive* sebanyak 21 koloni, dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Volume dan berat karang untuk uji akurasi

No.	Berat (g)	Volume m ³		
		Above	Below	Total
1	1569	0.001594	0.000016	0.001578
2	1482	0.001878	0.000012	0.001866
3	803.0	0.000612	0.000005	0.000606
4	1972	0.001697	0.000017	0.001681
5	1684	0.001823	0.000003	0.001832
6	949.0	0.000942	0.000001	0.000942
7	1208	0.001470	0.000005	0.001470
8	3213	0.002494	0.000008	0.002493
9	1302	0.001003	0.000002	0.001003
10	949.0	0.001132	0.000005	0.001118
11	2569	0.002750	0.000013	0.002738
12	1637	0.001727	0.000012	0.001715
13	1274	0.001559	0.000021	0.001537
14	2185	0.001659	0.000007	0.001952
15	1501	0.001850	0.000018	0.001832
16	386.0	0.006170	0.000001	0.000616
17	189.0	0.000266	0.000009	0.000265
18	439.0	0.000545	0.000009	0.000536
19	1100	0.001342	0.000008	0.001335
20	1058	0.000975	0.000001	0.000974

21	1687	0.001366	0.000007	0.001359
Rata-rata	1388.3	0.001434	0.000030	0.001402

Tabel 4 menunjukkan rata-rata volume Above adalah 0.001434 m³., Hasil rata-rata berat karang adalah 13883 g. Hasil analisis sampel ke 2 pada Tabel 5.2 volome foto 3D dan berat karang digunakan untuk mencari uji akurasi menggunakan uji RMSE dan uji MAPE. Hasil uji akurasi dapat di lihat pada Tabel 6.

Tabel 4. Uji akurasi RMSE dan MAPE

Analysis	Dead coral (<i>Massive</i>)	Test data
Linier	$y = 0,9643x + 314.47$ $R^2 = 0.9121$	RMSE =284,5 gram %RMSE=20,5% MAPE = 27,4261 %
Polynomial	$y = -0.0005x^2 + 1,2349x + 49,448$ $R^2 = 0.915$	RMSE = 354.3 gram %RMSE=25,5% MAPE = 24.7689 %
Power/ geometrik	$y = 2,4512x^{0.8976}$ $R^2 = 0.9156$	RMSE =251.2 gram %RMSE=18,1% MAPE = 19,1691%
Eksponential	$y = 878.79e^{0.0004x}$ $R^2 = 0.8409$	RMSE =421.2 gram %RMSE=26.3% MAPE = 22,457%
Logaritmik	$y=1916.6\ln(x)-12146$ $R^2 = 0.8955$	RMSE =402.2 gram %RMSE=26.3% MAPE = 21.239%

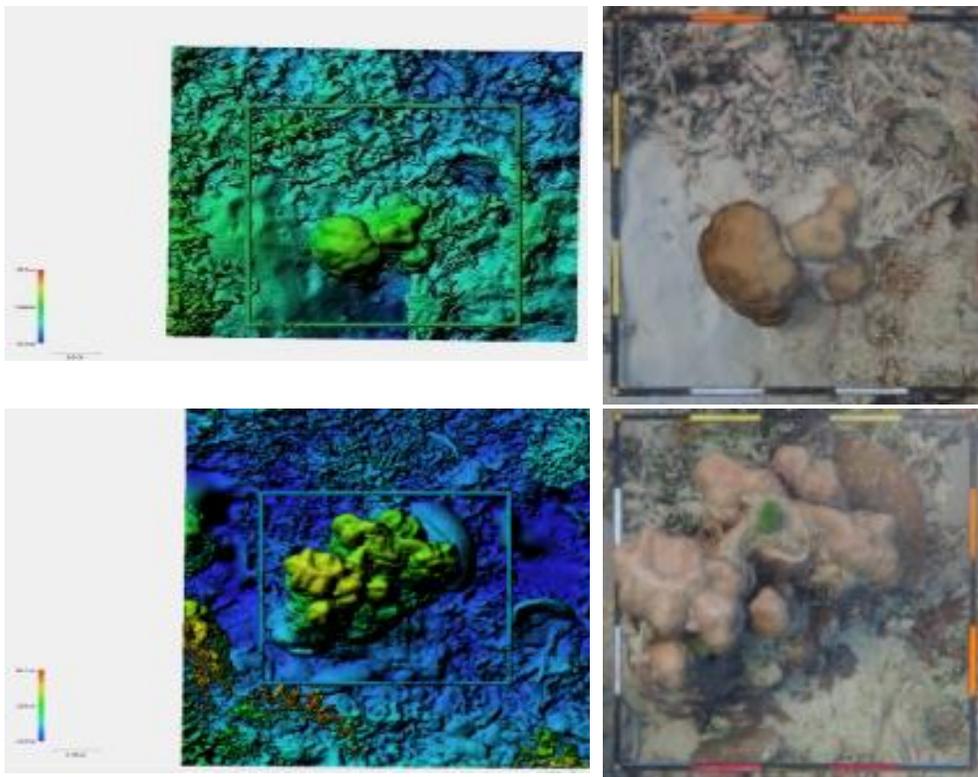
Hasil persamaan pada Tabel 4 menunjukan bahwa model yang mempunyai akurasi paling baik yaitu power/geometric $y = 2,4512x^{0.8976}$ dan $R^2=0,9156$ dengan hasil uji RMSE =354,3 gram, %RMSE=18,1%, dan MAPE = 24,7689%. Regresi Polynomial $y = -0.0005x^2 + 1,2349x + 49,448$, $R^2 = 0.915$ dengan hasil uji, RMSE =251,2 gram, %RMSE=25,5%, MAPE = 19,1691%. Regresi Linier $y = 0,9643x + 314.47$, $R^2 = 0.9121$ dengan hasil uji RMSE =284,5 gram, %RMSE=20,5%, dan MAPE = 27,4261%. Regresi Esponential $y = 878.79e^{0.0004x}$ $R^2 = 0.8409$, RMSE =421.2 gram %RMSE=26.3% MAPE = 22,457%. Regresi Logaritmik $y=1916.6\ln(x)-12146$, $R^2 = 0.8955$ RMSE =402.2 gram %RMSE=26.3% MAPE = 21.239%. Nilai tersebut masih menghasilkan nilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil penelitian (Figueira et al. 2015) yang mendapatkan hasil 10 % dari pengukuran karang botol, dan Urbina-Barreto et al., (2021) melakukan model linier memiliki akurasi tinggi untuk memprediksi volume 25 etric 3D dari 25 etric 2D

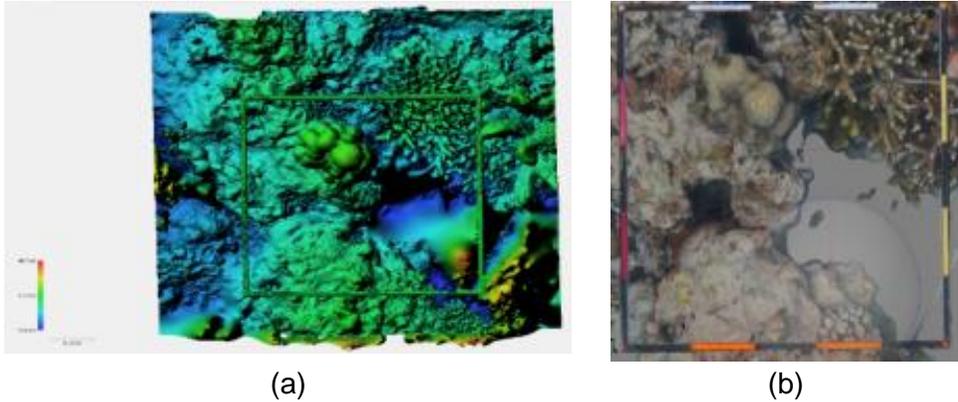
mendapatkan R^2 0,96. Hasil terbaik digunakan untuk memodelkan hasil volume dan berat karang di pulau Gili Labak.

e. Penerapan Model Estimasi berate dari foto 3D pada Terumbu Karang di Pulau Gili Labak

Aplikasi pemodelan dan pengambilan data lapang dilakukan uji coba di pulau Gili Labak, pengambilan foto dilakukan dengan penyelaman pada kedalaman 7-12 meter dengan pengambilan sampel koloni karang sebanyak 32 koloni. *Frame* besi yang digunakan adalah 50x50 cm atau 2500 cm² dengan menggunakan tanda pada setiap pojok siku *frame* tujuannya sebagai titik ikat pada foto dan mempermudah pada saat analisis di *software agisoft methasape* . Hasil Analisis 3 dimensi dapat dilihat pada Gambar 8

Berat 32 koloni terumbu karang *massive* (hidup) di Pulau Gili Labak didapatkan dengan mengkonversi volume foto 3D karang di lapang dengan menggunakan model persamaan paling baik yaitu power/geometric $y = 2,4512x^{0,8976}$ dan $R^2=0,9156$. Hasil estimasi berat terumbu karang dapat dilihat pada Tabel 5.





Gambar 8(a) Hasil analisis DEM dan (b) foto 3D terumbu karang dengan software Agisoft.

Tabel 5. Estimasi Berat Terumbu Karang Menggunakan Model hasil Foto 3D

NO.	Type coral	Volume Foto 3D analysis result Agisoft (cm ³ /plot)	Estimation of the weigh good with non linear regression model (gr/plot)
1	Favia	2951	3191.707
2	Favites	3173	3406.420
3	Panona	6045	6075.192
4	Favia	39727	32924.420
5	Leptoseris	26236	22687.218
6	Favia	5402	5491.863
7	Coscinaraea	5125	5238.415
8	Leptoria	8601	8337.385
9	Favia	1825	2073.424
10	Caulastrea	2564	2813.348
11	Caulastrea	2093	2344.775
12	Pavona	3937	4134.273
13	Montastrea	13706	12666.884
14	Montastrea	1703	1948.574
15	Favites	23181	20301.184
16	Favia	4388	4556.981
17	Psamocora	2223	2475.093
18	Goniastrea	2983	3222.756
19	Favia	4112	4298.855
20	Montastrea	384	511.769

NO.	Type coral	Volume Foto 3D analysis result Agisoft (cm ³ /plot)	Estimation of the weigh good with non linear regression model (gr/plot)
21	Psammocora	10421	9904.994
22	Psammocora	4016	4208.661
23	Coscinareae	7715	7562.257
24	Leptoseris	21	37.687
25	Psammocora	7036	6962.070
26	Psamocora	14529	13347.549
27	Euphyllia	226	317.999
28	Psammocora	969	1174.635
29	Montastrea	471	614.727
30	Porites	255	354.396
31	Porites	253	351.900
32	porites	2509	2759.119
Rata-rata		6524.375	4967.847

Hasil berat rata-rata volume karang di Pulau Gili Labak 4967.847 g/plot dan total berat karang untuk 32 plot sebesar 196296.546 g pada semua plot, transek yang digunakan untuk megambil foto koloni karang yaitu 50x50 cm atau 2500 cm². Hasil *control point* analisis foto 3 Dimensi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. RMSE *control point* pada hasil analisis foto 3 dimensi di pulau Gili Labak

No Karang	Jumlah Foto	RMSE dalam air				
		X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
1	66	0.34551	0.41573	0.95742	0.54056	1.09949
2	68	4.49793	5.30515	2.64572	7.08626	7.56406
3	55	0.48666	0.28344	0.90701	0.56319	1.06764
4	103	0.49960	0.26570	1.15356	0.56587	1.28488
5	89	0.19220	0.13247	0.76812	0.23344	0.80281
6	68	0.33250	0.32132	0.77538	0.46239	0.90278
7	77	0.23356	0.24368	1.34843	0.33754	1.39003
8	88	0.41095	0.28992	1.17245	0.50292	1.27577
9	107	0.28243	0.21107	0.73338	0.35259	0.81373

No Karang	Jumlah Foto	RMSE dalam air				
		X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
10	92	0.70233	0.36183	0.77661	0.51768	0.93333
11	96	0.32158	0.31478	0.97223	0.45000	1.07133
12	94	0.23877	0.25150	1.12789	0.34679	1.18000
13	109	0.27384	0.31219	1.06181	0.41528	1.14013
14	92	0.12947	0.19957	1.00379	0.23789	1.03159
15	47	0.25154	0.20377	1.09397	0.32372	1.14087
16	84	0.50278	0.27441	1.23654	0.57279	1.36277
17	86	0.22387	0.26691	0.90679	0.34837	0.97140
18	70	0.36938	0.41110	0.88490	0.55267	1.04332
19	82	1.10287	0.46634	0.95944	1.19742	1.53439
20	99	0.32144	0.48846	0.88929	0.58473	1.06431
21	99	0.32144	0.48846	0.88929	0.58473	1.06431
22	99	0.32144	0.48846	0.88929	0.58473	1.06431
23	78	0.14653	0.23775	0.94898	0.27928	0.98922
24	76	0.20763	0.37004	0.79758	0.42431	0.90342
25	89	0.31935	0.20923	1.13285	0.38179	1.19545
26	89	0.58686	0.68247	1.12429	0.90010	1.44021
27	89	0.58686	0.68247	1.12429	0.90010	1.44021
28	102	0.34006	0.40310	0.70512	0.52738	0.88053
29	75	0.45685	0.27083	0.72397	0.53109	0.89789
30	92	0.22845	0.30598	0.95544	0.38186	1.02893
31	92	0.22845	0.30598	0.95544	0.38186	1.02893
32	93	0.26850	0.18136	0.87276	0.32401	0.93097

Foto analisis 3D di pulau Gili Labak, mendapatkan nilai RMSE *control point*. Hasil analisis foto 3 dimensi didapatkan rata-rata RMSE *control point* untuk foto 32 koloni terumbu karang di pulau Gili Labak dengan foto rata-rata sebanyak 85 foto, rata-rata X error 0.49161 mm, Y error 0.48892 mm, Z error 1.01543 mm, XY error 0.69979 dan total error mencapai 1.30993 mm. Hal ini menunjukkan bahwa error hasil foto 3 dimensi di pulau Gili Labak mencapai 1.3 mm. Hal ini disebabkan oleh pengaruh air yang bisa menyebabkan distorsi pada kamera.

METODE FOTO 3D UNTUK ESTIMASI VOLUME TERUMBU KARANG

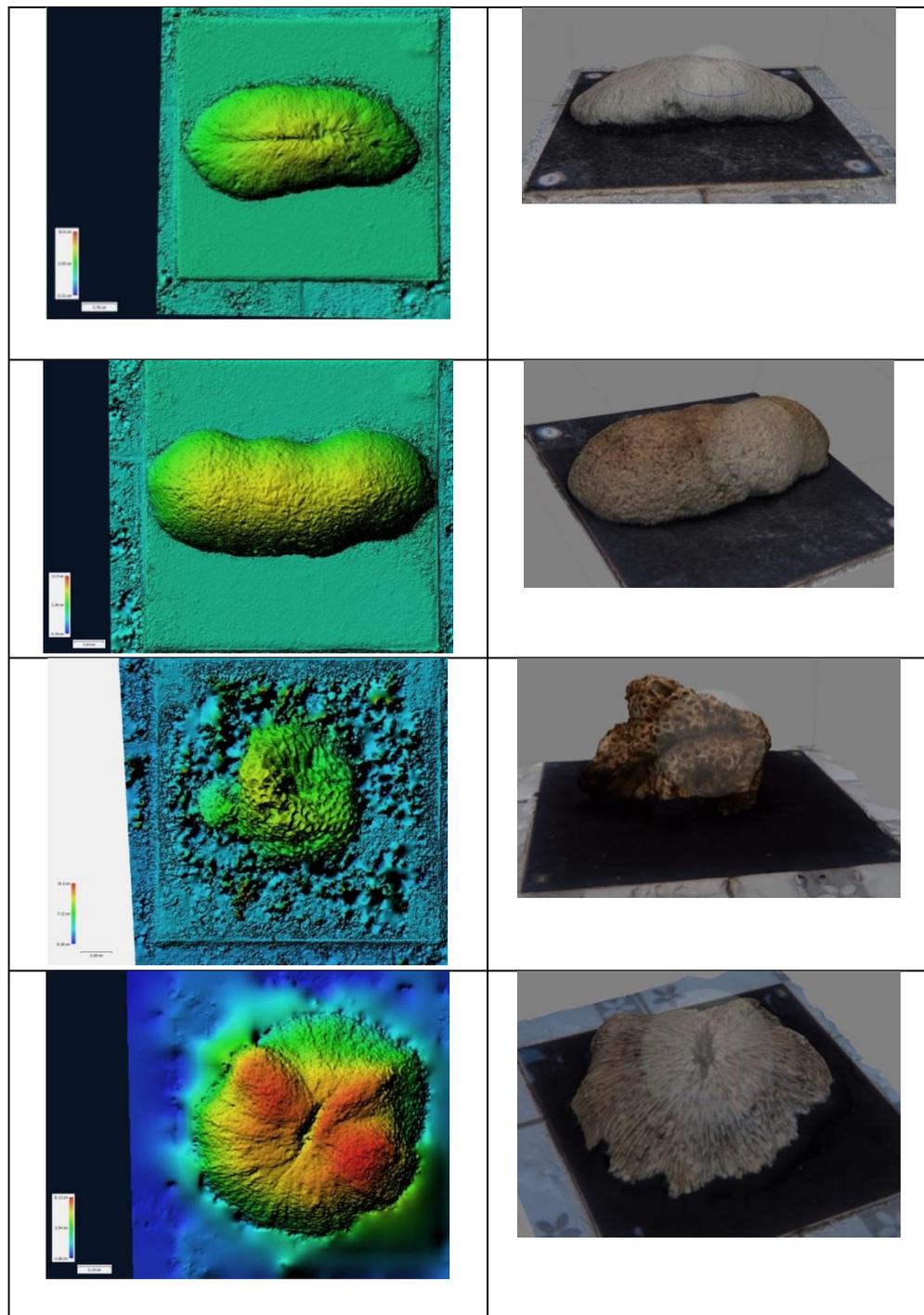
Sampel terumbu karang juga dilakukan perhitungan volume karang menggunakan prinsip archimedes, karena prinsip ini yang dipergunakan untuk menghitung volume benda yang tidak beraturan (Abdullah, Siswantoro, and Omid 2014; Carter and Gregorich 2006; Siswantoro, Satria, and Abdulah 2013).

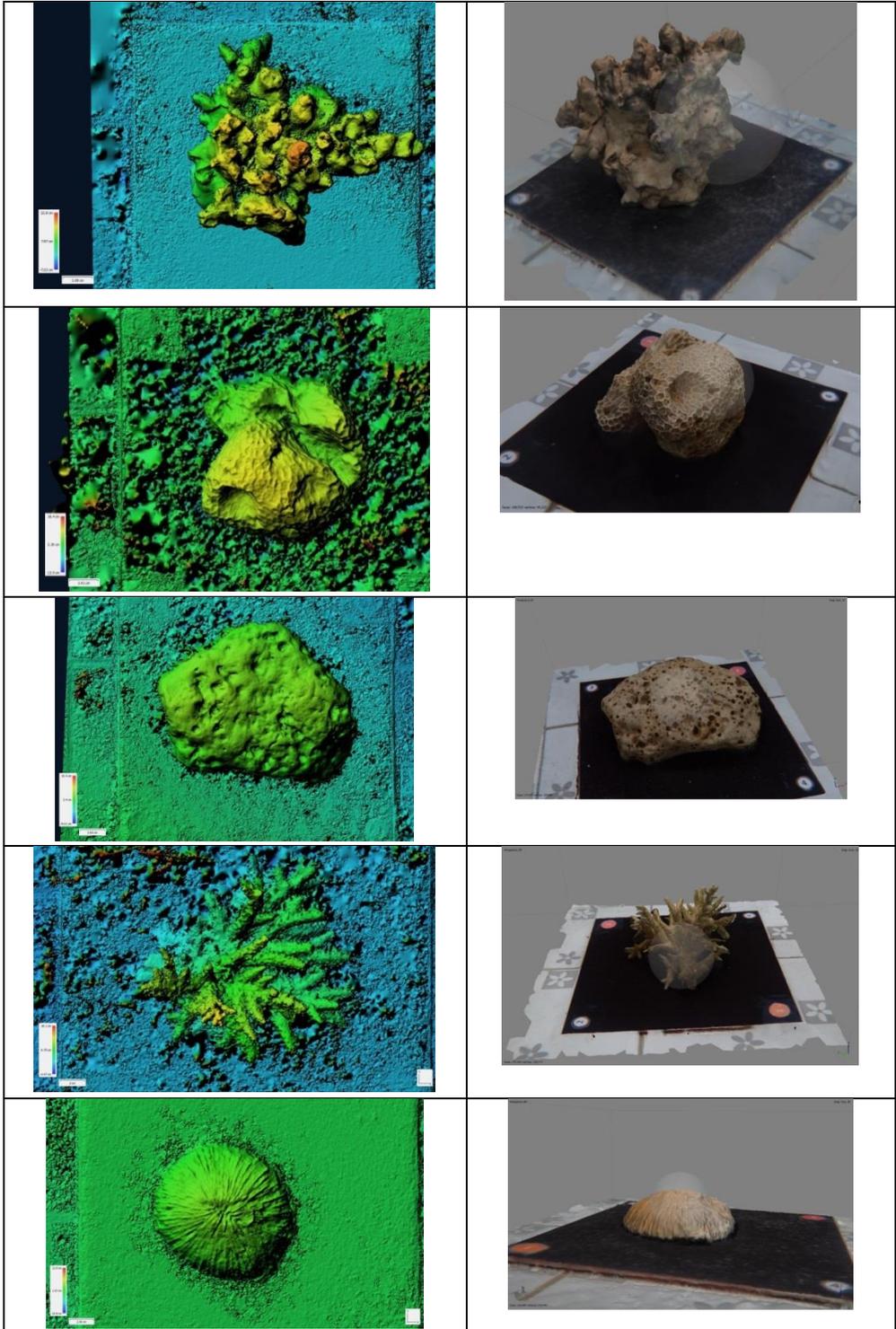
$$V_{sample} = V_{water} = \frac{M_{sample(air)} - M_{sample(water)}}{\rho_{water}} = \frac{M_{water}}{\rho_{water}}$$

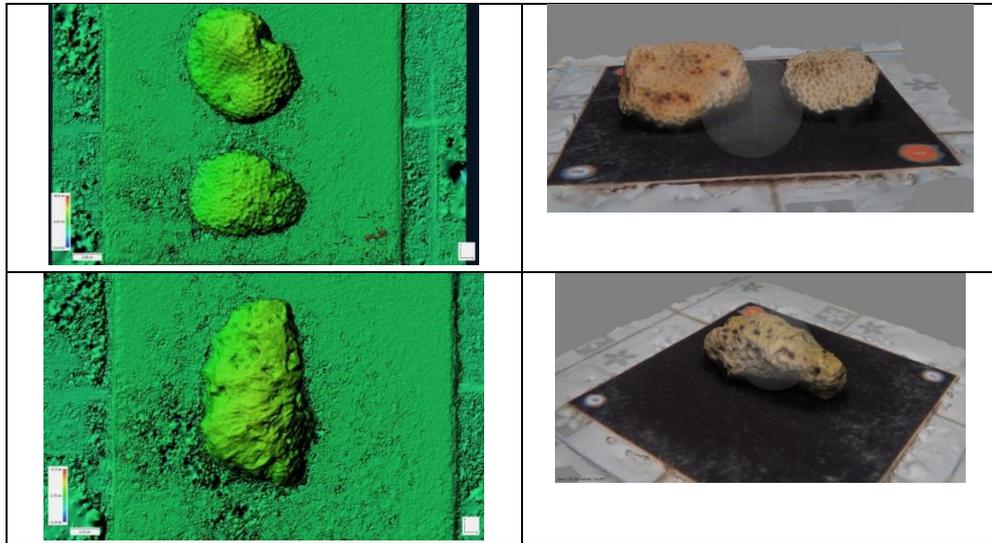
Dimana : V_{water} adalah volume air yang dipindahkan oleh sampel, M_{water} massa air yang dipindahkan oleh sampel, $M_{sample(air)}$ massa sampel yang diukur di udara, $M_{sample(water)}$ massa sampel yang diukur dalam air, dan ρ_{water} kerapatan air pada suhu sekita (air tawar 1 g/cm³) (Carter and Gregorich 2006)

Perhitungan menggunakan foto 3D dan prinsip archimedes dihubungkan untuk mendapatkan model yang paling sesuai untuk estimasi volume karang dengan pendekatan model regresi. Volume hasil pendekatan regresi ini kemudian dilakukan uji akurasi menggunakan RMSE (Hatcher et al. 2020). Selanjutnya model diuji coba di Pulau Gili Labak. Uji coba model menggunakan metode foto 3D Coral Photogrammetry (CP) yang dilakukan dengan menyelam SCUBA menggunakan kamera bawah air (Ahmad et al. 2020).

Foto 3D pada sampel karang sebanyak 11 sampel. Foto dilakukan di dalam air dan di daratan, untuk membandingkan hasil 3D baik di dalam air atau di darat. Pengambilan gambar dilakukan pada seluruh permukaan karang (Fukunaga et al. 2020). Rata-rata jumlah foto pada masing-masing sampel karang sebnyak 75-82 gambar. Selanjutnya hasil foto dianalisis menggunakan software Agisoft Metashape (Kabiri et al. 2020; de Oliveira et al. 2021). Hasil analisis fostware mendapatkan gambar 3D terumbu karang baik di dalam air dan di daratan (Gambar 9).







Gambar 9. Hasil analisis foto 3D terumbu karang menggunakan software Agisoft Metashape

Foto dianalisis 3D dengan software agisoft Metashape 1.7.4, mendapatkan nilai RMSE control point. Hasil analisis foto 3D didapatkan rata-rata RMSE terumbu karang untuk foto dalam air dengan foto rata-rata sebanyak 75 foto, rata-rata X error 0,3741 mm, Y error 0,3464 mm, Z error 0,2281 mm, XY error 0,5234 dan total error mencapai 0,5873 mm. Sedangkan untuk foto karang di daratan, rata-rata foto sebanyak 82, rata-rata X error 0,1737 mm, Y error 0,4399 mm, Z error 0,1499 mm, XY error 0,4782 dan total error mencapai 0,5109 mm. Hal ini menunjukkan bahwa error hasil foto 3D dalam air tidak sampai 1 mm dan error untuk hasil 3D di daratan lebih kecil dibandingkan dengan didalam air. Bahwa pengaruh air yang bisa menyebabkan distorsi pada kamera. Dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Tabel RMSE control point pada hasil analisis foto 3D di dalam air

No Karang	Jumlah Foto	RMSE dalam air				
		X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
1	82	0.4649	0.1302	0.1493	0.4828	0.5054
2	87	0.3157	0.2231	0.0395	0.3865	0.3885
3	90	0.0776	0.1172	0.0493	0.1405	0.1489
4	65	0.2546	0.2611	0.3806	0.3646	0.5271
5	71	0.1889	0.1575	0.0866	0.2459	0.2607
6	73	0.5786	0.2649	0.0038	0.6363	0.6363
7	101	0.2008	0.4299	0.0888	0.4745	0.4828

No Karang	Jumlah Foto	RMSE dalam air				
		X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
8	95	1.5899	1.6008	1.6021	2.2562	2.7672
9	100	0.1805	0.3885	0.0925	0.4284	0.4383
10	59	0.4668	0.2948	0.2590	0.5521	0.6098
11	53	0.2266	0.2503	0.1389	0.3377	0.3651
12	44	0.1093	0.1367	0.0209	0.1750	0.1762
13	56	0.2089	0.2479	0.0535	0.3242	0.3286
Rata-rata	75	0.3741	0.3464	0.2281	0.5234	0.5873

Perhitungan Konversi Volume Foto 3D ke Volume Karang

Perhitungan karang menggunakan prinsip Archimedes (Carter and Gregorich 2006). Hasil volume karang dengan perhitungan prinsip Archimedes dan volume karang dari foto 3D baik di dalam air dan didaratkan dapat dilihat pada tabel 8.

Orientasi koloni karang yang digunakan untuk menghitung volume didasarkan pada proyeksi ortografisnya, sedangkan orientasi pertumbuhan tergantung pada karakteristik lingkungan (yaitu kompleksitas habitat, kemiringan, bidang cahaya), sehingga mendorong kemungkinan bias dalam perkiraan. (Urbina-Barreto et al. 2021).

Tabel 8. Volume karang menggunakan prinsip Archimedes dan volume hasil analisis foto 3D

No Karang	Pengukuran Volume dengan prinsip Achimedes (cm ³)rata-rata	Volume Foto 3D dalam air (cm ³)*	Volume Foto 3D di darat (cm ³)*
1	512.7	1041.0	1271.0
2	923.3	1157.0	1873.0
3	633.3	944	1222.0
4	693.3	1443.0	2370.0
5	1583.3	3369.0	3358.0
6	955.2	1423.0	1317.0
7	1234.8	2117.0	2498.0
8	105.8	313.0	297.0
9	493.9	694.0	770.0
10	158.8	355.0	375.0
11	352.8	609.0	525.0

* volume 3D hasil analisis menggunakan software Agisoft Metashape.

Volume hasil analisis foto 3D menggunakan software agisoft Metashape tidak bisa langsung dianggap volume terumbu karang. Hal ini dikarenakan terumbu karang yang mempunyai bentuk yang kompleks, yaitu: Bagian bawah terumbu karang yang cekung, dimana bagian ini tidak akan terlihat dalam model foto 3D; terumbu karang memiliki rongga-rongga kecil pada strukturnya, dimana bagian ini juga tidak terbaca pada foto 3D dalam memperhitungkan volume. Oleh karena itu diperlukan konversi untuk meminimalisir error kesalahan perhitungan volume terumbu karang. konversi dilakukan dengan pendekatan regresi. Urbina-Barreto et al., (2021) model regresi memiliki akurasi tinggi untuk memprediksi volume metrik 3D dari metrik 2D. Hasil regresi linier dan non linier pada tabel 9.

Tabel 9. Regresi linier dan non linier volume Archimedes dengan volume foto 3D (b) di dalam air, (b) didaratan

Keterangan	Foto 3D dalam Air	Foto 3D di Darat
Linier	$y = 0.4835x + 103.34$ $R^2 = 0.9039$ RMSE =269 cm ³ N=20 %RMSE=21.5%	$y = 0.4023x + 78.067$ $R^2 = 0.8035$ RMSE =172.8 cm ³ N=11 %RMSE=24.9%
Logarithmic	$y = 603.19\ln(x) - 3458$ $R^2 = 0.9176$ RMSE =324.3 cm ³ N=20 %RMSE=25.9%	$y = 474.1\ln(x) - 2670.4$ $R^2 = 0.7455$ RMSE =200.5 cm ³ N=11 %RMSE=28.8%
Polynomial	$y = -0.0001x^2 + 0.8487x - 117.25$ $R^2 = 0.9446$ RMSE =361.9 cm ³ N=20 %RMSE=28.9%	$y = 2E-05x^2 + 0.3246x + 123.38$ $R^2 = 0.8057$ RMSE =277.4 cm ³ N=11 %RMSE=39.9%
Power/ geometrik	$y = 0.2556x^{1.1119}$ $R^2 = 0.9186$ RMSE =324.3 cm ³ N=20 %RMSE=25.9%	$y = 0.7002x^{0.9398}$ $R^2 = 0.8703$ RMSE =173.8 cm ³ N=11 %RMSE=25.0%

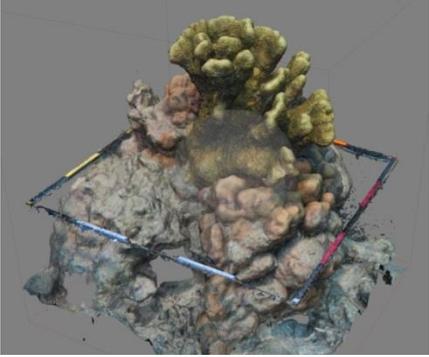
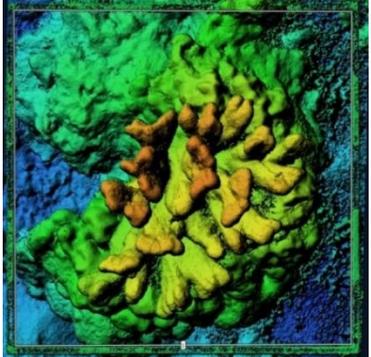
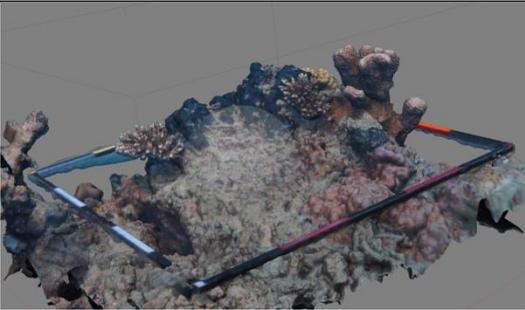
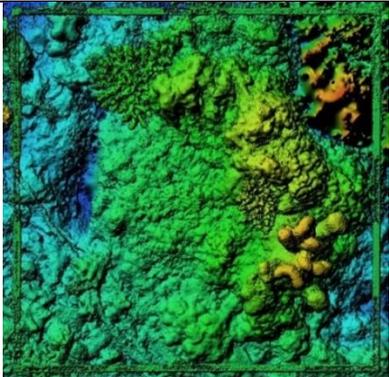
Hasil persamaan pada tabel 2 menunjukkan bahwa model volume 3D yang mempunyai akurasi paling tinggi untuk foto di dalam air adalah model regresi linier, dengan persamaan $y = 0.4835x + 103.34$, nilai $R^2 = 0.9039$, RMSE 269 cm³, dan % RMSE=21.5%. Sedangkan untuk foto 3D di daratan

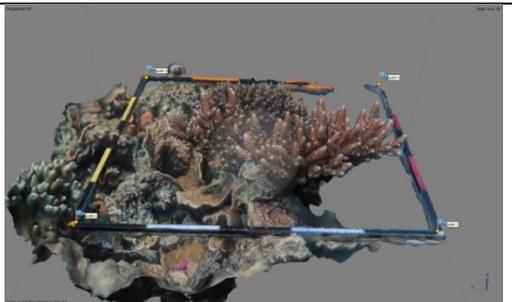
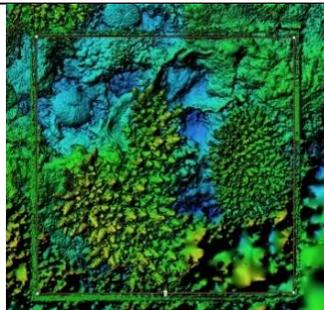
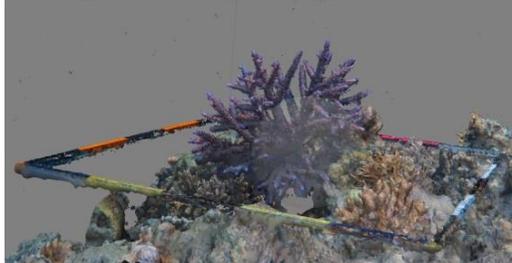
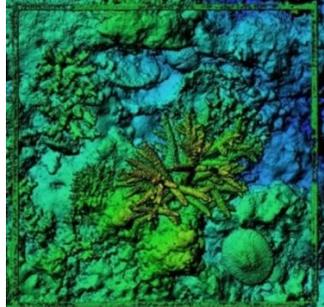
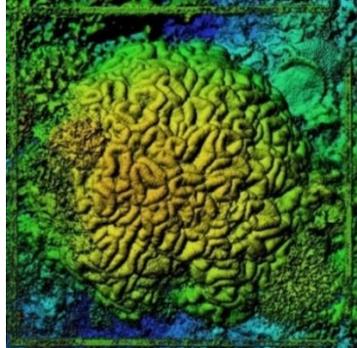
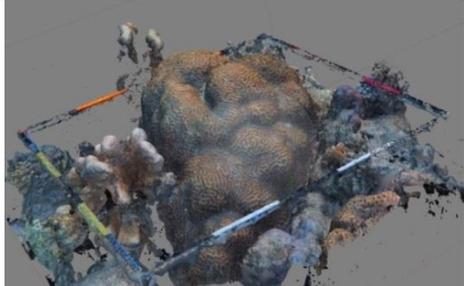
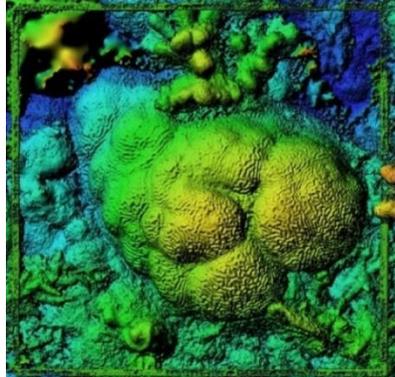
adalah model regresi linier, dengan persamaan $y = 0.4023x + 78.067$, nilai R^2 0.8035, RMSE 172.8 cm³, % RMSE=24.9%. Urbina-Barreto et al., (2021) melakukan model linier memiliki akurasi tinggi untuk memprediksi volume metrik 3D dari metrik 2D mendapatkan R^2 0,96. Hasil penelitian ini masih tinggi jika dibandingkan dengan penelitian Figueira et al., (2015) yang mendapatkan metrik untuk karang botol 10% di rugositas permukaan.

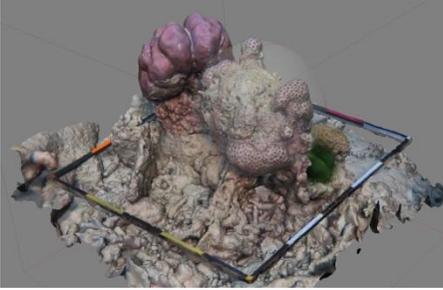
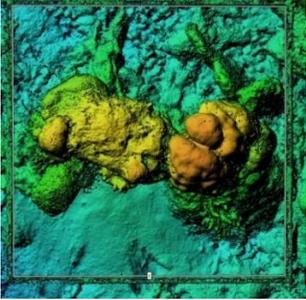
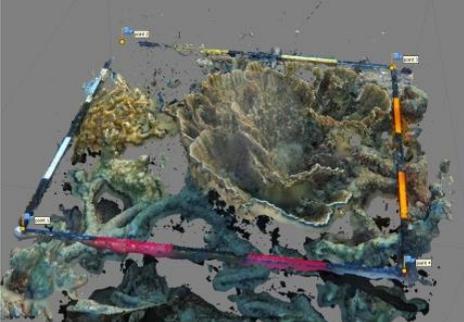
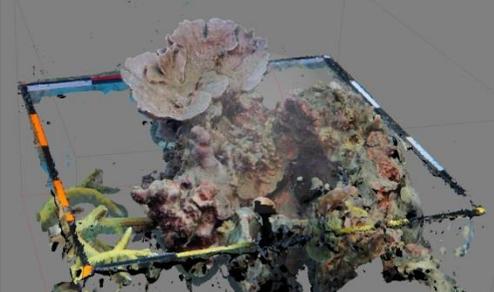
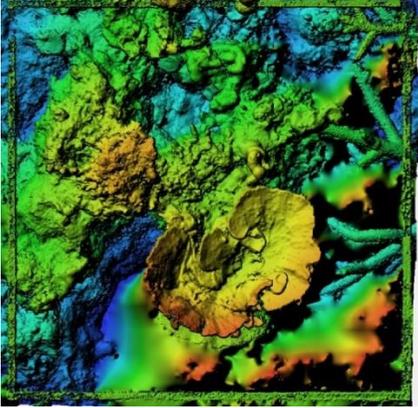
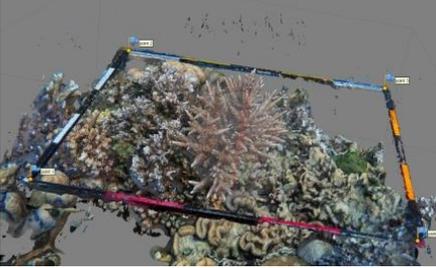
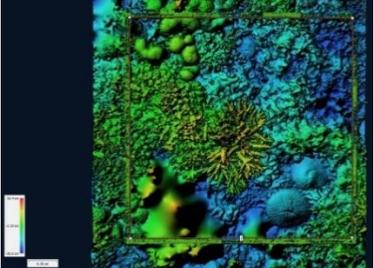
Pengambilan Data Terumbu Karang 3D di Pulau Gili Labak untuk Estimasi Volume

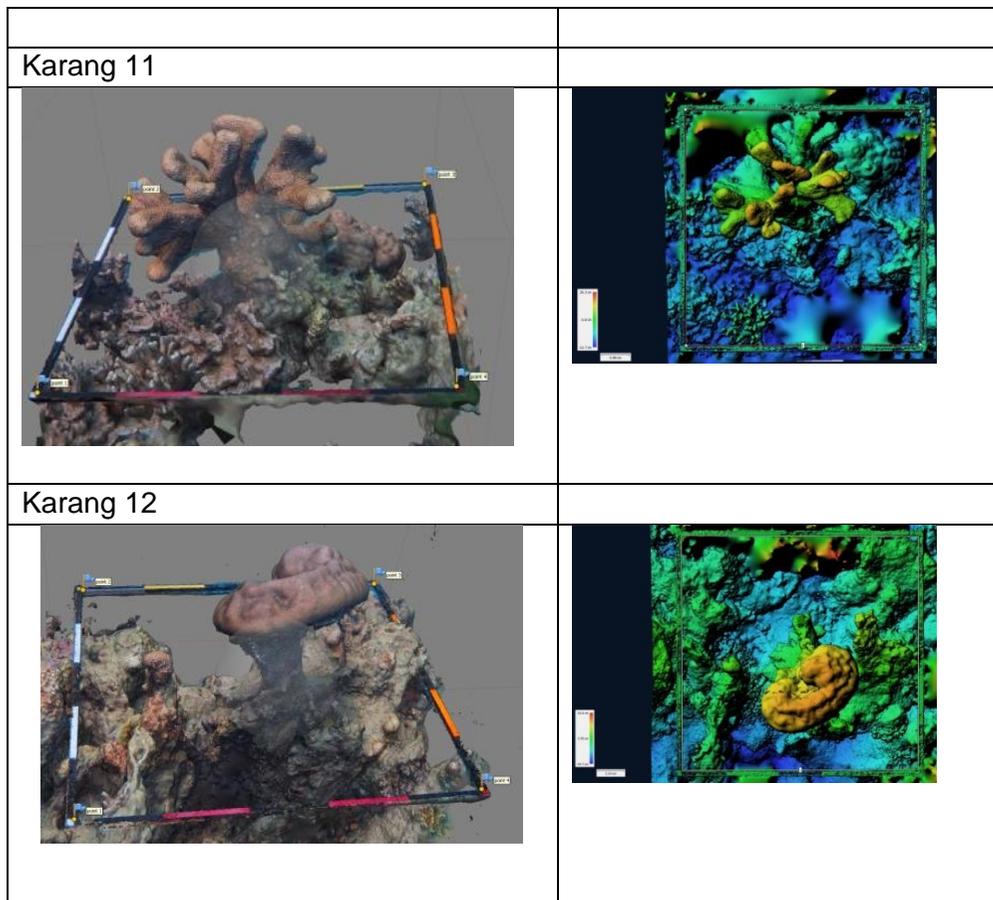
Model dilakukan uji coba di Pulau Gili Labak, pengambilan data foto dilakukan dengan penyelaman. Plot yang dipergunakan 50x50 cm atau 2500 cm². Hasil foto terumbu karang dilakukan analisis untuk mendapatkan data volume karang menggunakan software Agisft Metashape 1.7.4. Hasil analisis 3D dapat dilihat pada gambar 10.

Volume terumbu karang di Pulau Gili Labak didapatkan dengan mengkonversi volume foto 3D karang di lapang dengan menggunakan model persamaan regresi linier $y = 0.4835x + 103.34$, $R^2 = 0.9039$. Dihasilkan volume rata-rata volume karang di Pulau Gili Labak 6,780.7cm³/plot dan total volume karang untuk 12 plot sebesar 81,368.6cm³.

Karang 1.	
	
Karang 2	
	

Karang 3	
	
Karang 4	
	
Karang 5	
	
Karang 6	
	

Karang 7	
 A 3D model of a coral specimen, labeled 'Karang 7'. The model shows a complex, branching structure with a prominent, rounded, purple-colored part at the top. A rectangular frame with colored markers (red, blue, yellow) is overlaid on the model to indicate its dimensions.	 A 3D topographic map of the Karang 7 specimen. The map uses a color gradient from blue (low elevation) to yellow and red (high elevation) to represent the depth and structure of the coral. A rectangular frame is overlaid on the map.
Karang 8	
 A 3D model of a coral specimen, labeled 'Karang 8'. The model shows a large, flat, circular structure with a central depression. A rectangular frame with colored markers is overlaid on the model.	
Karang 9	
 A 3D model of a coral specimen, labeled 'Karang 9'. The model shows a large, flat, circular structure with a central depression. A rectangular frame with colored markers is overlaid on the model.	 A 3D topographic map of the Karang 9 specimen. The map uses a color gradient from blue to red to represent the depth and structure of the coral. A rectangular frame is overlaid on the map.
Karang 10	
 A 3D model of a coral specimen, labeled 'Karang 10'. The model shows a complex, branching structure. A rectangular frame with colored markers is overlaid on the model.	 A 3D topographic map of the Karang 10 specimen. The map uses a color gradient from blue to red to represent the depth and structure of the coral. A rectangular frame is overlaid on the map.



Gambar 10. Hasil analisis foto 3D terumbu karang di Pulau Gili Labak.

Tabel 10. Volume Foto 3D hasil software Agisoft dan Volume konversi karang menggunakan model regresi linier

N O	Volume Foto 3D hasil analisis Agisoft (cm ³)	Volume estimasi karang dengan model regresi linier (cm ³)
1	32,719.0	15,923.0
2	13,727.0	6,740.3
3	5,228.0	2,631.1
4	4,992.0	2,517.0
5	34,433.0	16,751.7
6	3,103.0	1,603.6
7	21,831.0	10,658.6
8	3,060.0	1,582.9
9	25,551.0	12,457.2
10	2,052.0	1,095.5

N O	Volume Foto 3D hasil analisis Agisoft (cm ³)	Volume estimasi karang dengan model regresi linier (cm ³)
1 1	7,389.0	3,675.9
1 2	11,641.0	5,731.8
	Mean	6,780.7
	Standard Error	1,657.3
	Standard Deviation	5,741.0
	Kurtosis	-0.9
	Skewness	0.8
	Range	15,656.2
	Minimum	1,095.5
	Maximum	16,751.7
	Sum	81,368.6
	Count	12.0
	Confidence Level(95.0%)	3,647.6

Mengukur koloni karang hingga bentang terumbu merupakan langkah mendasar untuk memperkirakan potensi ekosistem untuk mendukung keanekaragaman hayati (Urbina-Barreto et al. 2021). Metode pemantauan terumbu karang sebagian besar bergantung pada tutupan dan kelimpahan karang 1D atau 2D yang mengabaikan perubahan aspek ekologis dari terumbu, karena tidak memasukkan informasi vertikal atau volumetri (House et al. 2018). Studi ini mencari hubungan antara metrik 2D dan 3D dari ukuran karang. Luas permukaan dan skala volume konsisten dengan luas bidang. Pendekatan fotogrametri menggunakan perangkat lunak untuk memperkirakan kemampuan fotogrametri untuk estimasi pengukuran karang dalam 3D. Perkembangan teknologi fotogrametri sebagai teknik yang valid dan praktis untuk mempelajari terumbu karang (House et al. 2018).

Sangat penting untuk menilai akurasi dan presisi pengukuran fotogrametri untuk mendukung penerapannya dalam pemetaan, pemantauan dan kuantifikasi bentuk dan struktur terumbu karang. Studi ini mengevaluasi presisi dan akurasi geometri dan kompleksitas struktural yang berasal dari model 3D fotogrametri habitat bentik laut (Figueira et al. 2015). Pengukuran 3D karang merupakan studi kuantitatif yang akurat tentang fisiologis koloni karang dalam berbagai ukuran dapat dilakukan secara in situ. Teknik ini juga bisa untuk pengukuran morfometrik seperti jarak cabang, kepadatan, panjang cabang, dan sudut cabang spesies bercabang. Pendekatan 3 dimensi (3D) secara akurat mengukur kompleksitas arsitektur, topografi, rugositas, volume,

dan karakteristik struktural lainnya yang memainkan peran penting dalam ekosistem (Burns et al. 2015).

Bidang ekologi terumbu karang telah mengakui kompleksitas sebagai komponen penting dari keanekaragaman dan produktivitas ekosistem (Dustan, Doherty, and Pardede 2013). Teknik rekonstruksi 3D untuk membuat model resolusi tinggi dari habitat terumbu karang dipengaruhi keanekaragaman hayati dan kelimpahan organisme terumbu terkait. (Burns et al. 2016). Karang yang kompleks tidak dapat dimodelkan secara memadai dengan teknik ini, karena tidak mungkin memperoleh foto yang lengkap dari semua permukaan. Teknik ini merupakan cara non-invasif untuk mendapatkan pengukuran geometris karang yang akurat objek tidak teratur lainnya di bawah air (Bythell and Pan 2001). Hasil penelitian ini juga menunjukkan nilai RMSE mencapai 25,9 % yang tidak terlalu baik. Sedangkan Hatcher et al., (2020) mencapai RMSE relatif 0,013%.

Metode untuk mendapatkan pengukuran 3D yang akurat dari permukaan karang terbatas pada teknik yang menggunakan peralatan yang kompleks, besar, dan mahal, sehingga menyoroti kebutuhan yang jelas untuk metode non-invasif untuk mengukur luas permukaan 3D dan kompleksitas karang in situ (Bythell and Pan 2001). Pada penelitian ini menunjukkan bahwa metode survei menggunakan kamera aksi murah untuk fotogrametri karang 3D akan memberikan hasil yang sesuai dalam hal deteksi bentuk kehidupan karang. Secara hipotesis, dengan meningkatkan kualitas kamera, akan menghasilkan akurasi yang lebih tinggi dari gambar karang 3D yang cocok untuk digunakan dalam penelitian. Studi masa depan dengan survei karang 3D menggunakan kendaraan yang dioperasikan dari jarak jauh, waktu lapangan yang lebih sedikit, dan informasi dasar laut karang 3D (Ahmad et al. 2020). Selain itu metode yang disajikan dalam penelitian ini memberikan pendekatan hemat biaya dan waktu untuk merekonstruksi koloni karang dan mengukur fitur 3D rumit yang terkait dengan morfologi karang tertentu (Burns et al. 2015).

Pengembangan metode baru dalam penelitian terumbu karang makin beragam, hal ini demi mempermudah seorang peneliti. Peneliti mengembangkan sebuah metode untuk mempermudah peneliti karang yang tidak memiliki keahlian secara langsung dalam mengidentifikasi terumbu karang di dalam laut, sehingga nantinya peneliti dapat mengolah data dan mengidentifikasi terumbu karang di darat tanpa harus mengidentifikasi secara langsung di lapangan. Sama halnya seperti metode 3D yang digunakan dalam penelitian ini, salah satu kelebihan dalam menggunakan metode ini adalah mendapatkan data yang lebih terkontrol dan bisa dicek kembali kebenarannya serta mendapatkan data volume terumbu karang yang

belum didapatkan pada metode-metode sebelumnya. Pemodelan 3D adalah penyajian data yang paling efektif untuk menggambarkan kerusakan pada terumbu karang. Metode akustik pada saat ini banyak digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek bawah laut. Sistem akustik sangat efektif untuk mengeksplorasi lingkungan bawah laut (Blondel, 2009).

Studi ini memanfaatkan kemajuan teknologi untuk mengidentifikasi volume pada koloni karang *massive* dengan 3D, Perkembangan teknologi fotogrametri sebagai teknik yang valid dan praktis untuk mempelajari terumbu karang. Pendekatan yang muncul, menggunakan fotogrametri bawah air untuk membuat model digital koloni karang, menyediakan cara baru dan non-invasif untuk mengeksplorasi pola pertumbuhan skala koloni dan untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan yang ada (Lange dan Perry, 2020). Tantangan terpenting dalam ekologi terumbu karang adalah untuk memperkirakan kelimpahan dan komposisi komunitas yang berada di ekosistem yang kompleks tersebut (Kornder et al. 2021). Veal *et al.*, (2010); Bryson *et al.*, (2017) menjelaskan struktur Parameter permukaan terumbu dan organisme terbukti mempunyai akurasi yang relatif tinggi menggunakan fotogrametri dalam kombinasi dengan underwater fotogrametri. Teknik ini menggunakan serangkaian gambar yang tumpang tindih, diambil dari berbagai perspektif untuk merekonstruksi struktur 3D terumbu karang dan organisme pembentuk habitat pada resolusi dan akurasi tinggi (Bryson et al. 2017).

Volume hasil analisis foto 3D menggunakan software agisoft Metashape tidak bisa langsung dianggap volume terumbu karang. Hal ini dikarenakan terumbu karang yang mempunyai bentuk yang kompleks, yaitu: Bagian bawah terumbu karang yang cekung, dimana bagian ini tidak akan terlihat dalam model foto 3D; terumbu karang memiliki rongga-rongga kecil pada strukturnya, dimana bagian ini juga tidak terbaca pada foto 3D dalam memperhitungkan volume. Oleh karena itu diperlukan konversi untuk meminimalisir error kesalahan perhitungan volume terumbu karang. Konversi dilakukan dengan pendekatan regresi. Menguji akurasi dan presisi sangat penting pada setiap penelitian tak terkecuali pada underwater fotogrametri terumbu karang. Penelitian ini menguji akurasi dan presisi geometri yang berasal dari model 3D terumbu karang *Massive*. Pengukuran 3D karang merupakan studi kuantitatif yang akurat tentang fisiologis koloni karang dalam berbagai ukuran. Penelitian ini juga menyertakan hasil uji %RMSE dengan nilai 18,1% dan nilai MAPE 19,1691 sedangkan studi yang dilakukan oleh (Hatcher et al. 2020) mencapai RMSE relatif 0,013%, nilai tersebut masih menghasilkan nilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil penelitian (Figueira et al. 2015) yang mendapatkan hasil 10 % dari pengukuran karang botol, dan Urbina-Barreto *et al.*, (2021) melakukan model linier memiliki

akurasi tinggi untuk memprediksi volume metrik 3D dari metrik 2D mendapatkan R^2 0,96.

Fotogrametri awalnya dikembangkan dan diterapkan pada pengaturan terestrial, tetapi juga menjadi alat penting untuk membuat model 3D batimetri dan habitat bawah air. Karang yang kompleks tidak dapat dimodelkan secara memadai dengan teknik ini, karena tidak mungkin memperoleh foto yang lengkap dari semua permukaan. Teknik ini merupakan cara non-invasif untuk mendapatkan pengukuran geometris karang yang akurat objek tidak teratur lainnya di bawah air (Bythell dan Pan, 2001). Orientasi koloni karang yang digunakan untuk menghitung volume didasarkan pada proyeksi ortografisnya (Urbina-Barreto *et al.*, 2021), sedangkan orientasi pertumbuhan tergantung pada karakteristik lingkungan (yaitu kompleksitas habitat, kemiringan, bidang cahaya), sehingga mendorong kemungkinan bias dalam perkiraan. Bidang ekologi terumbu karang telah mengakui kompleksitas sebagai komponen penting dari keanekaragaman dan produktivitas ekosistem (Dustan *et al.*, 2013). Teknik rekonstruksi 3D untuk membuat model resolusi tinggi dari habitat terumbu karang dipengaruhi keanekaragaman hayati dan kelimpahan organisme terumbu terkait (Burns *et al.* 2016).

Metode untuk mendapatkan pengukuran 3D yang akurat dari permukaan karang terbatas pada teknik yang menggunakan peralatan yang kompleks, besar, dan mahal, sehingga menyoroti kebutuhan yang jelas untuk metode non-invasif untuk mengukur luas permukaan 3D dan kompleksitas karang in situ (Bythell dan Pan, 2001). Penelitian ini menunjukkan bahwa survei menggunakan kamera murah untuk fotogrametri karang akan memberikan hasil yang sesuai dalam hal deteksi bentuk kehidupan karang. Secara hipotesis, dengan meningkatkan kualitas kamera, akan menghasilkan akurasi yang lebih tinggi dari gambar karang 3D yang cocok untuk digunakan dalam penelitian. (Ahmad *et al.*, 2020) menjelaskan studi masa depan survei terumbu karang 3D akan banyak menggunakan kendaraan yang dioperasikan dari jarak jauh, waktu lapangan yang lebih sedikit, dan informasi dasar laut karang dengan 3D. Selain itu metode yang disajikan dalam penelitian ini memberikan pendekatan hemat biaya dan waktu untuk merekonstruksi koloni karang dan mengukur fitur 3D yang rumit terkait dengan morfologi karang tertentu (Burns *et al.*, 2015).

ESTIMASI KARBON TERUMBU KARANG

Tahapan perhitungan estimasi stok karbon karang adalah sebagai berikut :

- Pengambilan Sampel Terumbu karang, Memotong sebanyak 7 sampel karang \pm 10 gram diambil dari masing-masing terumbu karang *massive* yang di Pulau Gili Labak, Sampel karang yang diperoleh kemudian menimbang untuk menentukan bobot awal kebasahan.
- Pencucian Sampel, Mencuci sampel karang yang diambil dengan air mengalir dan menyikat, kemudian membilas kembali menggunakan aquades. Setelah dilakukan pencucian fisik, merendam sampel karang dalam air selama 12 jam kemudian merendam kembali dengan larutan HCl 10% selama 24 jam. Membilas kembali dengan air yang dilakukan secara berulang-ulang, mengeringkan sampel karang dalam oven pada suhu 80°C sampai kering, dan menimbang untuk mengetahui % berat sampel yang hilang selama proses pencucian.
- Metode Walkley and Black C-Organik, Menghaluskan sampel karang yang sudah kering hingga menjadi serbuk halus. Meimbang 0,5 gram bubuk terumbu karang, memasukkan ke dalam Erlenmeyer 100 ml, lalu menambahkan 5 ml $K_2Cr_2O_7$ 1N sambil mengocok, kemudian menambahkan 7 ml H_2SO_4 pekat dan mengocok kembali hingga homogen, mendinginkan selama 30 menit. Mengencerkan dengan aquades dan mendinginkan selama 24 jam. Setelah 24 jam sampel disaring terlebih dahulu sebelum absorbansi. Pengukuran kadar C-organik menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 561 m. (Widiastuti et al. 2021)
- Kandungan C Organik Walkley dan Black. Kandungan C organik (%) = kurva ppm x 100 / mg mis. X100 ml / 1.000 ml x fk Dimana : kurva ppm = konsentrasi yang diperoleh pada saat pengukuran pada spektrofotometer, 100 = konversi ke %, fk = faktor koreksi kadar air {100 / (100-% kadar air)} (Widiastuti et al. 2021).
- Penyimpanan karbon mengacu pada, Penyimpanan karbon = [Biomassa (g/m^3) x kandungan organik (%)]/100 Dimana: biomassa = Berat konferensi 3D terumbu karang (Widiastuti et al. 2021).

Estimasi stok karbon pada karang *massive* di ambil pada 6 sampel karang hidup di pulau Gili Labak kemudain dianalisa di laboratorium. Estimasi stok karbon pada semua plot koloni karang *massive* diambil dari hasil rata-rata C organik. Hasil estimasi stok karbon pada setiap plot karang *massive* di pulau Gili labak dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 11. Kandungan C organik dan penyimpanan karbon pada terumbu karang *massive*.

No.	C organik(%)
1	0.92
2	1.37
3	0.35
4	0.61
5	0.89
6	0.31
7	0.17

Tabel 7 menunjukkan hasil analisa stok karbon dipulau Gili labak dengan mengambil 6 sampel karang hidup untuk dihitung % C organik. Rata-rata kandungan C organik (%) yaitu 0.74 %, kemudian nilai C Organik digunakan untuk menghitung stok karbon pada karang *massive*.

Estimasi Stok Karbon Terumbu Karang di Pulau Gili Labak

Estimasi stok karbon pada 6 koloni karang *massive* diperoleh nilai rata-rata kemudian dimasukkan untuk menghitung estimasi stok karbon 32 koloni karang *massive* di pulau Gili Labak. Hasil estimasi stok karbon 32 koloni karang *massive* dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 12. Estimasi stok karbon pada setiap plot karang *massive* di pulu Gili Labak

NO.	Volume Foto 3D hasil analisis Agisoft (cm ³ /plot)	Estimasi berat karang dengan model regresi Non linier (gr/plot)	Rata-rata Corganik Karang (%)	Carbon Karang di lapang (gr/plot)
1	2951	3191.71	0.74	2361.9
2	3173	3406.42	0.74	2520.8
3	6045	6075.19	0.74	4495.6
4	39727	32924.42	0.74	24364.1
5	26236	22687.22	0.74	16788.5
6	5402	5491.86	0.74	4064.0
7	5125	5238.42	0.74	3876.4

Metode Foto 3D Underwater Untuk Terumbu Karang
Dedi Irawan., S.Si., M.Si. Dr. Firman Farid Muhsoni., S.Pi., M.Sc.

NO.	Volume Foto 3D hasil analisis Agisoft (cm ³ /plot)	Estimasi berat karang dengan model regresi Non linier (gr/plot)	Rata-rata Corganik Karang (%)	Carbon Karang di lapang (gr/plot)
8	8601	8337.39	0.74	6169.7
9	1825	2073.42	0.74	1534.3
10	2564	2813.35	0.74	2081.9
11	2093	2344.78	0.74	1735.1
12	3937	4134.27	0.74	3059.4
13	13706	12666.88	0.74	9373.5
14	1703	1948.57	0.74	1441.9
15	23181	20301.18	0.74	15022.9
16	4388	4556.98	0.74	3372.2
17	2223	2475.09	0.74	1831.6
18	2983	3222.76	0.74	2384.8
19	4112	4298.86	0.74	3181.2
20	384	511.77	0.74	378.7
21	10421	9904.99	0.74	7329.7
22	4016	4208.66	0.74	3114.4
23	7715	7562.26	0.74	5596.1
24	21	37.69	0.74	27.9
25	7036	6962.07	0.74	5151.9
26	14529	13347.55	0.74	9877.2
27	226	318.00	0.74	235.3
28	969	1174.64	0.74	869.2
29	471	614.73	0.74	454.9
30	255	354.40	0.74	262.3
31	253	351.90	0.74	260.4
32	2509	2759.12	0.74	2041.7
Rata-rata	6524.375	6134.26	0.74	4539.3

Analisis stok karbon terumbu karang *massive* di pulau Gili Labak yang di ambil dari 32 koloni karang mendapatkan nilai rata-rata volume foto 3D sebesar 6524.375 cm³, estimasi berat karang dengan pemodelan regresi non liner 2759.12, rata-rata C organik 0.74% dan stok karbon dalam setiap plot sebesar 4539.4 g/plot.

Analisis stok karbon terumbu karang *massive* di pulau Gili Labak yang di ambil dari 32 koloni karang mendapatkan nilai rata-rata 4539.4 g/plot. Terumbu karang, sebagai salah satu ekosistem laut yang paling produktif, menyerap CO₂ yang masuk ke laut untuk proses fotosintesis yang dilakukan oleh *zooxantellae* dan pembentukan kerangka kapur. *Zooxantellae* membutuhkan produk metabolisme berupa nutrisi dan CO₂ dari karang untuk fotosintesis, ditambah dengan sinar matahari sebagai sumber utamanya. Hewan karang dapat mendaur ulang karbon dioksida, yang peningkatan karbon dioksida di alam dapat meningkatkan pemanasan global. Karbon dioksida (CO₂) masuk air laut melalui proses difusi atau terbawa oleh air hujan kemudian bereaksi dengan kalsium dan ion magnesium untuk membentuk garam kalsium karbonat (CaCO₃) dan magnesium karbonat (MgCO₃). Penyerapan atau pemanfaatan CO₂ dalam jumlah yang sangat besar untuk pengapuran yang kemudian menghasilkan di terumbu karang menyebar secara vertikal dan horizontal secara luas, menjadikan terumbu karang sebagai penyerap karbon (Widiastuti et al. 2021).

Meski beberapa ahli mengklaim bahwa proses pembentukan kapur oleh hewan karang justru meningkat CO₂ dan ini masih menjadi bahan perdebatan. Kontradiksi ini terkait dengan pendapat para ahli lainnya yang menyatakan bahwa peningkatan CO di atmosfer dari 320 ppm menjadi 340 ppm justru menyebabkan pemutihan karang hampir di seluruh dunia. Namun, proses fotosintesis yang dilakukan oleh *zooxantellae* ini menghasilkan oksigen yang kemudian dikonsumsi oleh hewan karang, sedangkan CO₂ dihasilkan dari respirasi hewan karang yang merupakan pemasok utama karbon. Pasokan karbon ini tidak hanya datang dari respirasi hewan karang, tetapi juga berasal dari lingkungan eksternal yang digunakan oleh karang hewan untuk fotosintesis dan pengapuran (Widiastuti et al. 2021).

PENERAPAN METODE 3D DENGAN AREA LUAS

Penerapan model tersebut untuk area yang lebih luas pada wilayah yang lebih luas pada Plot A dan Plot B.

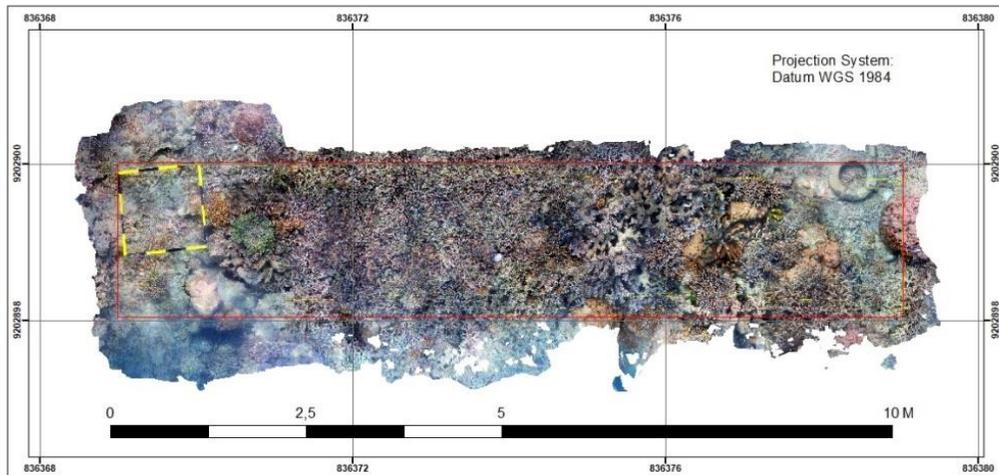
Area Terumbu Karang Plot A.

Area Plot A pengambilan data dengan rincian sebagai berikut : banyaknya foto 497 buah, ketinggian rata-rata kamera 1,29 m, resolusi kamera 0,33 mm/pix, luas area 31,6 m², dengan spesifikasi kamera yang dipergunakan TG-6 (4,5mm), resolusi 4000x3000, pixel size 1,5x1,5 μm. Ground Control Point ada 4 titik dan dihasilkan RMSE control point tabel 13. Hasil analisis menggunakan software Agisoft Metashape Professional version 1.7.4. Peta hasil analisis dapat dilihat pada gambar 11. Posisi kamera dapat dilihat pada gambar 12. Hasil 3D berupa Digital Elevation Model dapat dilihat pada gambar 13. Resolusi DEM 4.56 mm/pix dan point density sebesar 4.82 points/cm².

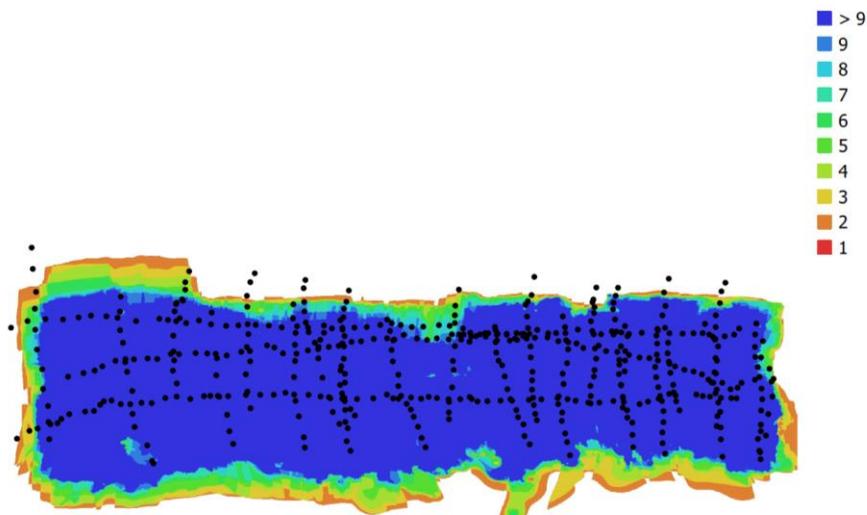
Jika luas karang dibatasi pada area 2x 10 m². Di analisis menggunakan model volume dengan persamaan regresi linier $y = 0.532x + 208.6$ didapatkan volume sebesar 4,201,945 cm³. Jika dilakukan estimasi ke dalam berat dengan persamaan regresi Power/geometri dengan persamaan $y = 1.0047x^{1.005}$, maka didapatkan berat karang pada wilayah tersebut 8,590,949 gr atau 8 ton.

Tabel 13. Control Point RMSE Plot A.

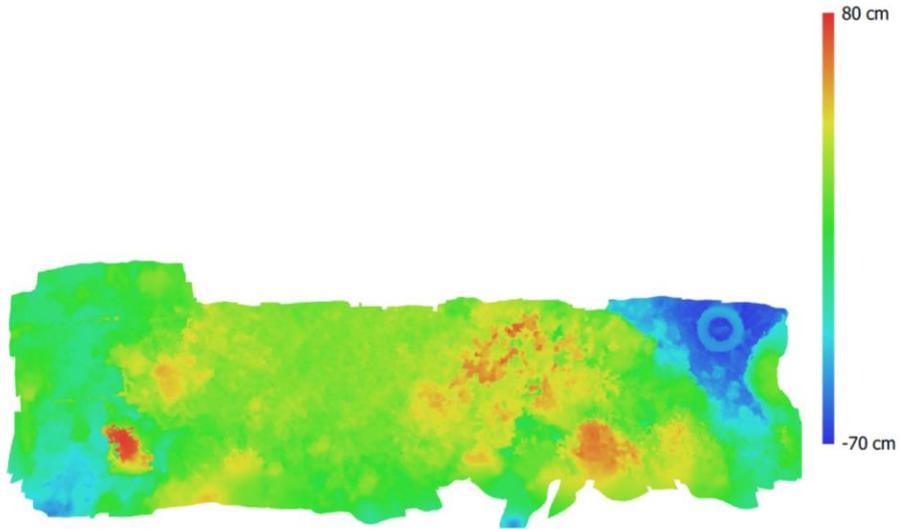
Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
4	11.1276	12.8561	10.8535	17.0031	20.1719	4.989



Gambar 11 Peta area terumbu karang 3D hasil analisis plot A



Gambar 12. Lokasi focus posisi kamera pada setiap gambar Plot A



Gambar 13. Reconstructed digital elevation model Plot A

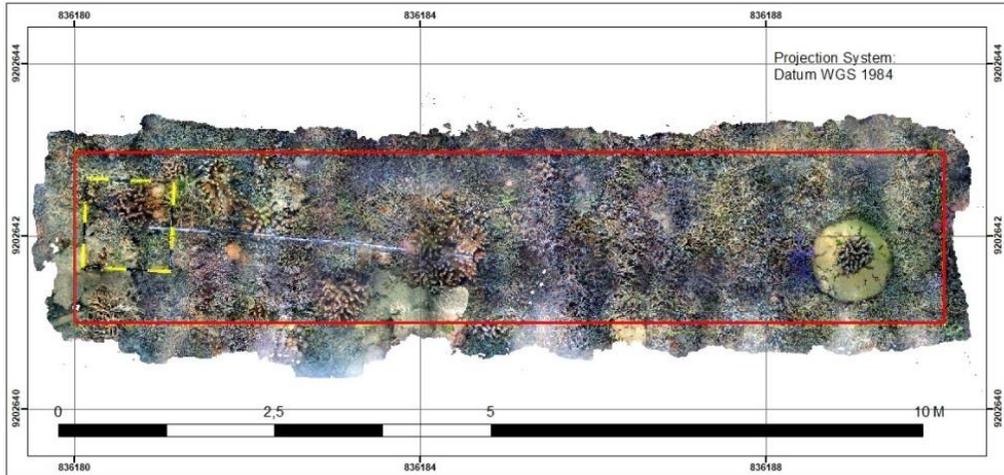
Area Terumbu Karang Plot B.

Area Plot B pengambilan data dengan rincian sebagai berikut : banyaknya foto 672 buah, ketinggian rata-rata kamera 87.9 cm, resolusi kamera 0,211 mm/pix, luas area 35,3 m², dengan spesifikasi kamera yang dipergunakan sama dengan plot A, yaitu TG-6 (4,5mm), resolusi 4000x3000, pixel size 1,5x1,5 μm. Ground Control Point ada 4 titik dan dihasilkan RMSE control point tabel 14. Hasil analisis menggunakan software Agisoft Metashape Professional version 1.7.4. Peta hasil analisis plot B dapat dilihat pada gambar 14. Posisi kamera plot B dapat dilihat pada gambar 15. Hasil 3D berupa Digital Elevation Model plot B dapat dilihat pada gambar 16. Resolusi DEM 0.843 mm/pix dan point density sebesar 1.41 points/mm².

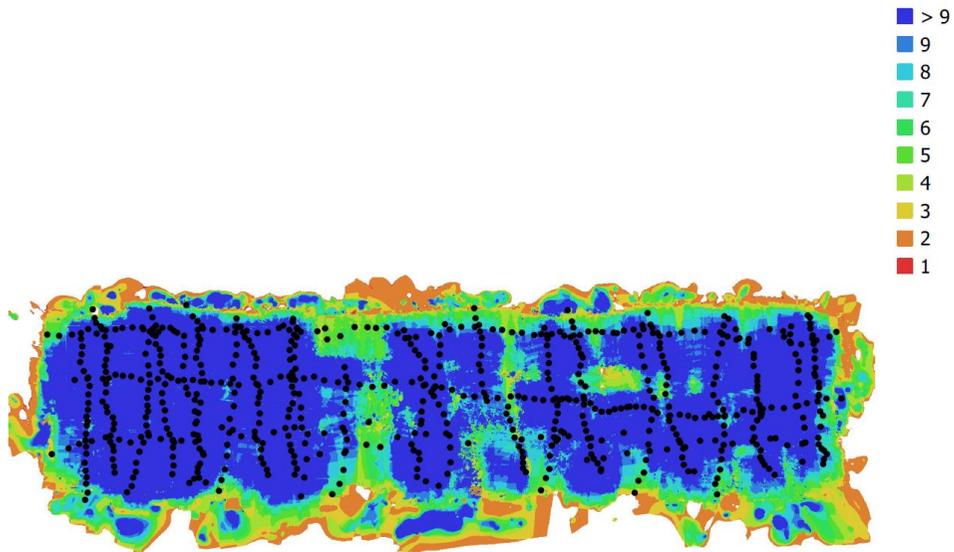
Jika luas karang pada plot B dibatasi pada area 2x 10 m² . Hasil analisis menggunakan model volume dengan persamaan regresi linier $y = 0.532x + 208.6$ didapatkan volume sebesar 396,406 cm³. Jika dilakukan estimasi ke dalam berat dengan persamaan regresi Power/geometri dengan persamaan $y = 1.0047x^{1.005}$, maka didapatkan berat karang pada wilayah tersebut 800,565 gr atau 0,8 ton.

Tabel 14. Control Point RMSE Plot B

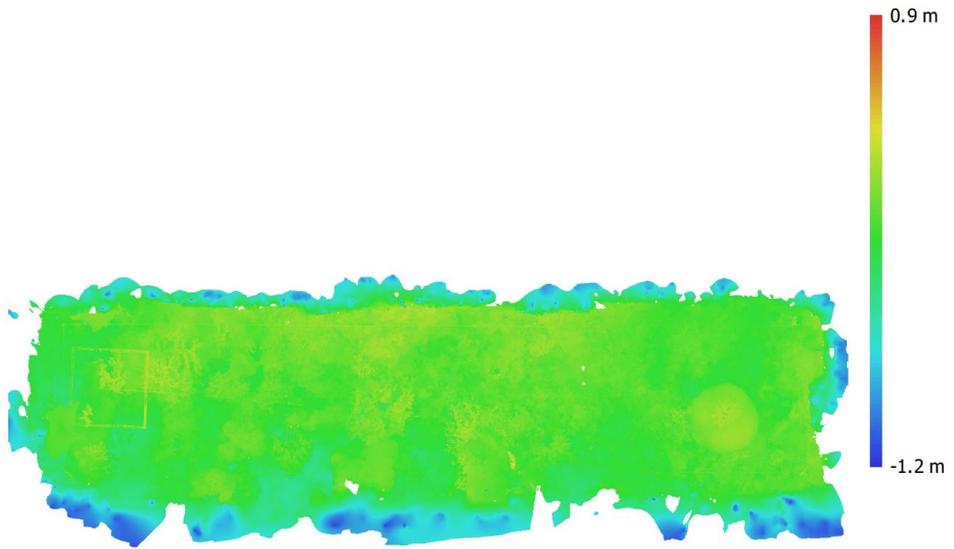
Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
4	4.87238	1.7345	3.58949	5.17191	6.29548	6.625



Gambar 14. Peta area terumbu karang 3D hasil analisis plot B



Gambar 15. Lokasi focus posisi kamera pada setiap gambar Plot B

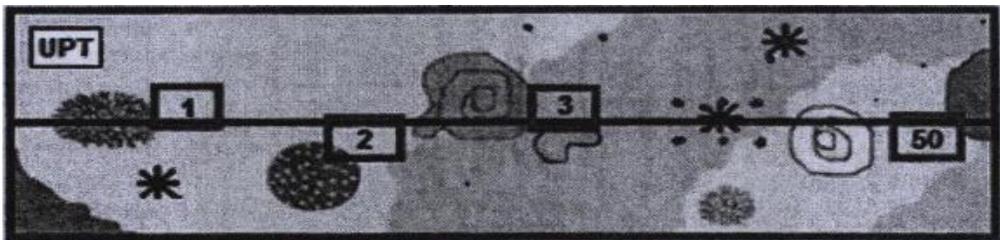


Gambar 16. Reconstructed digital elevation model Plot B

PERBANDINGAN METODE 2D DAN 3D

Terdapat beragam metode untuk penelitian terumbu karang salah satunya adalah metode UPT (*Underwater photo transect*). Giyanto (2013a, 2013b,) menjelaskan metode ini adalah metode yang memanfaatkan perkembangan teknologi kamera digital maupun teknologi piranti lunak komputer. Pengambilan foto-foto bawah air yang dilakukan dengan pemotretan menggunakan kamera digital bawah air dan menghasilkan foto 2D. Analisis data karang 2D menggunakan metode UPT (*Underwater photo transect*) menggunakan *Software CPCe*.

Metode UPT dilakukan dengan: (i) Pemotretan dilakukan tegak lurus pada jarak sekitar 60 cm dari dasar substrat, (ii) Disetiap rentan jarak 1 meter sepanjang garis transek yang telah ditentukan (iii) Pemotretan dilakukan dari meter ke-1 pada bagian sebelah kiri garis transek dilanjutkan pengambilan foto pada meter kedua di sebelah kanan. Ilustrasi pengambilan sampel tampak pada Gambar 8. Selanjutnya dilakukan analisis untuk mendapatkan prosentase tutupan karang, hasil prosentase tutupan karang dikategorikan sesuai tabel 12.



Gambar 17. Ilustrasi pengambilan data UPT (Giyanto, 2013)

Persentase tutupan terumbu karang =

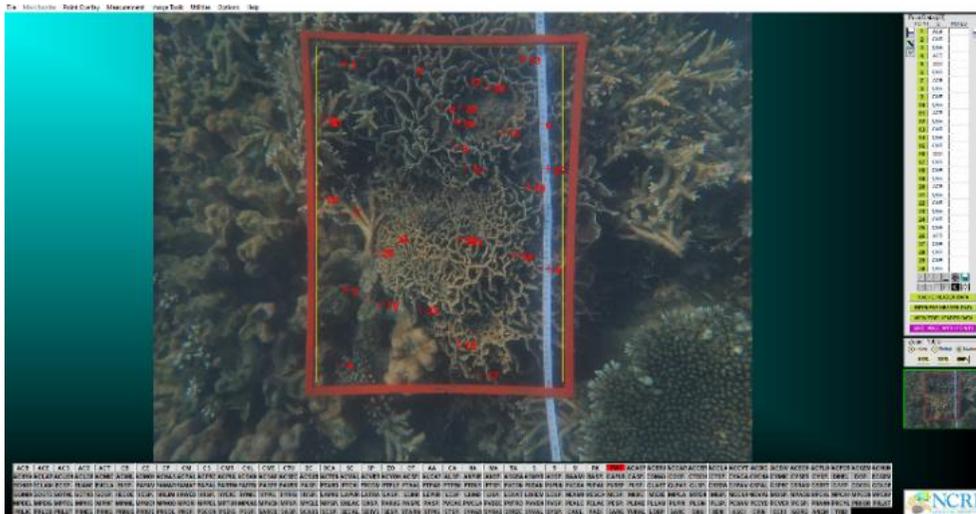
$$\frac{\text{Jumlah area kategori ke-}i}{\text{Luas area frame foto}} \times 100\% \text{ (Giyanto, 2013)}$$

Tabel 15. Kategori tutupan karang mengikuti (Gomes dan Yap 1984).

No.	Persentase (%)	Kategori
1	0-24,9	Buruk
2	25-49,9	Sedang
3	50-74,9	Baik
4	75-100	Baik Sekali

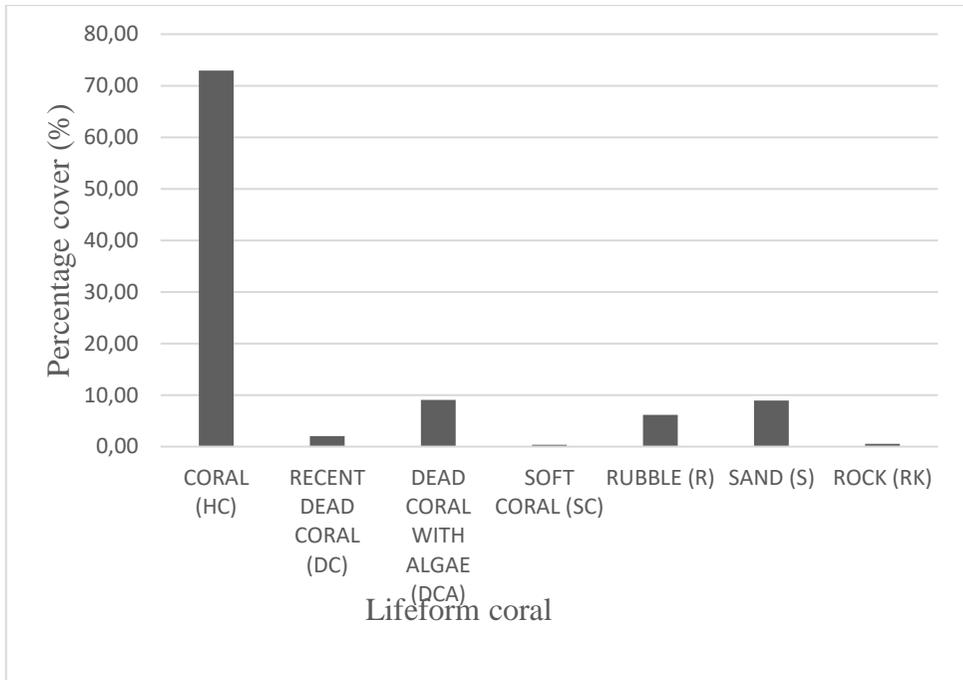
Perbandingan Metode 2D (UPT) dan Foto 3D

Metode 2 dimensi dalam penelitian ini menggunakan metode (UPT) *Underwater Photo Transect*. Pengambilan data di lapangan dengan metode Transek Foto Bawah Air (UPT) dilakukan dengan pemotretan bawah air menggunakan kamera digital bawah air. Hasil pengambilan foto bawah air dapat dilihat pada Gambar 14..



Gambar 18. Pengambilan foto 2 dimensi dan analisis dengan software CPCe

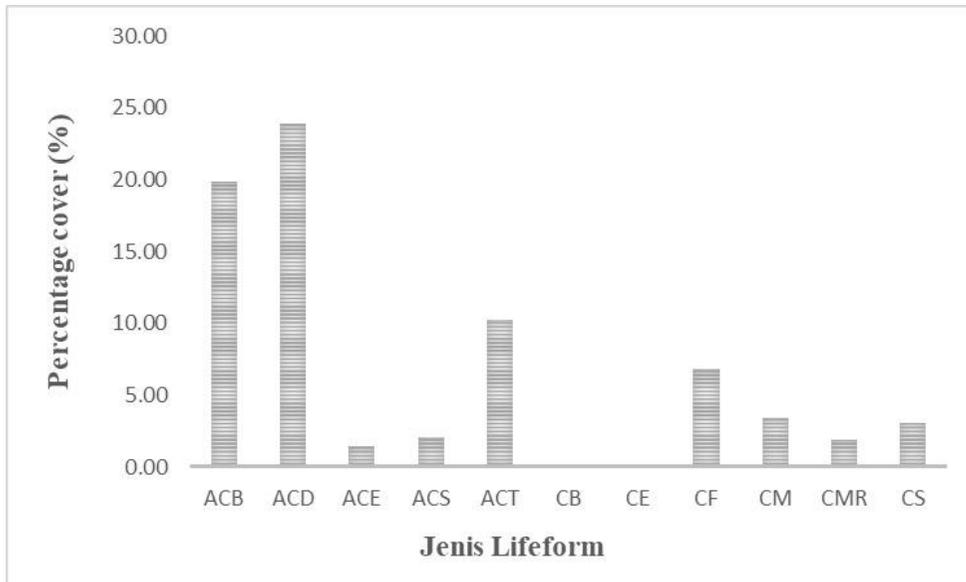
Analisis 2D karang dilakukan satu tempat dengan pengambilan data 3D. Hasil dari pengamatan 2 dimensi tutupan bentik di pulau Gili Labak dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 19. Persen penutupan di Pulau Gili Labak

Hasil pengamatan memperlihatkan bahwa tutupan karang tertinggi terdapat pada kategori karang *hard coral* (HC) 72,92 %, *Dead Coral Algae* (DCA) 9,09 %, *Sand* (S) 8,92 %, *Rubble* (R) 6,15 %, *Dead Coral* (DC) 2,03 %, *Rock* (RK) 0,52%, dan *Soft Coral* (SC) 0,33 %.

Hasil data karang hidup *liform* di Pulau Gili Labak mencapai 72.92 % terdiri dari *Acropora Branching* (ACB) 19.88 %, *Acropora Digitate* (ACD) 23,87 %, *Acropora Encrusting* (ACE) 1,44 %, *Acropora Submassive* (ACS) 2,09 %, *Acropora Tabulate* (ACT) 10,27 %, *Coral Branching* (CB) 0,07 %, *Coral Encrusting* (CE) 0,20 %, *Coral Foliose* (CF) 6,80 %, *Coral Massive* (CM) 3,40 %, *Coral Mushroom* (CMR) 1,90 %, dan *Coral Submassive* (CS) 3,01%. Hasil karang hidup di pulau Gili Labak dapat dilihat Gambar 14.



Gambar 20. Hasil analisis karang hidup (*lifeform*) di Pulau Gili Labak

Pengembangan metode 2D dan 3D dilakukan dengan menggunakan metode yang dapat mengukur *lifeform* karang dan mendapatkan data volume karang dengan memadukan beberapa *software* yaitu *argics* dan *agisoft* sehingga mendapatkan hasil yang lebih baik dan dapat melengkapi metode-metode yang ada yang umum digunakan sebelumnya.

Hasil pengamatan *lifeform* karang hidup di pulau Gili Labak adalah sebesar 77,125 % dan karang mati sebesar 22,874%. Hasil ini menunjukkan terumbu karang pulau Gili Labak dalam katagori baik sekali. Persentase penutupan *lifeform* karang pulau Gili Labak khususnya di area snorkelling didominasi oleh karang hidup sebanyak 74% dan unsur abiotik sebesar 22%. Jenis karang yang mendominasi pulau Gili Labak adalah *Acropora Branching* sebesar 19,88% dan *Coral Foliose* sebesar 10,25% (*Insafitri et al., 2021*).

Kategori tutupan karang coral atau karang hidup pada lokasi penelitian mencapai 77.125 % termasuk dalam katagori baik sekali, dan didominasi oleh karang *Acropora brancing* hal ini disebabkan karena lokasi pengamatan berada di perairan yang berhadapan langsung dengan daerah tertutup dengan hampasan ombak yang tidak kuat. *Acropora Brancing* ditemukan tumbuh di tempat yang lebih dalam. hal ini merupakan seleksi alam bagi hewan ini untuk menjaga koloninya dari kerusakan (*Yehiel et al., 2019*).

Tipe terumbu karang di perairan sekitar Pulau Gili Labak adalah terumbu karang tepi (*fringing reef*). Bentuk dasar koloni karang lengkap, yaitu karang masif (*massive*), bercabang (*branching*), mengerak (*encrusting*), dan lembaran (*foliaceous*). Jenis dan jumlah *lifeform* khususnya yang mempunyai

bentuk koloni bercabang dan massif cukup tinggi sehingga sangat mendukung kehidupan organisme laut. Tingginya persentase ACB, didukung oleh kondisi perairan yang jernih dan jauh dari sedimentasi sehingga penetrasi cahaya matahari dapat menembus perairan sampai 100% pada kedalaman 3-10 m. Perairan yang jernih atau sedimentasi yang rendah, akan lebih banyak ditemukan karang dalam bentuk bercabang dan tabulate (Yehiel *et al.*, 2019).

Kekurangan metode 2D dan 3D dapat dilihat pada Table 13.

Tabel 13. Kekurangan dan kelebihan Metode 2 Dimensi dan 3 Dimensi

NO	Metode 2D		Metode 3D	
	Kekurangan	Kelebihan	Kekurangan	Kelebihan
1.	Tidak mendapatkan nilai volume dan Hasil data hanya 2D	Pengambilan data lebih mudah	Pengambilan data lebih rumit	Dapat melihat tutupan persegi, DEM dan volume (3D)
2	Data yang didapat lebih sederhana hanya permukaan (prosentase tutupan)	Analisis lebih mudah, lebih cepat, dan sofutware lebih sederhana (software CPCe)	Analisis lebih lama dan membutuhkan software lebih canggih (Agrisoft)	Data yang didapatkan detail dan akurat, bisa diambil dari permukaan dan seluruh sisi terumbu karang
3.	Hanya dapat melihat pertumbuhan karang dari panjang atau luas.	Tidak membutuhkan hardware dengan spesifaikasi yang terlalu tinggi	Membutuhkan hardware komputer dengan spesifaikasi tinggi	Hasil analisis dapat dimanfaatkan untuk melihat pertumbuhan karang secara 3D (volume)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Azizi, Joko Siswanto, and Mahmoud Omid. 2014. "Volume Measurement Algorithm for Food Product with Irregular Shape Using Computer Vision Based on Monte Carlo." *J. ICT Res. Appl* 8(1):1–17.
- Adji, Arif Seno, Terry Indrabudi, and Robert Alik. 2016. "Penerapan Metode Foto Transek Bawah Air Untuk Mengetahui Tutupan Terumbu Karang Di Pulau Pombo, Maluku Application." *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis* 8(2):633–43.
- Ahmad, Zuhairi Bin, Muhammad Idzham, Helmi Bin, Mohd Jinah, and Shahbudin Bin Saad. 2020. "Comparison of 3D Coral Photogrammetry and Coral Video Transect for Coral Lifeform Analysis Using Low-Cost Underwater Action Camera." *ASEAN Journal on Science & Technology for Development* 37(1):15–20.
- Al-Horani, Fuad A., Salim M. Al-Moghrabi, and Dirk De Beer. 2003. "Microsensor Study of Photosynthesis and Calcification in the Scleractinian Coral, *Galaxea Fascicularis*: Active Internal Carbon Cycle." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 288(1):1–15.
- Ayu Ariani, A. A. 2006. Pengaruh Kegiatan Pembangunan Pada Ekosistem Terumbu Karang : (Studi Kasus Efek Sedimentasi Di Wilayah Pesisir Timur Pulau Bintan) Universitas Indonesia. Progam Studi Ilmu Lingkungan.
- Bamford, David R. and Paul L. Forrester. 2003. "Managing Planned and Emergent Change within an Operations Management Environment." *International Journal of Operations and Production Management* 23(5):546–64.
- Benjamin, Caryl S., Patrick Lawrence P. Cadeliña, Aletta T. Yñiguez, and Cesar L. Villanoy. 2019. "Development and Application of a Low-Cost Rapid Assessment System for Coastal Benthic Habitats." *Environmental Monitoring and Assessment* 191(10).
- Blondel, Philippe. 2009. "The Handbook of Sidescan Sonar." *The Handbook of Sidescan Sonar*.
- Bryson, Mitch et al. 2017. "Characterization of Measurement Errors Using Structure-from-Motion and Photogrammetry to Measure Marine Habitat Structural Complexity." *Ecology and Evolution* 7(15):5669–81.

- Burke, Laretta, Elizabeth Selig, and Mark Spalding. 2002. *Terumbu Karang Yang Terancam Di Asia Tenggara (Ringkasan Untuk Indonesia)*.
- Burns, J. H. R., D. Delparte, R. D. Gates, and M. Takabayashi. 2015. "Utilizing Underwater Three-Dimensional Modeling To Enhance Ecological And Biological Studies Of Coral Reefs." Pp. 61–66 in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5.
- Burns, J. H. R., D. Delparte, L. Kapon, and M. Belt. 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. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.mio.2016.04.001>).
- Bythell, J. C. and P. Pan. 2001. "Three-Dimensional Morphometric Measurements of Reef Corals Using Underwater Photogrammetry Techniques." *Coral Reefs* 20:193–99.
- Calders, Kim et al. 2020. "3D Imaging Insights into Forests and Coral Reefs." *Trends in Ecology and Evolution* 35(1):6–9.
- Candra, E. D., Hartono, and P. Wicaksono. 2016. "Above Ground Carbon Stock Estimates of Mangrove Forest Using Worldview-2 Imagery in Teluk Benoa, Bali." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 47(1):1–11.
- Carter, M. R. and E. G. Gregorich. 2006. *Soil Sampling and Methods of Analysis*.
- Casella, Elisa et al. 2017. "Mapping Coral Reefs Using Consumer-Grade Drones and Structure from Motion Photogrammetry Techniques." *Coral Reefs* 36(1):269–75.
- Castro, P., M. E. Huber. 2005. *Marine Biology, Fifth Edition*. USA: Mc Graw-Hill Companies Inc New York. New York.
- Danoedoro, Projo, Gerry Kristian, and Khalifah Nur Insan Rahmi. 2015. "Pengaruh Metode Koreksi Radiometrik Citra Alos Avnir-2." (February):1–15.
- Dickens, Luke C., Christopher H. R. Goatley, Jennifer K. Tanner, and David R. Bellwood. 2011. "Quantifying Relative Diver Effects in Underwater Visual Censuses." *PLoS ONE* 6(4):6–8.

- Dustan, Phillip, Orla Doherty, and Shinta Pardede. 2013. "Digital Reef Rugosity Estimates Coral Reef Habitat Complexity." *PLoS ONE* 8(2):1–10.
- Efendy, Mahfud and Farid Muhsoni. 2018. "IbM Transplantasi Terumbu Karang Kelompok Masyarakat Desa Kombang Dan Masyarakat Dusun Gili Labak Sebagai Media Meningkatkan Potensi Wisata Selam." *Jurnal Ilmiah Pangabdhi* 4(1):32–45.
- English, S., C. Wilkinson, and V. Baker. 1998. "Survey Manual for Tropical Marine Resources. Second Edition." *Survey manual for tropical marine resources. Second edition.*
- Fastawa1), Zakiyul Fuad2) dan Fannia Hidayati3). 2016. "Komposisi Jenis Dan Kepadatan Populasi Porifera Di Kawasan Konservasi Sublitoral Rinon Pulo Breuh Kecamatan Pulo Aceh Kabupaten Aceh Besar."
- Figueira, Will et al. 2015. "Accuracy and Precision of Habitat Structural Complexity Metrics Derived from Underwater Photogrammetry." *Remote Sensing* 2015(7):16883–900.
- Fukunaga, Atsuko and John H. R. Burns. 2020. "Metrics of Coral Reef Structural Complexity Extracted from 3D Mesh Models and Digital Elevation Models." *Remote Sensing* 12(17):1–18.
- Fukunaga, Atsuko, John H. R. Burns, Brianna K. Craig, and Randall K. Kosaki. 2019. "Integrating Three-Dimensional Benthic Habitat Characterization Techniques into Ecological Monitoring of Coral Reefs." *Journal of Marine Science and Engineering Article* 7(27):1–13.
- Fukunaga, Atsuko, John H. R. Burns, Kailey H. Pascoe, and Randall K. Kosaki. 2020. "Associations between Benthic Cover and Habitat Complexity Metrics Obtained from 3D Reconstruction of Coral Reefs at Different Resolutions." *Remote Sensing* 12(6).
- Gel, Kekuatan et al. 2013. "Journal Of Marine Research." 2(2000):127–33.
- Giyanto. 2013. "Metode Transek Foto Bawah Air Untuk Penilaian Kondisi Terumbu Karang." *Oseana* 28(1):47–61.
- Giyanto. n.d. "Foto Bawah Air."
- Giyanto, Giyanto et al. 2017. *Status Terumbu Karang Indonesia 2017*. Jakarta Utara: Pusat Penelitian Oseanografi – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia Puslit Oseanograf.

- Gurchiek, Reed D., Ryan S. McGinnis, Alan R. Needle, Jeffrey M. McBride, and Herman van Werkhoven. 2017. "The Use of a Single Inertial Sensor to Estimate 3-Dimensional Ground Reaction Force during Accelerative Running Tasks." *Journal of Biomechanics* 61:263–68.
- Hadi, Tri Aryono et al. 2018. *Terumbu Karang Indonesia*. Jakarta Utara: Pusat Penelitian Oseanografi – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Harahap, Z. A., Y. H. Gea, and I. E. Susetya. 2019. "Relationship between Coral Reef Ecosystem and Coral Fish Communities in Unggeh Island Central Tapanuli Regency." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 260(1).
- Hatcher, Gerald A. et al. 2020. "Accurate Bathymetric Maps From Underwater Digital Imagery Without Ground Control." *Frontiers in Marine Science* 7(525):1–20.
- Hill, Josh and Clive Wilkinson. 2004. "Methods for Ecological Monitoring of Coral Reefs." *Australian Institute of Marine Science, Townsville* 117.
- House, Jenny E. et al. 2018. "Moving to 3D: Relationships between Coral Planar Area, Surface Area and Volume." *PeerJ* 1–19.
- Insafitri, Insafitri, Eka Nurahemma Ning Asih, and Wahyu Andy Nugraha. 2021. "Dampak Snorkeling Terhadap Porsen Tutupan Terumbu Karang Di Pulau Gili Labak Sumenep Madura." *Buletin Oseanografi Marina* 10(2):151–61.
- Insafitri, Eka N.Nin. Asih, and Wahyu A. Nugraha. 2020. "Marine Tourism in Gili Labak Island: Willingness to Pay Method as an Effort to Preserve Coral Reef in Gili Labak Island, Madura, Indonesia." *AAACL Bioflux* 13(6):3789–97.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. edited by J. T. Houghton et al. United Kingdom and New York. Retrieved (<http://www.cambridge.org>).
- Jaklič, Aleš, Miran Erič, Igor Mihajlović, Žiga Stopinšek, and Franc Solina. 2015. "Volumetric Models from 3D Point Clouds: The Case Study of Sarcophagi Cargo from a 2nd/3rd Century AD Roman Shipwreck near Sutivan on Island Brač, Croatia." *Journal of Archaeological Science* 62:143–52.
- Kabiri, Keivan, Hamid Rezai, and Masoud Moradi. 2020. "A Drone-Based Method for Mapping the Coral Reefs in the Shallow Coastal Waters – Case Study: Kish Island, Persian Gulf." *Earth Science Informatics* 13(4):1265–74.

- Kennedy, Hilary et al. 2010. "Seagrass Sediments as a Global Carbon Sink: Isotopic Constraints." *Global Biogeochemical Cycles* 24(4):1–8.
- Komiyama, Akira, Jin Eong Ong, and Sasitorn Pongparn. 2008. "Allometry, Biomass, and Productivity of Mangrove Forests: A Review." *Aquatic Botany* 89(2):128–37.
- Kornder, Niklas A. et al. 2021. "Implications of 2D versus 3D Surveys to Measure the Abundance and Composition of Benthic Coral Reef Communities." *Coral Reefs* 40:1137–53.
- Kurniawan, Fery and Robba Fahrisy Darus. 2017. "The Needs of Tourism Management on Gili Labak Island , Sumenep : The Needs of Tourism Management on Gili Labak Island." *Coastal and Ocean Journal* 1 (2)(July):7–15.
- Lange, Ines D. and Chris T. Perry. 2020. "A Quick, Easy and Non-Invasive Method to Quantify Coral Growth Rates Using Photogrammetry and 3D Model Comparisons." *Methods in Ecology and Evolution* 11(6):714–26.
- Leujak, W. and R. F. G. Ormond. 2007. "Comparative Accuracy and Efficiency of Six Coral Community Survey Methods." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 351(1–2):168–87.
- Linnaeus, Septifer, Pada Rataan Terumbu, Grace Mustamu, Lawrence J. L. Lumingas, and Anneke V Lohoo. 2014. "Jurnal Ilmiah Platax KEPADATAN , POLA SEBARAN , DAN MORFOMETRIK KERANG KOTAK DI TANJUNG LAMPANGI , MINAHASA SELATAN 1 Diversity , Distribution Pattern , Morphometric of Box Mussel Septifer Bilocularis (Linnaeus , 1758) on the Reef Flat in Cape Lampangi ." *Jurnal Ilmiah Platax* 2(1):8–18.
- M. Takdir Umanailo, Indri S. Manembu, Hermanto W.K. Manengkey, Carolus P.Paruntu and Wilmy E.Pelle Rosita A. J. Lintang. 2021. "(THE CONDITION OF SCLERACTINIA CORAL AT BULUTUI WATERS, WEST LIKUPANG SUBDISTRICT, NORTH MINAHASA DISTRICT)." *Pesisir dan Laut Tropis* Volume 9 N(Pesisir dan Laut Tropis):8.
- Muhsoni, Firman Farid. 2016a. "Analisi Daya Dukung Pemanfaatan Pulau Gili Labak Dengan Menggunakan Sistem Informasi Geografis." *Seminar Nasional Perikanan dan Kelautan VI FPIK UB* 1–6.
- Muhsoni, Firman Farid. 2016b. "Modelling Of Utilization Carrying Capacity Of Sapudi Island Using Geographic Information System." *Jurnal Kelautan* 9(1):73–84.

- Muhsoni, Firman Farid. 2017. *Gili Labak Island Potential and Management*. Bangkalan: UTM PRESS.
- Muhsoni, Firman Farid and Mahfud Efendy. 2017. "Coral Reefs Eco Tourism Sustainability Management In the Gili Labak Island Using Rapfish Method." *Jurnal Kelautan* 10(2):192–204.
- Muhsoni, Firman Farid, Mohammad Syarief, and Mahfud Effendi. 2011. "Inventarisasi Data Potensi Sumberdaya Wilayah Pesisir Kabupaten Sumenep Madura." *Jurnal Ilmu Kelautan* 4(1):96–101.
- Nabillah, Ida and Indra Ranggadara. 2020. "Mean Absolute Percentage Error Untuk Evaluasi Hasil Prediksi Komoditas Laut." *JOINS (Journal of Information System)* 5(2):250–55.
- Nontji, Anugerah. 2005. "Laut Nusantara Jakarta : Djambatan." Pp. 357–66 in *Ekologi laut*. Jakarta: Djambatan.
- Nurrahman, Yusuf Arief et al. 2020. "Kondisi Tutupan Terumbu Karang Di Pulau Panjang Taman Nasional Condition of Coral Reefs Cover in Panjang Island , Seribu Islands National Park , Jakarta." *Akuatika Indonesia* 5(1):27–32.
- Nyabakken, J. W. 1992. *Biologi Laut Suatu Pendekatan Ekologis* Diterjemahkan Oleh H.M. Eidman, Koesbiono et Al. Jakarta: Gramedia.
- Nybakken, J. W. 1988. *Biologi Laut Suatu Pendekatan Ekologis*. Terjemahan M. Ediman, Koesoebiono, D.G Bengen, M. Hutomo, & S. Sukardjo. Jakarta: PT. Gramedia.
- de Oliveira, Larissa Macedo Cruz, Aaron Lim, Luis A. Conti, and Andrew J. Wheeler. 2021. "3D Classification of Cold-Water Coral Reefs: A Comparison of Classification Techniques for 3D Reconstructions of Cold-Water Coral Reefs and Seabed." *Frontiers in Marine Science* 8(March):1–19.
- Price, David M. et al. 2019. "Using 3D Photogrammetry from ROV Video to Quantify Cold-Water Coral Reef Structural Complexity and Investigate Its Influence on Biodiversity and Community Assemblage." *Coral Reefs* 38:1007–21. Retrieved May 6, 2021 (<https://doi.org/10.1007/s00338-019-01827-3>).
- Purnama Sari, Ni Wayan et al. 2021. "Status of Coral Reefs in the Water of Spermonde, Makassar, South Sulawesi." *E3S Web of Conferences* 324(May 2018):3007.

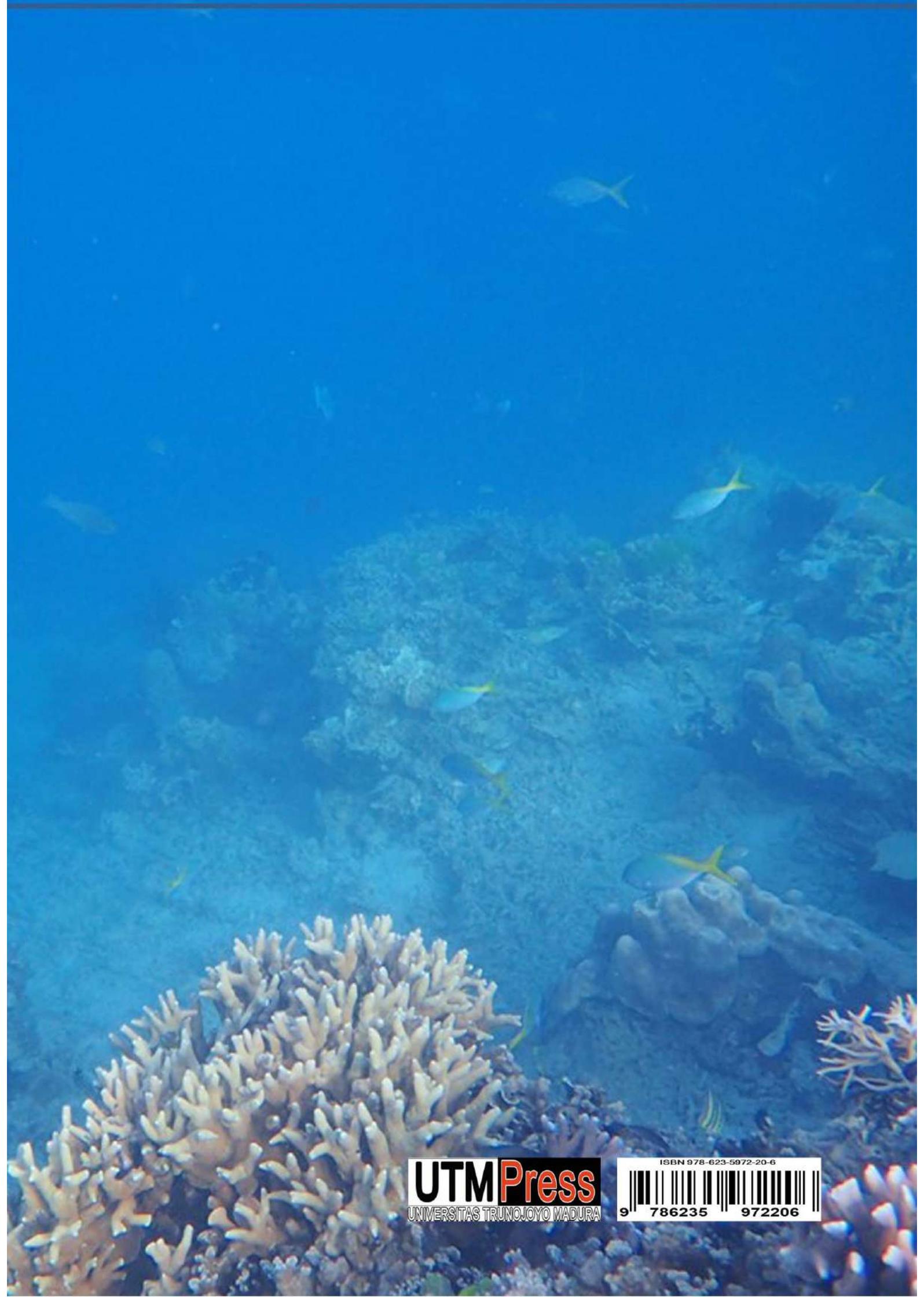
- Rahardjanto, Abdulkadir, H. Husamah, Diani Fatmawati, Fuad Jaya Miharja, and Dwi Setyawan. 2019. "The Problematic Implementation of Community-Based Ecotourism in Indonesia: A Case Study in Ecotourism of Gili Labak-East Java." *African Journal of Hospitality, Tourism and Leisure* 8(SpecialEdition):1–18.
- Reef, The Coral. 2006. "Coral Reefs & Sustainable Marine Recreation." 347 pp.
- Riskiani, Isma, Budimawan, and Ahmad Bahar. 2019. "The Analysis of Coral Reef Fishes Abundance Based on Coral Reef Condition in Marine Tourism Park of the Kapoposang Islands , South Sulawesi , Indonesia." *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* 4(4):1012–17.
- Sagai, Bonnke, Kakaskasen Roeroe, and Indri Manembu. 2017. "Kondisi Terumbu Karang Di Pulau Salawati Kabupaten Raja Ampat Papua Barat." *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis* 5(2):47.
- Sammarco, PW. 1982. "Polyp Bail-Out: An Escape Response to Environmental Stress and a New Means of Reproduction in Corals." *Marine Ecology Progress Series* 10:57–65.
- Sarbini, Rakhmat, Henra Kuslan, and Yusuf Nugraha. 2016. "Teknik Pengamatan Tutupan Terumbu Karang Dengan Menggunakan Transek Garis (Line Intercept Transect) Di Pulau Kumbang Kepulauan Karimun Jawa." *Buletin Teknik Litkayasa* 14:33–42.
- Satyawan, Noar Muda and Novita Tri Artiningrum. 2021. "Benthic and Substrate Category Profile of Coral Reef in Labuan Pandan Waters, East Lombok." *Jurnal Biologi Tropis* 21(1):171–78.
- Scott, A. J., D. W. Hosmer, and S. Lemeshow. 1991. "Applied Logistic Regression." *Biometrics* 47(4):1632.
- Sirait, Anda Putra, Oktiyas Muzaky Luthfi, and Andik Isdianto. 2021. "Karakteristik Fisik Terumbu Buatan (Artificial Reef) Pasca Penenggalaman Tahun 2017 Di Pantai Damas Trenggalek." *Journal of Marine and Coastal Science* 10(1):58.
- Siswanto, Joko, Anton Satria, and Azizi Abdulah. 2013. "Volume Measurement of Food Product with Irregular Shape Using Computer Vision and Monte Carlo Method: A Framework." *Procedia Technology* 11(Iceei):764–70. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.256>).
- Stal, Cornelis, Jean Bourgeois, Philippe De Maeyer, Guy De Mulder, and Alain De Wulf. 2012. "Test Case on the Quality Analysis of Structure from

- Motion in Airborne Applications.” P. 11 in *Proceedings of the 32nd EARSeL Symposium: “Advances in Geosciences,” Mykonos, Greece.*
- Suharsono. 2008. *Jenis-Jenis Karang Indonesia*. LIPI, Coremap Program.
- Suprayogi, Imam, Trimajion, and Mahyudin. 2014. “Model Prediksi Liku Kalibrasi Menggunakan Pendekatan Jaringan Saraf Tiruan (ZST) (Studi Kasus: Sub DAS Siak Hulu).” *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau* 1(1):1–18.
- Supriharyono. 2007. *Pengelolaan Ekosistem Terumbu Karang Jakarta: Djambatan*.
- Timotius, S. 2003. *Karakteristik Terumbu Karang*. Makalah Training Course. Yayasan Terumbu Karang Indonesia.
- Tomas Tomascik, Mohammad Kasim Moosa, Anugerah Nontji, Anmarie Janice Mah. 1997. *The Ecology of The Indonesian Seas Part II*. Periplus Editions. Singapore.
- Urbina-Barreto, Isabel et al. 2021. “Quantifying the Shelter Capacity of Coral Reefs Using Photogrammetric 3D Modeling: From Colonies to Reefscapes.” *Ecological Indicators* 121:1470–160. Retrieved May 6, 2021 (<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107151>).
- Utami, Risnita Tri, Neviaty P. Zamani, and Hawis H. Madduppa. 2018. “Molecular Identification, Abundance and Distribution of the Coral-Killing Sponge *Terpios Hoshinota* in Bengkulu and Seribu Islands, Indonesia.” *Biodiversitas* 19(6):2238–46.
- Veal, C. J., M. Carmi, M. Fine, and O. Hoegh-Guldberg. 2010. “Increasing the Accuracy of Surface Area Estimation Using Single Wax Dipping of Coral Fragments.” *Coral Reefs* 29(4):893–97.
- Wahyuni, Nurlita Indah. 2014. “The Utilization of ALOS PALSAR Image to Estimate Natural Forest Biomass: Case Study at Bogani Nani Wartabone National Park.” *Jurnal Wasian* 1(1):15.
- Westoby, M. J., J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, and J. M. Reynolds. 2012. “Geomorphology ‘ Structure-from-Motion ’ Photogrammetry: A Low-Cost , Effective Tool for Geoscience Applications.” *Geomorphology* 179:300–314. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>).
- Widiastuti, E. L., S. K. D. Dani, Tugiyono, I. G. Yudha, and G. N. Susanto. 2021. “Growth and Estimation of Potential Carbon Absorption by

Transplantation Branching Coral Reefs on Mahitam and Pahawang Islands of Pesawaran Regency, Lampung Province.” *Journal of Physics: Conference Series* 1751(1).

Yehiel H, Thomas F. Pattiasina, and Ricardo F. Tapilatu. 2019. “Evaluasi Kondisi Terumbu Karang Di Pulau Mansinam Median.” 11:1–12.

Yu, Quanzhou et al. 2014. “Narrowband Bio-Indicator Monitoring of Temperate Forest Carbon Fluxes in Northeastern China.” *Remote Sensing* 6(9):8986–9013.



UTM Press
UNIVERSITAS TRUNJOYO MADURA

ISBN 978-623-5972-20-6
9 786235 972206