

Pemetaan cepat batimetri perairan dangkal menggunakan citra Sentinel-2 dan Google Earth Engine di Perairan Tanjung Kelayang – Pulau Belitung

Munawaroh^{1,3*}, Pramaditya Wicaksono², AW Rudiastuti³

¹Magister Penginderaan Jauh, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Sains Informasi Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

³Badan Riset dan Inovasi Nasional

*Email koresponden: munawaroh@brin.go.id, 085229066522

Submit : 2022-12-20 Direvisi: 2023-01-10 Accepted: 2023-06-27

©2023 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

Abstrak Peta batimetri perairan dangkal dapat membantu pengelolaan, pemantauan, dan perlindungan bagi ekosistem di dalamnya. Namun, ketersediaan peta batimetri di wilayah perairan dangkal di Indonesia masih terbatas. Untuk itu, diperlukan sebuah metode pemetaan cepat estimasi batimetri di perairan dangkal di Indonesia. Penelitian ini mencoba mengaplikasikan metode otomatisasi pemetaan batimetri perairan dangkal di Tanjung Kelayang menggunakan *band* biru dan hijau dari komposit *clean-coastal-water* citra Sentinel-2, klorofil-a dari aqua-MODIS pada platform Google Earth Engine (GEE). Tujuan dari penelitian ini adalah menguji keandalan metode pemetaan cepat batimetri dengan menggunakan data komposit citra satelit Sentinel-2, klorofil-a dan algoritma *band-ratio* pada platform GEE di wilayah penelitian. Hasil penelitian menunjukkan model SDB (*Satellite Derived Bathymetry*) memiliki R^2 sebesar 0,62, *mean absolute error* (MAE) sebesar 1,77 meter dan RMSE sebesar 2,02 meter dengan estimasi nilai kedalaman optimum 5 meter dan maksimum 10 mter. Dengan demikian, model SDB yang dihasilkan dapat diandalkan sebagai alternatif untuk pemetaan cepat batimetri di perairan dangkal, meskipun harus berkompromi dengan akurasi peta batimetri yang dihasilkan.

Kata kunci: pemetaan cepat, batimetri, *Satellite Derived Bathymetry*, SDB, klorofil-a, aqua-MODIS, Sentinel-2

Abstract Bathymetric maps of shallow waters can aid in managing, monitoring, and protecting ecosystems within them. However, the availability of bathymetric maps for shallow water regions in Indonesia still needs to be improved. Therefore, a method of rapid mapping for bathymetry in shallow waters in Indonesia is needed. This study attempts to apply an automated method for mapping shallow water bathymetry in Tanjung Kelayang using the blue and green bands of the *clean-coastal-water* composite of Sentinel-2 images, chlorophyll-a data from aqua-MODIS, and the Google Earth Engine (GEE) platform. This research aims to test the reliability of the rapid bathymetry mapping method using Sentinel-2 image composite, chlorophyll-a data, and *band-ratio* algorithms on the GEE platform in the study area. The results of the study show that the *Satellite Derived Bathymetry* (SDB) model has an R^2 value of 0,62, a *mean absolute error* (MAE) of 1,77 meters, and a *root mean square error* (RMSE) of 2,02 meters, with an estimated optimal depth value of 5 meters and a maximum depth value of 10 meters. Thus, the generated SDB model can be considered a reliable alternative for rapid bathymetry mapping in shallow waters, although it may compromise the accuracy of the resulting bathymetric maps.

Keywords: rapid mapping, bathymetry, SDB, chlorophyll-a, aqua-MODIS, Sentinel-2, *Satellite Derived Bathymetry*

PENDAHULUAN

Pemetaan batimetri perairan dangkal sangat penting dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik kawasan pesisir sebagai acuan untuk pemantauan habitat bentik dan perencanaan operasional dan transportasi laut (Kutser et al., 2019; Lyzenga et al., 2006). Secara historis, pemetaan batimetri di perairan dangkal telah dilakukan dengan berbagai metode dan batasan dalam mengestimasi nilai kedalaman, dimulai dari metode konvensional melalui pemeruman langsung di lapangan menggunakan instrument sonar sampai dengan menggunakan teknologi *Airborne Lidar Bathymetry* (ALB), *Remotely Operated Vehicles* (ROV's) dan *Autonomous Underwater Vehicles* (AUV's). Namun, meskipun instrument-instrumen tersebut dapat menghasilkan data batimetri yang akurat, proses akuisisi data tersebut memerlukan biaya yang

tinggi untuk area pemetaan yang sempit (Liu et al., 2021). Seiring berkembangnya teknologi penginderaan jauh, estimasi nilai kedalaman perairan dangkal dapat diturunkan dari hasil perekaman citra satelit (*Satellite Derived Bathymetry*/SDB). Metode ini kemudian menjadi alternatif metode pemetaan batimetri yang efektif dan efisien dari segi waktu dan biaya (Stumpf et al., 2003; Traganos & Reinartz, 2018).

Studi awal SDB dilakukan dengan memanfaatkan citra MODIS (Balsamo et al., 2010), SeaWiFS (Barale et al., 2008) dan VIIRS (Hlaing et al., 2013) yang memiliki resolusi spasial yang rendah. Selanjutnya, dilakukan juga studi SDB dengan memanfaatkan citra optis yang memiliki resolusi yang lebih baik seperti Landsat-8 (Dong et al., 2019) Sentinel-2 (Kutser et al., 2019), dan WorldView (Eugenio et al., 2015). Dalam implementasinya, terdapat kompromi antara resolusi spasial

dengan resolusi temporal citra. Penggunaan citra beresolusi spasial rendah meningkatkan level ketidakpastian akan informasi suatu objek pemetaan akibat piksel campuran seperti disepanjang garis pantai (Li et al., 2021). Selain itu, tutupan awan juga menjadi salah satu gangguan dalam interpretasi citra optis (Purkis, 2018; Purkis & Pasterkamp, 2004). Dalam menghasilkan data batimetri yang akurat diperlukan hasil observasi lapangan untuk proses kalibrasi dan validasi (Stumpf et al., 2003), dan dalam hal ini sangat ditentukan pada kondisi perairan dan kondisi atmosfer wilayah kajian (Hedley et al., 2018; Kerr & Purkis, 2018; Li et al., 2021).

Ekstraksi nilai kedalaman perairan dari citra optis diturunkan dari nilai pantulan spektral yang diterima oleh sensor. Nilai pantulan yang diterima oleh sensor optis di wilayah perairan dangkal terdiri dari komponen hamburan atmosfer, pantulan permukaan air, hamburan kolom air, dan nilai pantulan tutupan dasar perairan (Zoffoli et al., 2014). Hanya gelombang tampak yang mampu menembus kolom air untuk menangkap informasi tentang kedalaman air dan habitat benthik (Kutser et al., 2020). Ekstraksi nilai kedalaman dari citra satelit optis tergantung pada kemampuan mengekstraksi redaman dari rambatan panjang gelombang elektromagnetik ketika menembus kolom air, sehingga nilai pantulan dasar perairan dapat ditransformasikan menjadi nilai kedalaman setelah menghilangkan komponen hamburan atmosfer, pantulan permukaan air, hamburan kolom air (Dewi et al., 2020; Kanno & Tanaka, 2012).

Pada perairan jernih, redaman kolom air dari gelombang biru dan hijau memiliki nilai berbeda yang kemudian menjadi dasar metode *band-ratio* untuk mengekstraksi nilai kedalaman perairan dangkal (Stumpf et al., 2003). Kejernihan perairan sendiri dapat mempengaruhi keberhasilan ekstraksi nilai kedalaman. Pada perairan dangkal, fitoplankton yang mengandung klorofil-a adalah agen utama yang bertanggung jawab atas variasi sifat optik air (Lee et al., 2005). Lee et al (2005) melakukan eksperimen untuk mengukur daya tembus gelombang tampak (biru dan hijau) pada perairan jernih dengan konsentrasi klorofil-a sebesar 0.01 mg/m³. Dari hasil eksperimen tersebut diketahui bahwa pada perairan sangat jernih, *band* biru dapat menembus sampai dengan kedalaman lebih dari 50 meter, sedangkan pada perairan dengan konsentrasi klorofil-a yang semakin pekat maka daya tembusnya pun semakin melemah yaitu hanya sampai kedalaman kurang dari 20 meter. Dengan demikian, ekstraksi nilai kedalaman dari citra satelit multispektral (SDB) secara optimal dapat dilakukan sampai kedalaman optik perairan (<20 meter) (Zoffoli et al., 2014).

Kemudian Li et al., (2019) memodifikasi algoritma *band-ratio* dengan mempertimbangkan kondisi redaman cahaya pada kolom air, dimana koefisien redaman kolom air hanya disebabkan oleh kandungan klorofil-a (m₀ dan m₁). Hal ini didasarkan pada asumsi bahwa pada perairan dengan kedalaman kurang dari 20 meter, konsentrasi klorofil-a dapat digunakan untuk mengkalibrasi kondisi redaman cahaya untuk satu *scene* citra satelit optis, karena sifat optik yang melekat dan tampak (IOP, AOP) sangat mirip dengan kondisi di perairan samudra dan perairan jernih dengan tutupan dasar terumbu karang (Lee et al., 2005). Pendekatan ini didasarkan pada dua fenomena. Pertama, di perairan yang dalam secara optik, sinyal pelepasan air disumbangkan oleh kolom air saja dan sifat bio-optik air dapat diturunkan tanpa kontaminasi pantulan dasar. Kedua, pada waktu akuisisi citra yang sama, kondisi redaman kolom air mendekati perairan dangkal secara

optikal hingga perairan dalam secara optikal di area cakupan citra satelit (Lee et al., 2005). Namun, asumsi ini mungkin tidak berlaku di berbagai kondisi kejernihan air wilayah perairan terumbu karang dan pesisir.

Di wilayah kepulauan Indonesia, salah satunya di wilayah pesisir dan perairan dangkal Tanjung Kelayang Pulau Belitung, ketersediaan informasi batimetri di wilayah perairan dangkal masih terbatas. Pemetaan batimetri yang telah dilakukan masih terbatas pada hasil pemeruman baik dengan menggunakan SBES (*Single-Beam Echosounder*) maupun MBES (*Multi-Beam Echosounder*) di lokasi tertentu dan membutuhkan waktu dan biaya yang cukup mahal. Secara geografis, Tanjung Kelayang berada di dekat garis ekuator. Hal tersebut menjadikan Tanjung Kelayang memiliki tutupan awan yang cukup tinggi sehingga citra bebas awan di wilayah tersebut cukup sulit didapatkan (Simonetti et al., 2021). Tanjung Kelayang sendiri merupakan kawasan yang memiliki objek wisata bahari dengan pantai berpasir putih dan panorama yang eksotis. Wilayah perairan dangkalnya memiliki keanekaragaman habitat benthik, seperti terumbu karang, makro alga, dan lamun (<https://allencoralatlas.org/>). Selain itu, Tanjung Kelayang juga termasuk ke dalam 10 besar destinasi wisata nasional sehingga dibutuhkan informasi kedalaman perairan baik untuk navigasi seperti lalu lintas perahu wisata maupun untuk spot-spot wisata *snorkeling* dan menyelam. Oleh karena itu, penting adanya sebuah metode pemetaan cepat yang akurat dan efisien dari segi biaya dan waktu untuk mendukung pengelolaan objek wisata bahari di daerah penelitian.

Pemetaan cepat adalah proses permintaan dan penyediaan informasi geospasial yang meliputi proses perolehan, pemrosesan, dan analisis citra satelit dan data lainnya dengan cepat. Tujuan dari pemetaan cepat adalah untuk memberikan informasi yang tepat waktu dan akurat kepada para pengambil keputusan untuk membantu dalam perencanaan (Ajmar et al., 2015). Ada enam alasan utama mengapa teknik pemetaan cepat digunakan: (a) mengurangi waktu, (b) mengurangi biaya, (c) meningkatkan jumlah data yang terkumpul (karena berkurangnya waktu yang diperlukan untuk mengumpulkannya), (d) meningkatkan efisiensi, (e) meningkatkan akurasi, dan (f) mendapatkan perkiraan yang lebih dekat dengan realitas (Ajmar et al., 2015; Vindrola-Padros & Johnson, 2020).

Di era digital dan komputasi berbasis awan, Google Earth Engine (GEE) bisa diandalkan untuk pemetaan cepat yang efektif dan efisien. GEE merupakan *platform* komputasi berbasis awan yang mampu mengakses berbagai arsip citra satelit dengan berbagai resolusi spasial maupun temporal yang dapat dimanfaatkan untuk pemetaan batimetri dari citra satelit (Traganos et al., 2018). Salah satu arsip citra satelit dengan resolusi spasial 10 meter yang dapat dimanfaatkan untuk SDB secara gratis adalah citra Sentinel-2. Tersedianya data klorofil-a dari citra aqua-MODIS juga dapat digunakan sebagai alternatif data untuk parameter koefisien redaman kolom air pada metode *band-ratio*. Penelitian Traganos et al. (2018) menunjukkan manfaat dari GEE dan arsip dari citra Sentinel-2 untuk mengembangkan metode empiris SDB. Penelitian tersebut dilakukan dengan mengimplementasikan algoritma *pre-processing* yang umum digunakan, seperti koreksi awan, atmosfer, dan kilau matahari (*sun-glint*) untuk membangun komposit citra. Proses tersebut juga mencakup normalisasi radiometrik untuk mengatasi interferensi intra dan antar citra. Algoritma *pre-processing* tersebut digunakan

untuk memperoleh citra komposit terkoreksi dan bebas gangguan awan yang akan digunakan sebagai data input SDB. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa citra komposit terkoreksi tersebut telah mengalami proses tambal sulam piksel, sehingga mempengaruhi akurasi peta batimetri yang dihasilkan.

Li et al., (2021) menggunakan arsip citra Sentinel-2 *surface reflectance* dan nilai klorofil-a hasil pengukuran langsung di 20 lokasi perairan dangkal untuk mengembangkan metode otomatisasi estimasi batimetri perairan dangkal secara global dengan memanfaatkan GEE. Li et al., (2021) juga menyusun algoritma pra-pemrosesan baru untuk menghasilkan komposit citra *clean-coastal-water* dan algoritma estimasi batimetri otomatis yang disesuaikan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa dengan menggunakan citra komposit *clean-coastal-water* dan nilai klorofil-a hasil pengukuran lapangan sebagai input data dapat menghasilkan peta batimetri di perairan dangkal yang dapat diandalkan, dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) berkisar antara 1,2 hingga 1,9 m. Oleh karena itu, metode yang dikembangkan oleh Li et al., (2021) ini sangat potensial diaplikasikan untuk pemetaan cepat batimetri secara global. Akan tetapi pemetaan dengan metode tersebut tetap membutuhkan waktu dan biaya yang tidak sedikit terutama untuk memperoleh data konsentrasi klorofil-a di wilayah perairan yang akan dipetakan, terlebih lagi jika wilayah perairan tersebut cukup luas.

Pada penelitian ini, nilai batimetri dari komposit *clean-coastal-water* citra Sentinel-2 diperoleh dengan menerapkan algoritma *band-ratio* dari Li et al., (2021) dan memanfaatkan nilai konsentrasi klorofil-a dari citra aqua-MODIS sebagai *tuning* parameter peredaman cahaya pada kolom perairan. Hal ini berdasarkan sifat absorpsi oleh klorofil-a yang merupakan IOP (*Inherent Optical Properties*) dominan pada case-1 waters (Li et al., 2019). Pemanfaatan data aqua-MODIS untuk menunjang pemetaan dasar perairan sebelumnya telah dilakukan oleh Giardino et al., (2014) dengan kombinasi citra Landsat-8 OLI, MODIS, dan RapidEye untuk memodelkan kondisi kualitas air dan kemudian memetakan dasar perairan di Danau Garda, Italia. Nilai parameter klorofil-a yang digunakan sebagai eksponensial dari persamaan *band-ratio* pada model SDB dari Li et al., (2021) diduga sangat mempengaruhi hasil akurasi dari model SDB yang dihasilkan.

Penelitian ini mengimplementasikan metode pemetaan cepat batimetri yang dibangun dari hasil penelitian Li et al., (2019) dan Li et al (2021) di perairan Tanjung Kelayang. Pemilihan lokasi perairan Tanjung Kelayang menyesuaikan dengan karakteristik dimana metode ini dibangun oleh Li et al., (2019) yakni pada perairan jernih dimana properti optis diasumsikan sebagai fungsi dari konsentrasi klorofil-a.

Konsentrasi kandungan klorofil-a di perairan samudera sendiri diketahui terpengaruh oleh musim dimana kandungan klorofil-a tersebut bisa sangat dinamis dari waktu ke waktu (Hu et al., 2012). Song et al., (2021) menambahkan bahwa pada perairan pesisir, akurasi konsentrasi klorofil-a permukaan yang diturunkan dari satelit sangat dipengaruhi oleh resuspensi sedimen yang disebabkan oleh angin, arus pasang surut dan pencampuran. Selain itu, di wilayah perairan dangkal yang memiliki keragaman habitat bentik, kandungan klorofil-a tidak hanya dipengaruhi oleh musim namun bisa sangat terpengaruh oleh tutupan habitat bentik seperti makro alga, terumbu karang, dan lamun, juga pengaruh sedimentasi dari daratan, gelombang, dan arus di perairan

dangkal. Dengan demikian, asumsi bahwa nilai klorofil-a dapat merepresentasikan kondisi IOP dan AOP perairan ini mungkin tidak berlaku di berbagai kondisi kejernihan air wilayah perairan terumbu karang dan pesisir.

Citra Sentinel-2 sendiri digunakan karena memiliki resolusi spasial 10 meter dan lebih baik jika dibandingkan dengan citra lainnya yang bisa diakses secara gratis. Citra aqua-MODIS digunakan karena memiliki produk berupa peta konsentrasi klorofil-a dengan resolusi temporal harian. Selain itu, citra aqua-MODIS juga merupakan citra yang bebas akses meskipun memiliki resolusi spasial yang cukup kasar (4 km). Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah menguji keandalan metode pemetaan cepat batimetri perairan dangkal dengan menggunakan data komposit citra Sentinel-2, konsentrasi klorofil-a dari citra aqua-MODIS pada *platform* GEE sehingga dapat diketahui kelemahan dan kelebihan pemetaan cepat batimetri di wilayah penelitian. Adapun penelitian ini memiliki batasan kajian pada faktor pengaruh konsentrasi klorofil-a terhadap interpretasi kedalaman dari citra Sentinel-2.

METODE PENELITIAN

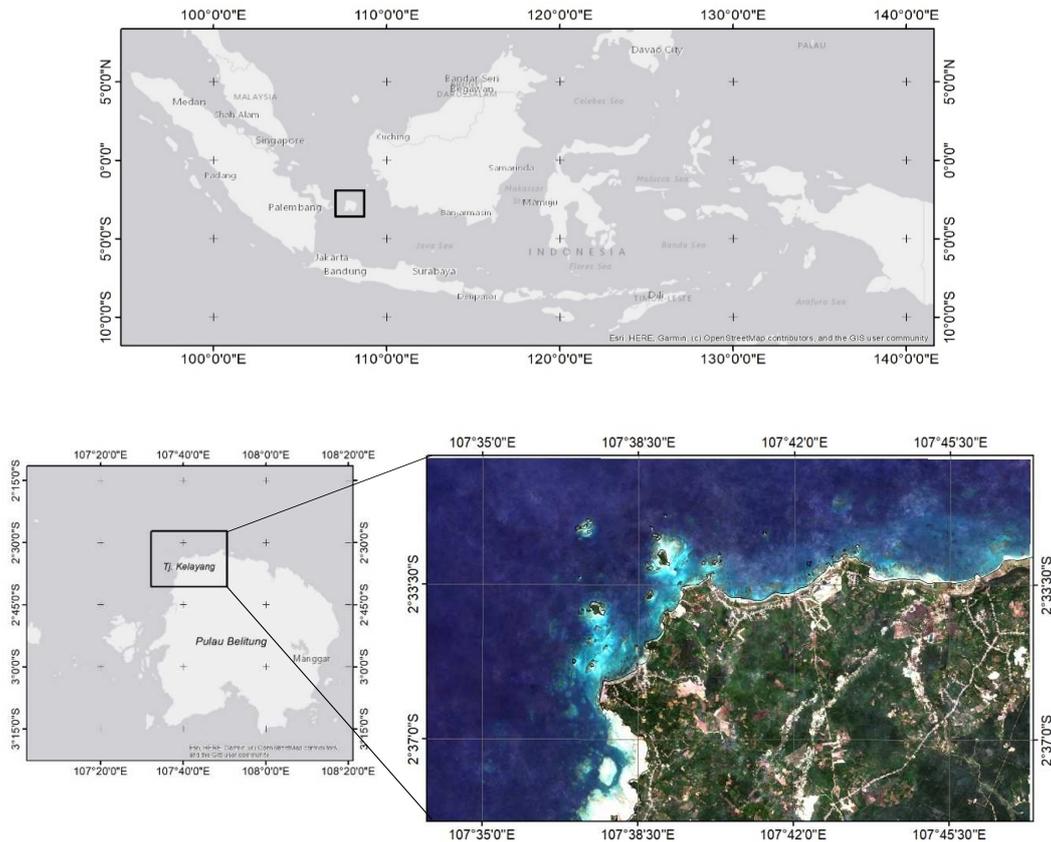
Area Kajian

Penelitian ini dilakukan di Tanjung Kelayang, Pulau Belitung, Indonesia (Gambar 1). Secara geografis lokasi penelitian mencakup wilayah koordinat 2,53 LS - 107,6 BT dan 2,60 LS - 107,74 BT. Tanjung Kelayang memiliki kondisi perairan yang relatif jernih dan memiliki pasang surut diurnal dengan satu kali pasang surut dan kisaran pasang rata-rata adalah 2,4 m (Dewi et al., 2020). Berdasarkan hasil penelitian (Dewi et al., 2020) di wilayah yang sama, Tanjung Kelayang memiliki kedalaman perairan 0 sampai dengan 30 meter. Area perairan dangkal di area penelitian cukup luas dan memiliki keanekaragaman tutupan dasar, seperti pasir, *rubble*, bebatuan, terumbu karang dan lamun (Gambar 2). Berdasarkan PP Nomor 6 Tahun 2016, Tanjung Kelayang ditetapkan sebagai Kawasan Ekonomi Khusus. Selain itu, Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 50 Tahun 2011, tentang Rencana Induk Pembangunan Kepariwisata Nasional Tahun 2010-2025, menetapkan Tanjung Kelayang sebagai 1 dari 10 prioritas Kawasan Strategis Pariwisata Nasional (KSPN) yang termasuk dalam Wilayah Pengembangan Strategis (WPS) 5, yaitu Jambi–Palembang–Pangkal Pinang–Tanjung Pandan (Moerwanto & Junoasmoro, 2017). Keunggulan geostrategis dimiliki Tanjung Kelayang yang terletak diantara Indonesia dengan negara ASEAN lainnya semakin meningkatkan potensi pariwisata yang dimiliki. Oleh karena itu, studi pesisir penting dilakukan untuk mendukung konsep pengembangan pariwisata berkelanjutan dan berwawasan lingkungan, salah satunya pelaksanaan pemetaan cepat batimetri untuk KEK Tanjung Kelayang.

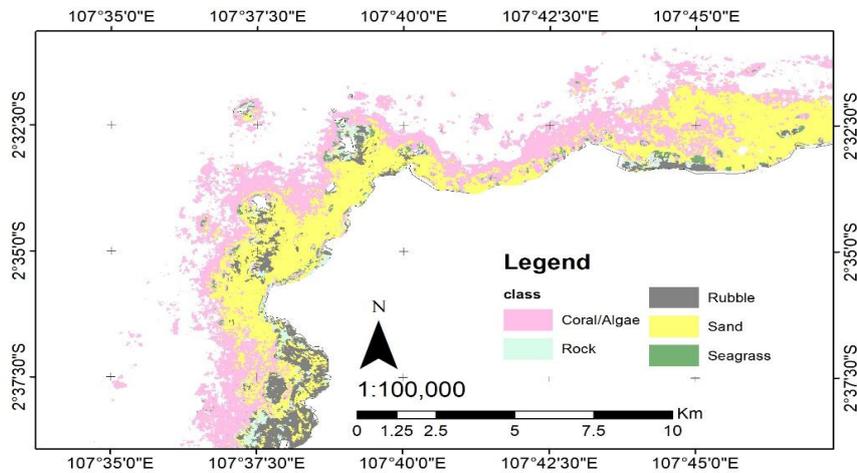
Data

Sentinel-2

Sentinel-2 merupakan satelit multispektral yang menyediakan citra satelit dengan resolusi spasial sampai dengan 10 meter. Sensor pada satelit Sentinel terdiri dari 13 band dengan berbagai tingkat resolusi spasial antara 10 sampai dengan 60 meter. Citra ini bisa diakses secara gratis dari ESA (European Space Agency). Misi Sentinel-2 didedikasikan untuk memantau sumberdaya wilayah daratan, pesisir dan laut juga kebencanaan (Ulfa et al., 2019).



Gambar 1. Citra Sentinel-2 komposit 432 (*true color*) Tj. Kelayang



Gambar 2. Tutupan dasar perairan dangkal Tanjung Kelayang
(Sumber: <https://allencoralatlas.org/atlas/#10.67/-2.5771/107.6534>)

Pada penelitian ini, *band* yang digunakan untuk kebutuhan membangun komposit citra adalah *band* biru, hijau, merah, *red-edge* dan infra merah dekat (NIR) dengan resolusi spasial yang diseragamkan menjadi 10 meter. Algoritma pra-pemrosesan *clean-coastal-water* (Li et al., 2021a) kemudian diaplikasikan pada dataset citra Sentinel-2 *surface reflectance*. Algoritma pra-pemrosesan tersebut sudah termasuk koreksi awan, atmosfer, kilau matahari (*sun-glint*), komposit citra dan normalisasi radiometrik untuk mengatasi interferensi intra dan antar citra. Selanjutnya, algoritma tersebut diaplikasikan untuk membangun citra komposit multi-temporal 3 bulan, 6 bulan, dan 12 bulan pada periode tanggal perekaman 1 Januari 2020 sampai dengan 31 Desember 2020. Selain itu, algoritma

juga diaplikasikan pada citra perekaman tunggal, yakni perekaman tanggal 15 Maret 2020. Citra perekaman tunggal ini dipilih dari *scene* citra yang paling bersih dari tutupan awan (persentase tutupan awan kurang dari 5%). Citra perekaman tunggal digunakan sebagai pembanding untuk mengetahui mana yang lebih akurat antara citra komposit dengan citra perekaman tunggal untuk pemetaan batimetri perairan dangkal di daerah penelitian.

Proses komposit citra Sentinel-2 sangat penting untuk estimasi nilai batimetri di perairan dangkal secara optik. Kemampuan untuk membuat komposit citra penginderaan jauh dengan menghitung median setiap piksel dalam citra dalam rentang waktu tertentu dapat mengurangi masalah

intra dan antar citra yang terkait dengan permukaan air dan kondisi kualitas air, serta kondisi optik perairan (Traganos et al., 2018). Komposit *clean coastal water* dari citra Sentinel-2 level 2A (*surface reflectance*) di platform *Google Earth Engine* (GEE) dibangun dengan memanggil dataset Sentinel-2 level 2A tanggal perekaman 01-01-2020 sampai dengan 31-12-2020 menggunakan *script ee.ImageCollection.filterDate()*. Tahap pertama adalah membuat *region of interest* (roi) area penelitian menggunakan *script var roi = ee.Geometry.Polygon({});*. Kemudian, fungsi *masking* disusun dengan menggunakan *band bitmask QA60* yang berisi informasi awan dan awan *cirrus* diaplikasikan untuk *masking* awan dan awan *cirrus* dan menskalakan nilai reflektan citra BOA (*Bottom of Atmospheric*) sebesar 10.000 (nilai kuantifikasi citra Sentinel-2). Selain itu, diaplikasikan juga *Scene Classification Map* (SCL) *band* untuk *masking* pada area bukan tubuh air (*non-water region*) seperti area bayangan awan, vegetasi, lahan terbuka, awan, dan *cirrus*. Selanjutnya, untuk *masking* wilayah perairan keruh, *sun-glint*, dan piksel pecah gelombang digunakan filter dari *threshold* beberapa *band*, seperti *band* hijau >0.01 , *band* red edge 1 <0.1 , *band* NIR <0.03 , *band* water vapor $0.005 - 0.03$. *Masking* wilayah daratan digunakan algoritma *Normalize Difference Water Index* (NDWI) dengan persamaan sebagai berikut:

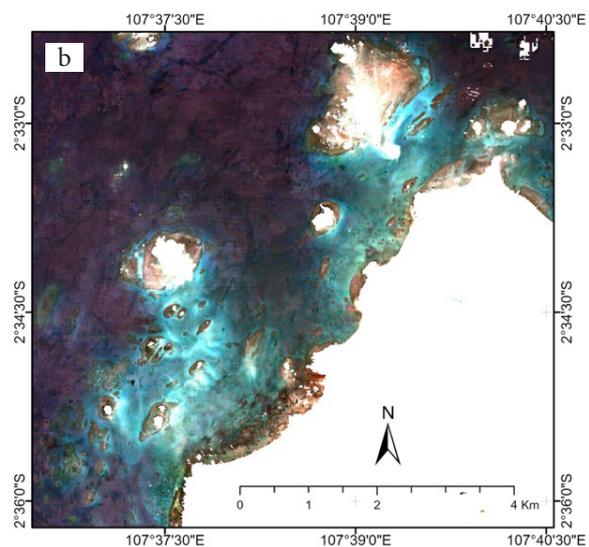
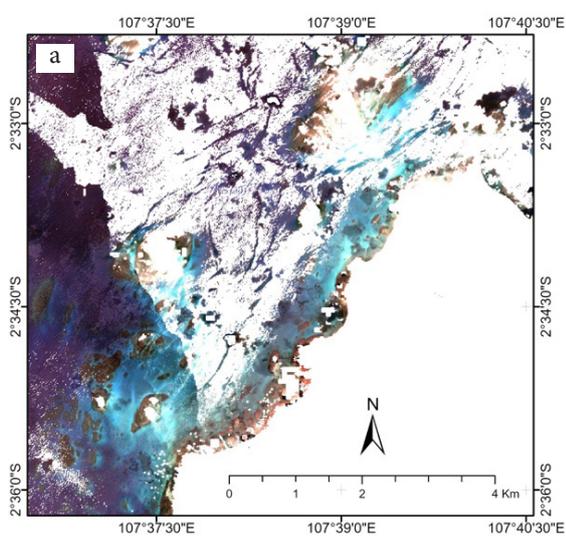
$$NDWI = \frac{\rho(\text{Green}) - \rho(\text{NIR})}{\rho(\text{Green}) + \rho(\text{NIR})} \quad (\text{McFeeters, 1996})$$

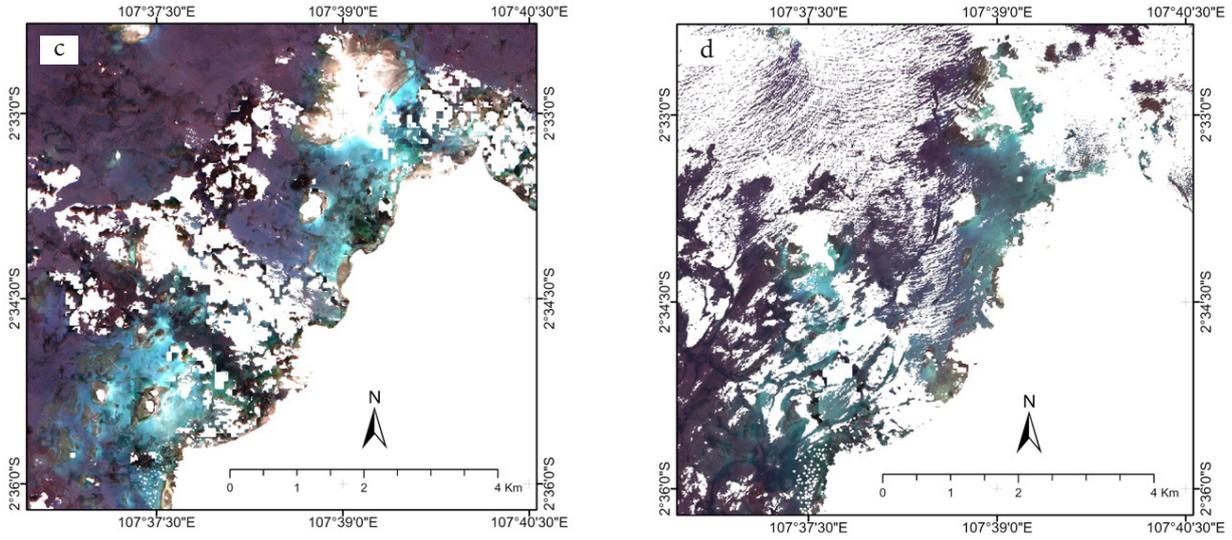
Dimana $\rho(\text{Green})$ adalah panjang *band* hijau, dan $\rho(\text{NIR})$ adalah panjang *band* infra merah dekat.

Tahap selanjutnya adalah membangun komposit *clean-coastal-water* citra Sentinel-2. Citra composite *clean-coastal-water* merupakan dataset yang dibangun dari agregat citra Sentinel-2 MultiSpectral Instrument, Level-2A *Surface Reflectance* selama periode tertentu (3, 6, dan 12 bulan) menggunakan fungsi "*median reducer*" di GEE. Pemilihan citra didasarkan pada kondisi yang minim tutupan awan dan bayangan awan, *sun glint*, piksel pecah gelombang dan kondisi kekeruhan perairan. Penggabungan set citra terpilih tersebut menjadi satu keluaran komposit citra *clean-coastal-water*

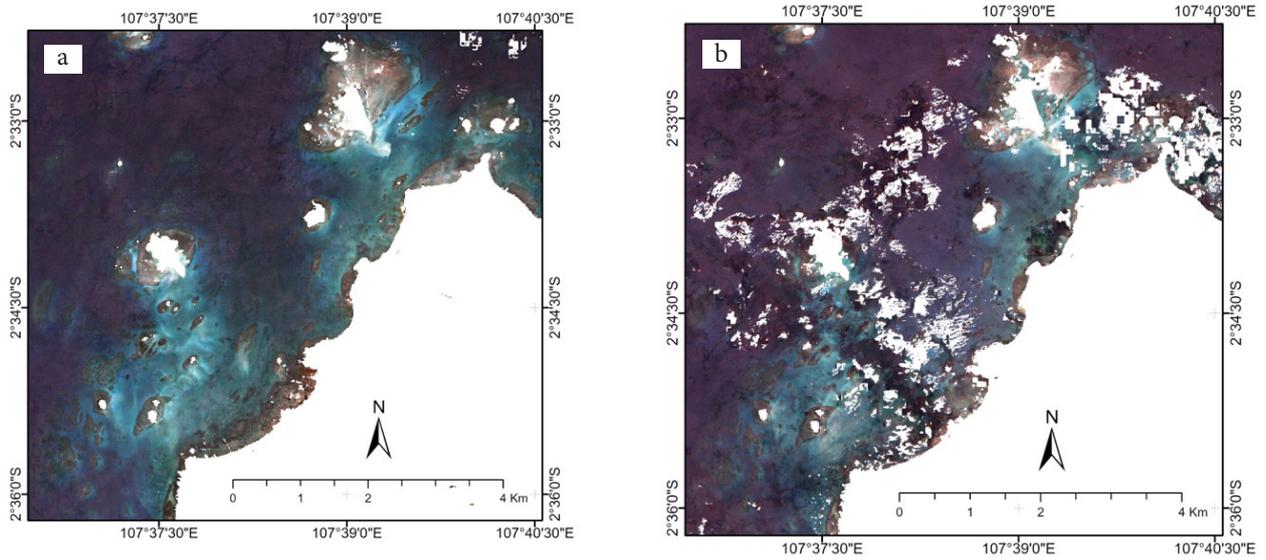
yang akan dijadikan data input untuk ekstraksi batimetri perairan dangkal. Gambar 3-5a menunjukkan hasil komposit *clean coastal water* untuk citra Sentinel-2 wilayah penelitian Tanjung Kelayang dengan komposit 3 bulan, 6 bulan, dan 12 bulan. Gambar 5b menunjukkan hasil *clean coastal water* pada citra perekaman tunggal di wilayah penelitian.

Hasil komposit "*clean coastal water*" citra Sentinel-2 Tahun 2020 menunjukkan bahwa tidak semua proses komposit menghasilkan citra yang bersih bebas gangguan awan, *sunglint*, dan piksel pecah gelombang. Beberapa diantaranya memiliki banyak gangguan sehingga citra komposit yang dihasilkan berupa pseudo-images (citra semu) yang banyak tertutup *masking*, seperti pada citra komposit rentang perekaman 3 bulan Q1 (Januari-Maret), Q3 (Juli-September), Q4 (Oktober-Desember) dan rentang perekaman 6 bulan S2 (Juli-Desember). Gangguan tersebut didominasi oleh keberadaan tutupan awan yang cukup luas pada bulan-bulan musim hujan dan area perairan yang mengalami *sunglint* saat citra direkam. Kondisi tersebut menyebabkan sebagian area yang ingin dipetakan tidak dapat dihitung nilai kedalaman perairannya. Meskipun demikian, pada rentang perekaman citra 3 bulan Q2 (April-Juni) dan 12 bulan (Januari-Desember), proses composite "*clean coastal water*" mampu menghasilkan citra komposit yang lebih baik, yakni tidak banyak area yang tertutup *masking*. Hal ini sejalan dengan hasil eksperimen Li et al., (2021) yang menunjukkan bahwa citra komposit dari rentang waktu perekaman 12 bulan dapat menghasilkan citra yang paling sedikit gangguan dan bisa digunakan sebagai data input model SDB. Akan tetapi, jika citra hasil komposit tersebut dibandingkan dengan citra hasil perekaman tunggal (Gambar 5b), pada citra komposit masih terlihat artefak "tambal-sulam" piksel citra. Hal ini terjadi karena proses komposit sendiri yang menggabungkan berbagai piksel dari semua *scene* dalam satu rentang waktu perekaman dan mengambil nilai median dari nilai piksel semua *scene*. Maka dari itu, sama seperti yang dikatakan oleh Traganos et al., (2018) bahwa rentang waktu perekaman citra yang dipilih dapat memengaruhi kualitas komposit, dan disarankan untuk memilih rentang waktu berdasarkan tanggal akuisisi data in situ mereka dan kondisi permukaan serta kolom air yang optimal dari wilayah penelitian.

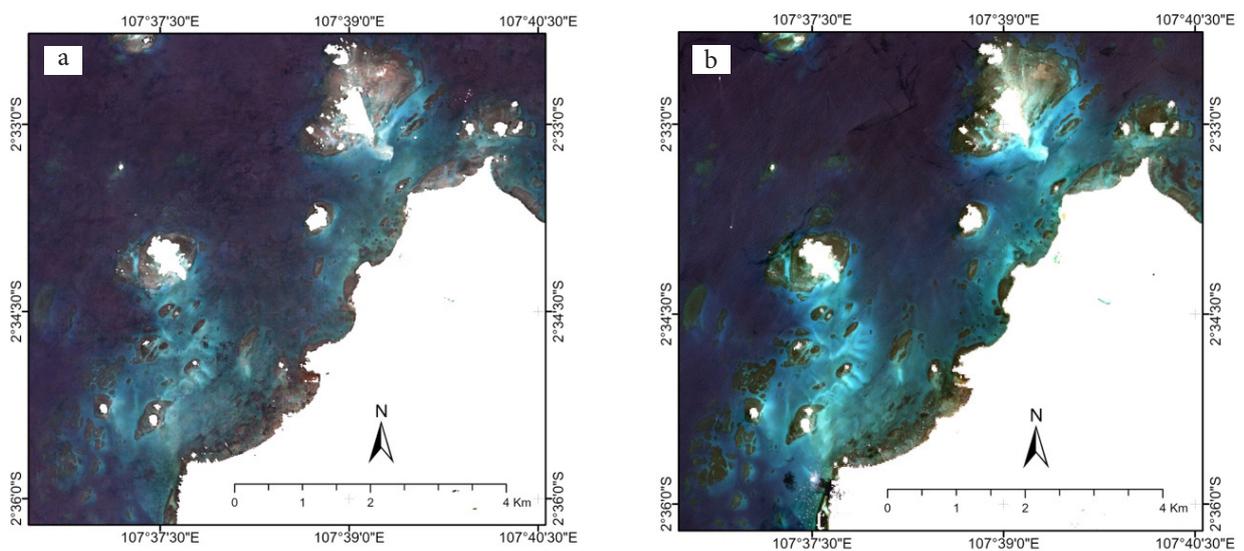




Gambar 3. *Clean coastal water composite* Sentinel-2 3 bulan: (a) Januari – Maret (Q1), (b) April – Juni (Q2), (c) Juli – September (Q3), (d) Oktober – Desember (Q4).



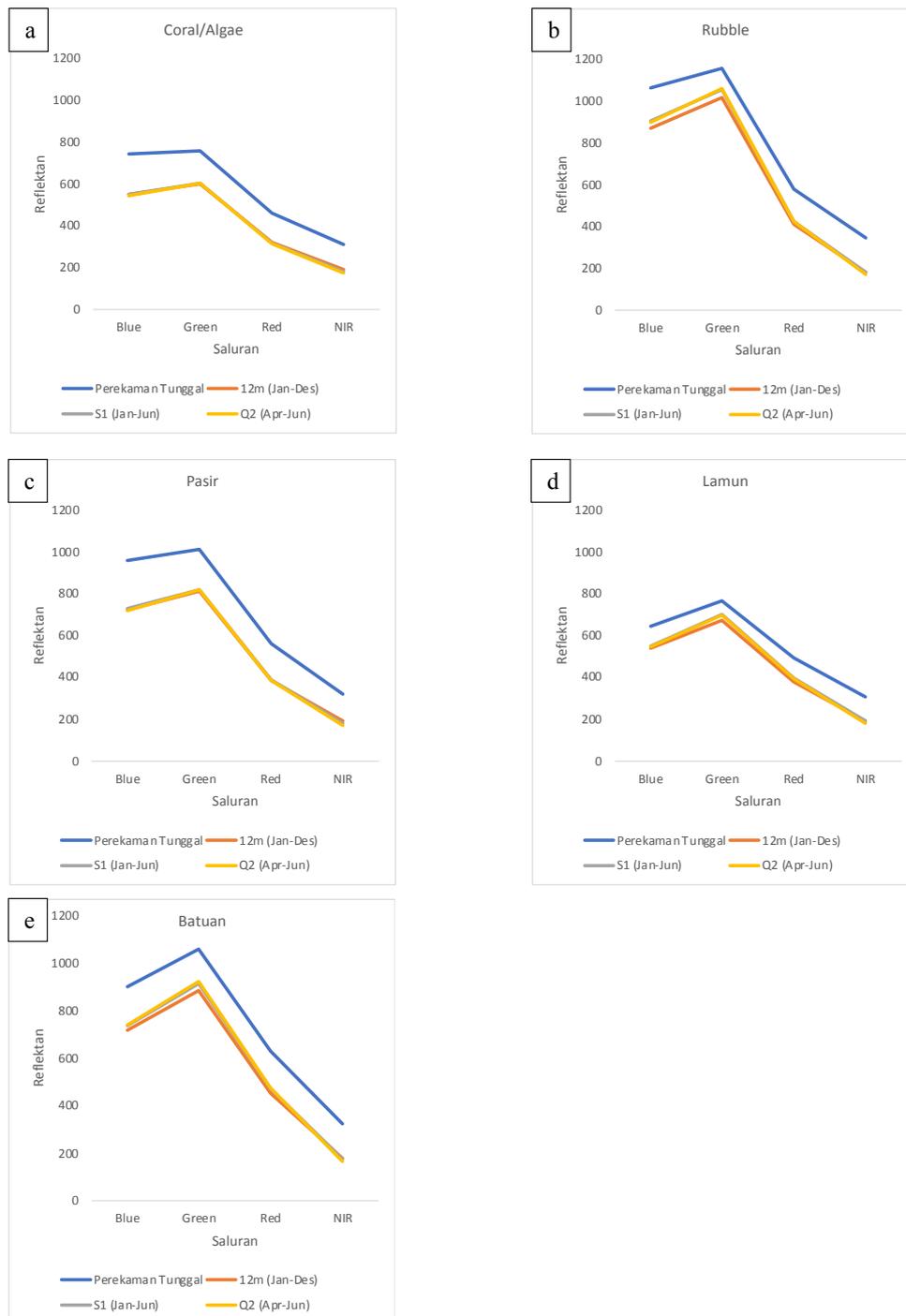
Gambar 4. *Clean coastal water composite* Sentinel-2 6 bulan: (a) Januari – Juni (S1) dan (b) Juli – Desember (S2).



Gambar 5. *Clean coastal water Composite* Sentinel-2: (a) 12 bulan Januari – Desember (12m), dan (b) perekaman tunggal 15 Maret 2020 (SD)

Pengaruh proses komposit terhadap nilai reflektan pada citra dapat dilihat dengan membuat pola nilai pantulan spectral dari objek tutupan dasar perairannya. Pola pantulan tersebut diperoleh dengan mengambil nilai reflektan pada masing-masing *roi* tutupan dasar perairan. Pada penelitian ini, digunakan peta tutupan dasar perairan dari *Allencoralatlas* dimana tipe tutupan dasar perairan di daerah penelitian terdiri dari *coral/algae*, pasir, lamun, *rubble*, dan bebatuan. Adapun citra yang digunakan untuk melihat pola pantulan spectral adalah citra perekaman tunggal, dan citra komposit dengan gangguan (*noises*) yang minim, yaitu citra komposit 3 bulan Q2 (April-Juni), komposit 6 bulan S1 (Januari-Juni), dan komposit 12 bulan (Januari-Desember) (Gambar 6).

Dari pola pantulan spektral 5 objek tutupan dasar (*coral/algae*, *rubble*, pasir, lamun, dan batuan) di perairan Tanjung Kelayang diketahui bahwa pola pantulan spektral objek relatif sama, hanya saja nilai reflektan dari citra hasil komposit lebih rendah dibandingkan nilai reflektan dari citra perekaman tunggal. Pada saat proses pembangunan citra komposit, pemilihan piksel bebas gangguan awan, piksel pecah gelombang dan *sunlint* diambil dari nilai median deretan piksel citra dengan kondisi atmosfer yang berbeda-beda. Hal tersebut diduga menjadi sebab nilai reflektan pada citra komposit terdegradasi dan lebih rendah dari pada citra perekaman tunggal dan akan berpengaruh terhadap model SDB yang akan dihasilkan (Traganos *et al.*, 2018).



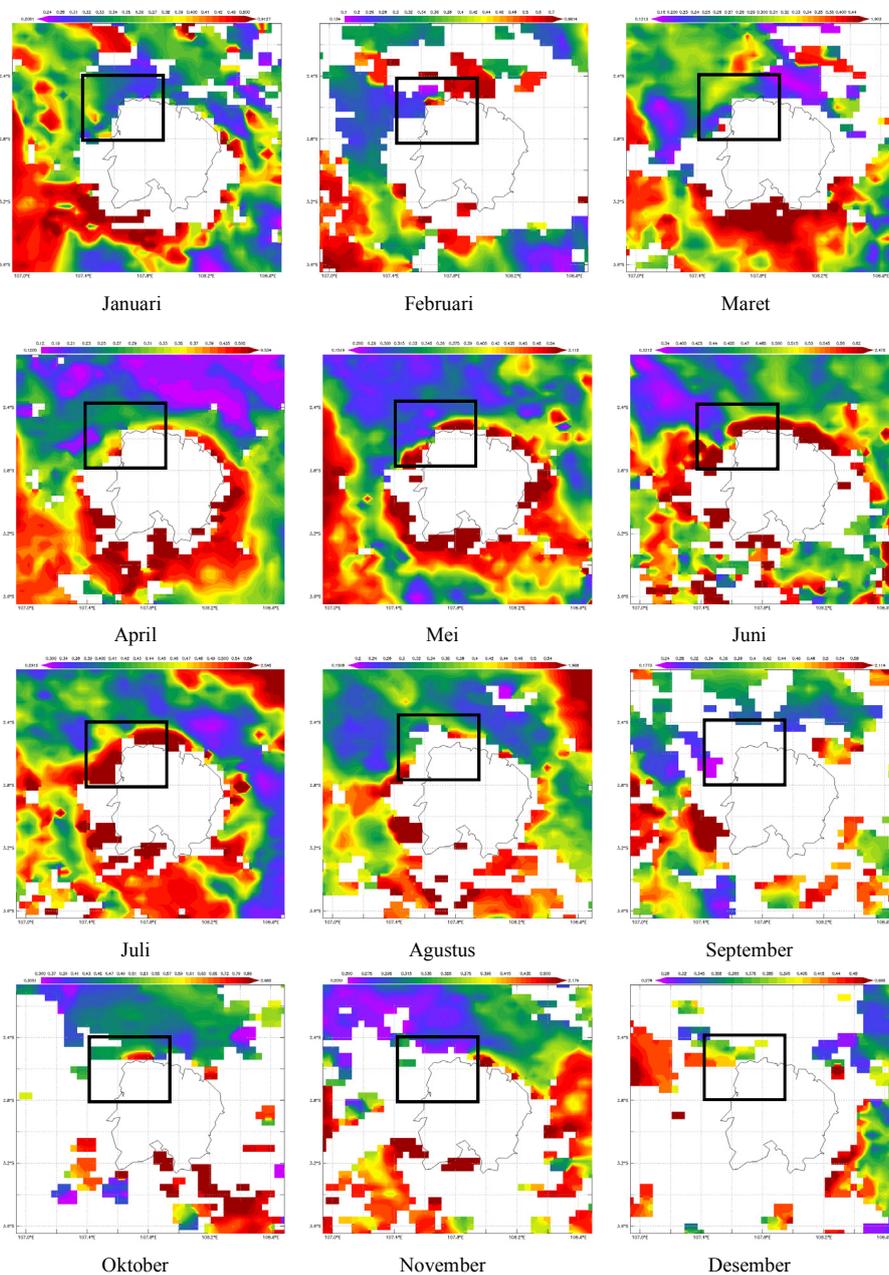
Gambar 6. Pola pantulan spektral tutupan dasar perairan Tanjung Kelayang: (a) *Coral/Algae*, (b) *Rubble*, (c) Pasir, (d) Lamun, dan (e) Batuan pada citra Sentinel-2 perekaman tunggal dan komposit 3 bulan, 6 bulan, dan 12 bulan.

Klorofil-a

Tingkat kejernihan perairan sinoptik salah satunya dipengaruhi oleh kandungan klorofil-a (Barnes et al., 2013) Data konsentrasi klorofil-a di perairan Tanjung Kelayang diperoleh dari citra aqua-MODIS level 3 komposit bulanan, dengan resolusi spasial 4x4 kilometer. Konsentrasi klorofil-a komposit bulanan level 3 aqua-MODIS diunduh dari laman NASA's Ocean Biology Processing Group. Data Level 3 adalah variabel geofisika turunan yang telah diproyeksikan ke dalam grid spasial selama periode waktu tertentu dan diarsipkan dalam dua tipe yakni *binned* dan *mapped*. Produk konsentrasi klorofil-a aqua-MODIS Level 3 dihitung dengan algoritma MODIS OC3M (O'reilly et al., 1998). Algoritma OC3M merupakan fungsi polinomial yang menghubungkan reflektansi penginderaan jauh pada panjang gelombang 443, 488, dan 547 nm terhadap konsentrasi klorofil-a (Hussein et al., 2021).

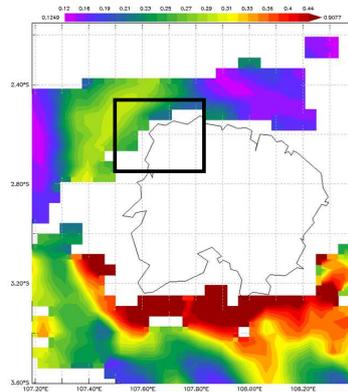
Spasio-temporal konsentrasi klorofil-a di wilayah perairan Tanjung Kelayang pada periode perekaman tahun

2020 disajikan pada Gambar 7. Konsentrasi klorofil-a di perairan Tanjung Kelayang bervariasi, yaitu antara 0,1 sampai dengan 0,6 mg/m³. Konsentrasi klorofil-a di Tanjung Kelayang dipengaruhi karakteristik pola arus musiman (Bukhari et al., 2017). Pada musim barat (Desember - Februari) hingga peralihan I (Maret - Mei) arus dominan menuju ke arah timur hingga Selatan, dengan konsentrasi klorofil-a relatif rendah. Namun terjadi kenaikan konsentrasi klorofil-a pada bulan April sampai Juli. Konsentrasi klorofil-a pada musim timur (Juni - Agustus) relative lebih tinggi dibandingkan saat musim barat, dan konsentrasinya mengikuti arus permukaan laut dominan dari arah tenggara menuju ke arah barat laut. Pada musim peralihan (September - November), arah arus lebih dominan ke arah selatan terbelokkan ke arah tenggara dari utara. Pada kondisi perekaman tunggal, yaitu pada tanggal 15 Maret 2020, konsentrasi klorofil-a di wilayah perairan Tanjung Kelayang memiliki rerata nilai konsentrasi cukup rendah, yaitu 0,232 mg/m³ (Gambar 8).

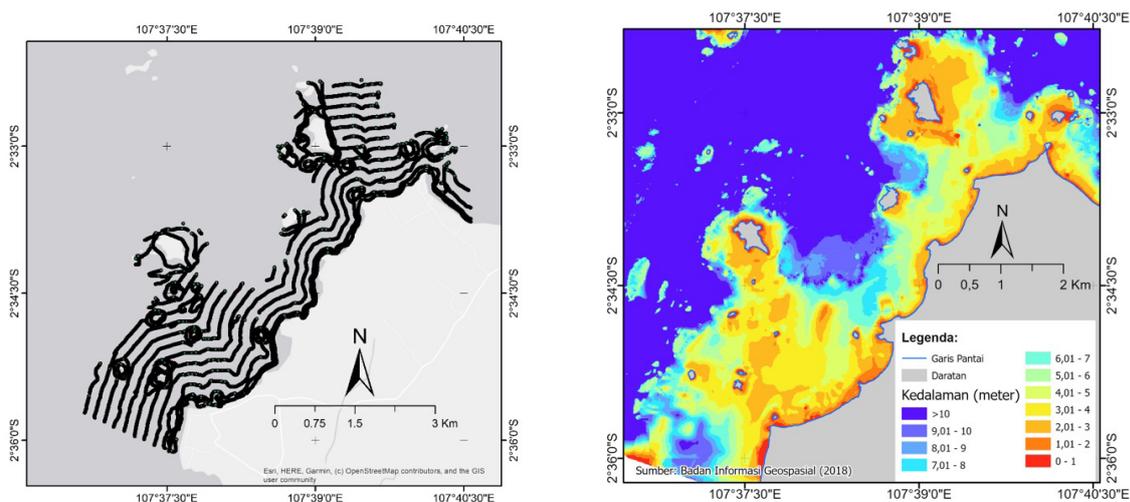


Gambar 7. Spasio-temporal rerata konsentasi klorofil-a bulanan di perairan Tanjung Kelayang dan sekitarnya Tahun 2020.

Sumber: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/>



Gambar 8. Konsentrasi klorofil-a harian pada tanggal 15 Maret 2020 di perairan Tanjung Kelayang dan sekitarnya. Sumber: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/>.



Gambar 9 (a) Titik kedalaman hasil peneruman SBES Tanjung Kelayang, (b) Peta Batimetri Tanjung Kelayang dari Badan Informasi Geospasial.

Metode

Pengukuran batimetri

Data pemeruman dari *Single Beam Echo Sounder* (SBES) digunakan untuk uji akurasi model SDB yang dihasilkan (Gambar 9a). Data pemeruman SBES diperoleh dari hasil survei lapangan Badan Informasi Geospasial yang dilaksanakan pada bulan Agustus 2018. Berdasarkan data SBES, variasi kedalaman di perairan dangkal Tanjung Kelayang berkisar antara 0,69 meter – 9,9 meter dan sudah terkoreksi pasang-surut berdasarkan nilai *Mean Sea Level* (MSL). Selain itu, diperoleh juga data hasil pemeruman yang sudah diolah menjadi *Depth Elevation Model* batimetri dengan ukuran grid tidak lebih dari 2 m (Gambar 9b). Adapun jumlah titik sample untuk uji akurasi yang digunakan sebanyak 148.444 titik kedalaman.

Ekstraksi batimetri perairan dangkal

Pada dasarnya, ekstraksi kedalaman dari citra satelit optis-pasif berlandaskan asumsi bahwa semakin dalam kolom air maka gelombang elektromagnetik yang kembali dipantulkan (*water leaving radiance*) ke sensor semakin lemah, sehingga ketika pantulan dari tubuh air tersebut terlalu lemah untuk ditangkap oleh sensor maka tubuh air tersebut didefinisikan sebagai wilayah perairan dalam (Zoffoli et al., 2014). Tahap pertama untuk estimasi batimetri adalah dengan menghitung

nilai *remotes sensing reflectance* ($Rrs(l)$) dari nilai median citra *composite surface reflectance* citra sentinel 2A $\rho m(\lambda)$ pada persamaan sebagai berikut:

$$Rrs(\lambda) = \frac{\rho m(\lambda)}{\pi} \quad (\text{Vanhellemont \& Ruddick, 2014})$$

Selanjutnya, menghitung nilai reflektan bawah permukaan air ($rrs(\lambda)$) dari nilai *remote sensing reflectance* ($Rrs(\lambda)$) untuk menghilangkan efek permukaan air-udara dengan persamaan sebagai berikut:

$$(rrs(\lambda)) = \frac{(Rrs(\lambda))}{0.52 + 1.7 (Rrs(\lambda))} \quad (\text{Lee et al., 2013})$$

Pada penelitian ini digunakan nilai rerata konsentrasi klorofil-a dari citra MODIS di perairan Tanjung Kelayang. Pemanfaatan data MODIS untuk menunjang pemetaan dasar perairan sebelumnya telah dilakukan oleh Giardino et al. dengan kombinasi citra Landsat-8 OLI, MODIS, dan RapidEye untuk memodelkan kondisi kualitas air dan kemudian memetakan dasar perairan di Danau Garda, Italia (Giardino et al. 2014). Nilai parameter klorofil-a yang digunakan sebagai eksponensial dari persamaan *band ratio* pada model SDB dari Jiwei Li, et al (2021) dicurigai sangat mempengaruhi hasil akurasi dari model SDB yang dihasilkan. Konsentrasi kandungan klorofil-a di perairan samudera sendiri diketahui terpengaruh

oleh musim (Hu, Lee, and Franz 2012) dimana kandungan klorofil-a tersebut bisa sangat dinamis dari waktu ke waktu. Song et al menambahkan bahwa pada perairan pesisir, akurasi konsentrasi klorofil-a permukaan yang diturunkan dari satelit sangat dipengaruhi oleh resuspensi sedimen yang disebabkan oleh angin, arus pasang surut dan pencampuran (Song et al. 2021). Selain itu, di wilayah perairan dangkal yang memiliki keragaman habitat bentik, kandungan klorofil-a tidak hanya dipengaruhi oleh musim namun bisa sangat terpengaruh oleh tutupan habitat bentik seperti makro alga, terumbu karang, dan lamun, juga pengaruh sedimentasi dari daratan, gelombang, dan arus di perairan dangkal. Dengan demikian, asumsi bahwa nilai klorofil-a dapat merepresentasikan kondisi IOP dan AOP perairan ini mungkin tidak berlaku di berbagai kondisi kejernihan air wilayah perairan terumbu karang dan pesisir. Hal ini membuka peluang bagi para peneliti untuk menyelidiki dinamika kandungan klorofil-a dan pengaruhnya terhadap pengembangan model SDB di masa yang akan datang. Estimasi nilai kedalaman (z) kemudian dihitung dengan menggunakan metode *band-ratio* dari Stumpf et al., (2003) yang dimodifikasi oleh Li et al., (2021), yaitu menggunakan nilai konstanta 52,073 untuk $m0$ dan konstanta 50,156 untuk $m1$. Nilai konstanta tersebut diperoleh dari hasil eksperimen Morel & Maritorena, (2001) terhadap air murni (kandungan klorofil-a = 0). Sedangkan untuk nilai eksponensial diperoleh dari penyesuaian menurut kurva respons spektral citra satelit Planet Dove pada eksperimen yang dilakukan oleh Li et al., (2019). Persamaan ini digunakan atas dasar asumsi bahwa kondisi perairan pesisir Tanjung Kelayang sama dengan kondisi perairan pada riset sebelumnya (Li et al., 2021) yakni perairan kasus-1 dengan kedalaman eufotik yang serupa. Dengan demikian, konstanta untuk parameter dalam persamaan *band-ratio* yang digunakan mengacu pada hasil riset Li et al., (2021) Adapun persamaan estimasi kedalaman adalah sebagai berikut:

$$z(\text{kedalaman}) = (52.073 \times e^{(0.957 \times \text{chl}a)}) \frac{\ln(1000 \times \text{rrs blue})}{\ln(1000 \times \text{rrs green})} - 50.156 \times e^{(0.957 \times \text{chl}a)} \quad (\text{Li et al., 2021})$$

Konsentrasi klorofil-a (*Chl-a*) yang digunakan dalam perhitungan parameter $m0$ dan $m1$ adalah rerata nilai klorofil-a

dari citra aqua-MODIS di perairan Tanjung Kelayang yang disajikan pada Tabel 2.

Uji akurasi

Uji akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil ekstraksi nilai kedalaman (SDB) dari komposit citra dan citra perekaman tunggal Sentinel-2 dengan data kedalaman hasil pemeruman di daerah penelitian. Uji akurasi dilakukan dengan menghitung nilai R^2 , *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengevaluasi model batimetri yang dihasilkan. Pertama, yaitu dengan melihat korelasi (nilai R kuadrat) antara hasil ekstraksi nilai kedalaman dari komposit citra Sentinel-2 dengan data hasil pemeruman di daerah penelitian dalam bentuk diagram pencar. Nilai R^2 mengukur sejauh mana variabilitas output dapat dijelaskan oleh variabilitas input pada model regresi. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, di mana semakin tinggi nilainya, semakin baik model dapat menjelaskan variasi data. Jika nilai R^2 mendekati 1 menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan semua variasi data, sedangkan jika nilai R^2 mendekati 0 maka model tidak dapat menjelaskan variasi apa pun.

Mean Absolute Error (MAE) adalah ukuran kesalahan antara nilai kedalaman hasil prediksi dengan nilai kedalaman hasil pengukuran lapangan tanpa memperhatikan arah kesalahan tersebut. MAE memberikan bobot yang sama untuk setiap kesalahan, sehingga dapat mengukur ketelitian lebih objektif dan realistis untuk sampel yang bersifat kontinyu (Willmott & Matsuura, 2005). MAE memberikan gambaran tentang sejauh mana rata-rata kesalahan prediksi kedalaman dari nilai actual (hasil pengukuran). Adapun persamaan MAE disajikan sebagai berikut:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x'_i| \quad (\text{Willmott \& Matsuura, 2005})$$

Dimana x_i adalah nilai prediksi kedalaman, x'_i adalah nilai yang dianggap benar (nilai kedalaman hasil pengukuran lapangan), dan n adalah banyak data.

Root Mean Square Error (RMSE) adalah ukuran yang umum digunakan untuk membedakan antara nilai kedalaman yang diprediksi oleh model dan nilai sebenarnya di lapangan

Tabel 2. Rerata nilai konsentrasi klorofil-a (*Chl-a*) dari citra aqua-MODIS yang digunakan dalam perhitungan parameter $m0$ dan $m1$ untuk estimasi batimetri dengan *band-ratio* di perairan Tanjung Kelayang pada Tahun 2020

Bulan	<i>Chl-a</i> (mg/ m ³)	Quartal	<i>Chl-a</i> (mg/ m ³)	Semester	<i>Chl-a</i> (mg/ m ³)	1 tahun	Perekaman tunggal
Januari	0,316	Q1 (Jan-Mar)	0,302	S1 (Jan-Jun)	0,370	0,379	0,232
Februari	0,333	Q2 (Apr-Jun)	0,439	S2 (Jul-Des)	0,389		
Maret	0,257	Q3 (Jul-Sep)	0,373				
April	0,320	Q4 (Okt-Des)	0,404				
Mei	0,369						
Juni	0,627						
Juli	0,623						
Agustus	0,338						
September	0,159						
Oktober	0,593						
November	0,243						
Desember	0,376						

Sumber: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/>

(Willmott & Matsuura, 2006). Adapun persamaan untuk menghitung nilai RMSE disajikan pada persamaan sebagai berikut:

$$RMSE_{(kedalaman)} = \sqrt{\frac{\sum (y - y')^2}{N}} \quad (\text{Willmott \& Matsuura, 2006})$$

Dimana y adalah nilai kedalaman aktual dari hasil pengukuran lapangan, dan y' adalah nilai yang diprediksi dari hasil ekstraksi nilai kedalaman dari citra satelit, dan N adalah jumlah data. Model SDB yang mendekati kondisi riil dari hasil ekstraksi kedalaman perairan dangkal dapat dilihat dari nilai R^2 , MAE, dan RMSE yang dihasilkan dari masing-masing model.

Selain itu, dilakukan juga analisis distribusi spasial residu model SDB yang disajikan dalam sebuah peta dengan menghitung selisih antara nilai kedalaman yang dihasilkan model SDB dan nilai kedalaman dari peta batimetri hasil pemeruman menggunakan SBES dari Badan Informasi Geospasial mengikuti apa yang dilakukan oleh Traganos et al., (2018). Analisis ini dilakukan pada model SDB yang dihasilkan dari citra komposit *clean-coastal-water* yang memiliki sedikit *noises*. Model SDB yang mendekati kondisi riil dapat dilihat

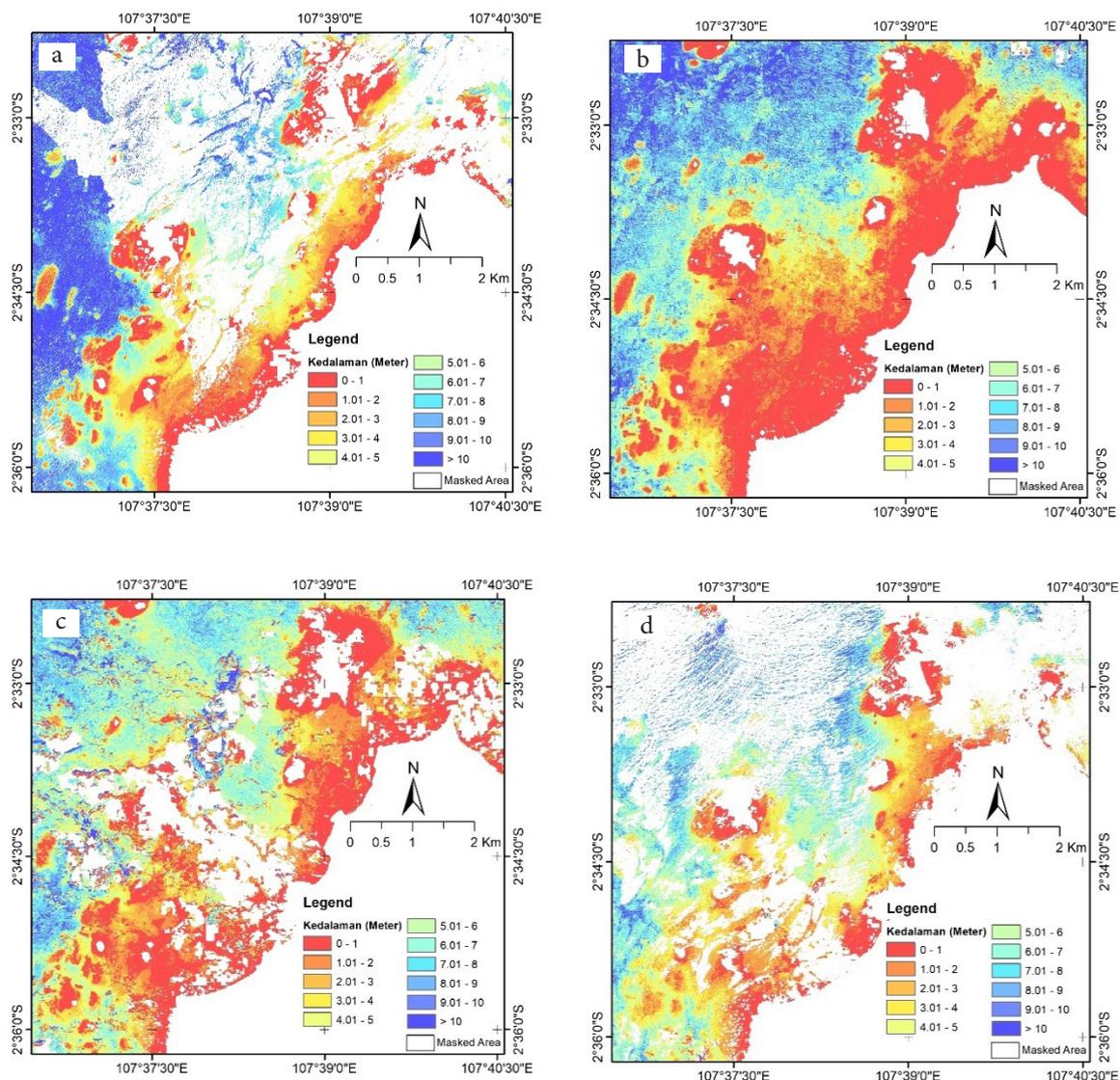
dari nilai dan pola spasial residu model SDB.

HASIL DAN PEMBAHASAN

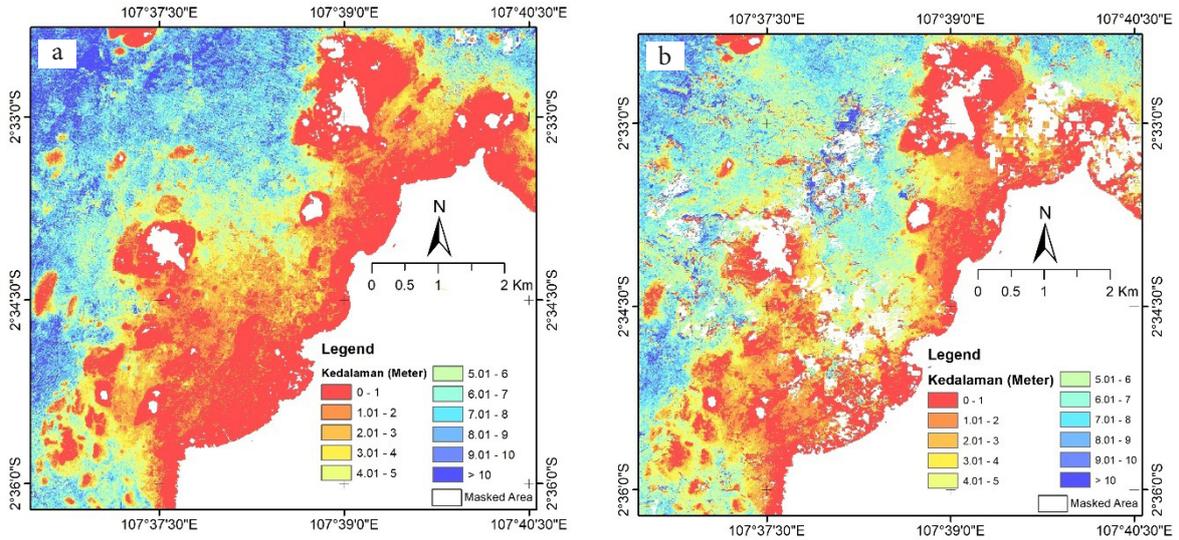
Evaluasi model SDB

Berdasarkan ekstraksi batimetri menggunakan komposit *clear coastal water* dari citra Sentinel 2 diperoleh variasi kedalaman perairan dangkal di Tanjung Kelayang pada kisaran 0 - 10 meter. Visualisasi hasil ekstraksi batimetri ditampilkan dari hasil komposit periode tiga bulanan (Gambar 10), enam bulanan (Gambar 11), komposit citra 12 bulan (Gambar 12a), dan perekaman tunggal pada 15 Maret 2020 (Gambar 12b). Sebagai perbandingan, turut ditampilkan peta batimetri Tanjung Kelayang hasil pemeruman (Gambar 13) yang bersumber dari Badan Informasi Geospasial (2018)

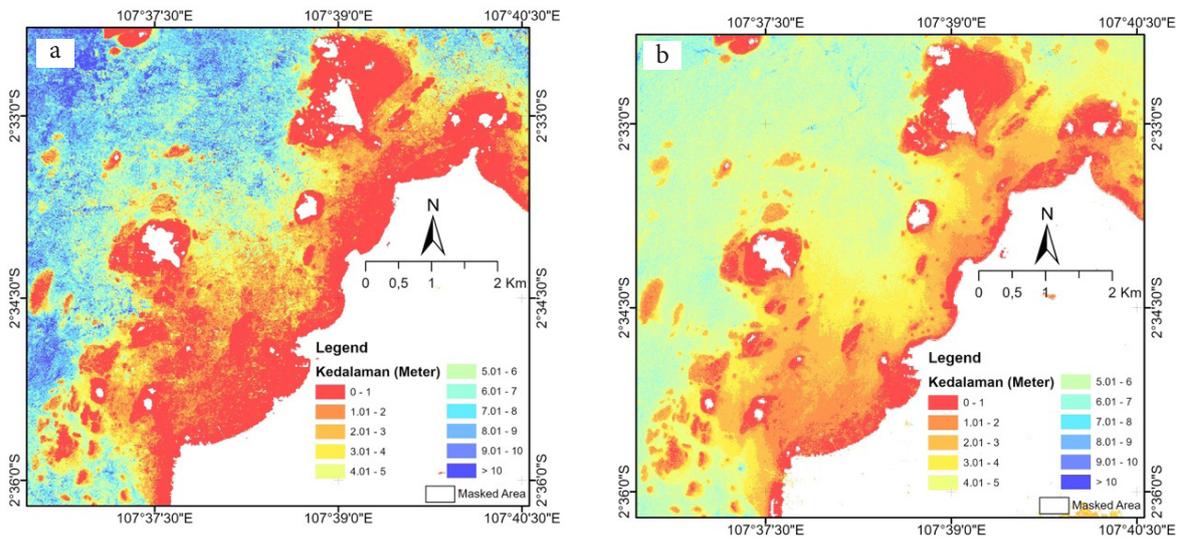
Model SDB dari citra komposit tiga bulan Q1 (Januari-Maret 2020) dengan menggunakan rerata konsentrasi klorofil-a pada rentang waktu yang sama mendapatkan gangguan tutupan awan dan sun-glint, dimana piksel-piksel tersebut tidak lolos seleksi dan termasking dalam proses komposit, sehingga model batimetri yang dihasilkan tidak mencakup seluruh wilayah perairan dangkal Tj. Kelayang (Gambar 10.a). Kondisi serupa pun dialami oleh hasil model



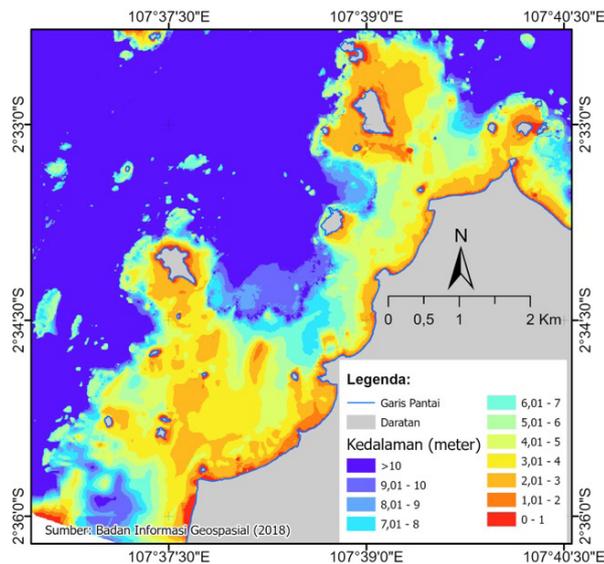
Gambar 10. Variasi kedalaman model SDB dari citra komposit 3 bulan: (a) Januari – Maret, (b) April – Juni, (c) Juli – September, (d) Oktober – Desember



Gambar 11. Variasi kedalaman model SDB dari citra komposit 6 bulan: (a) Januari – Juni dan (b) Juli – Desember.



Gambar 12. Variasi kedalaman model SDB dari : (a) citra komposit 12 bulan (Januari – Desember) dan (b) dari citra perekaman tunggal 15 Maret 2020.



Gambar 13. Peta Batimetri Tanjung Kelayang hasil pemeruman (SBES) oleh Badan Informasi Geospasial

SDB dengan komposit citra Q3 yakni Juli-September 2020 (Gambar 10c), komposit citra Q4 pada rentang Oktober-Desember 2020 (Gambar 10d), dan komposit citra S2 periode Juli-September 2020 (Gambar 11.b). Pada rentang perekaman tersebut, pola gangguanutupan awan dan sunglint ditemukan di area perairan dangkal sebagaimana terlihat dalam Gambar 3c, 3d, dan Gambar 4b. Dengan membandingkan nilai kedalaman dari sejumlah model batimetri perairan dangkal Tanjung Kelayang yang diekstraksi dari komposit citra atau citra perekaman tunggal Sentinel-2 dengan batimetri hasil peneruman diperoleh statistik akurasi yang ditampilkan dalam Tabel 1 dan Gambar 14.

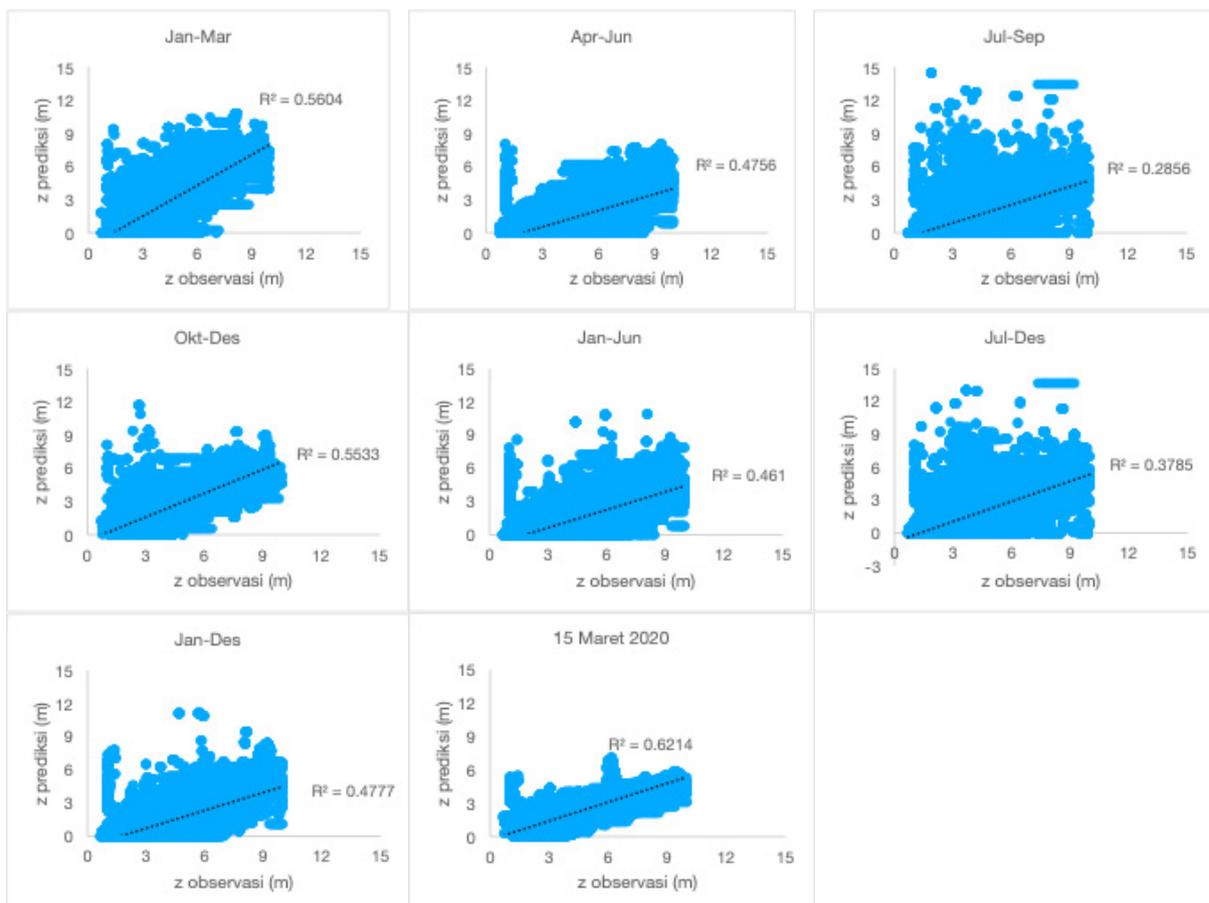
Berdasarkan hasil uji akurasi model SDB Tanjung Kelayang yang disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 14, menunjukkan bahwa nilai R^2 antara 0,29 sampai dengan 0,62, nilai MAE antara 1,70 meter sampai dengan 2,67 meter, dan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) antara 1,97 meter sampai dengan 2,91 meter. Nilai korelasi terbesar menunjukkan nilai

0,62 yang artinya sekitar 62% variasi dalam hasil pengukuran dapat dijelaskan oleh model SDB (Gambar 13). Semakin dekat nilai R^2 dengan 1, semakin baik model dapat menjelaskan variasi dalam data. Selanjutnya, nilai MAE terbaik adalah 1,70 meter yang menunjukkan rata-rata selisih absolut antara hasil prediksi kedalaman dan hasil pengukuran adalah sekitar 1,70 meter. Sementara itu, nilai RMSE terbaik sebesar 1,97 meter menunjukkan rata-rata jarak antara nilai prediksi model kedalaman dengan nilai kedalaman yang sebenarnya (hasil pengukuran) adalah sekitar 1,97 meter. Semakin rendah nilai RMSE, semakin baik performa model SDB dalam melakukan prediksi nilai kedalaman perairan.

Berbeda dengan akurasi yang diperoleh dari penelitian Dewi et al., (2020) dan Li et al., (2021), model batimetri Tj Kelayang hasil perekaman tunggal menunjukkan nilai RMSE sebesar 2,02 meter. Hasil penelitian Li et al., (2021) menggunakan komposit citra clean-coastal-water selama 12 bulan memiliki nilai RMSE 1,2 - 1,9 meter. Sementara itu,

Tabel 1. Hasil uji akurasi hasil pemetaan cepat batimetri

Dataset citra	R^2	MAE (m)	RMSE (m)
Perekaman Tunggal	0,62	1,77	2,02
Q1 (Jan-Mar)	0,56	1,77	2,02
Q2 (Apr-Jun)	0,48	2,67	2,91
Q3 (Jul-Sep)	0,29	2,49	2,79
Q4 (Okt-Des)	0,55	1,70	1,97
S1 (Jan-Jun)	0,46	2,59	2,84
S2 (Jul-Des)	0,38	2,23	2,53
12m (Jan-Des)	0,48	2,52	2,77



Gambar 14. Diagram pencar uji korelasi (R^2) SDB dengan data SBES.

hasil penelitian yang dilakukan oleh Dewi et al., (2020) pada lokasi yang sama, memiliki nilai RMSE kurang dari 0,6 meter. Beberapa factor ditengarai menjadi penyebab perbedaan tingkat akurasi (nilai RMSE) tersebut. Pada penelitian Li et al., (2021), parameter klorofil-a yang digunakan sebagai tuning merupakan data pengukuran in situ (titik pengukuran), sedangkan pada penelitian ini parameter klorofil-a diturunkan dari citra Aqua-MODIS yang memiliki resolusi spasial rendah (4km). Resolusi spasial citra berpengaruh terhadap hasil akurasi (Song et al., 2021). Selain itu, kandungan klorofil-a di perairan terbuka Tanjung Kelayang sangat dipengaruhi oleh musim, sehingga kandungan klorofil-a sangat dinamis dari waktu ke waktu (Bukhari et al., 2017).

Perairan Tanjung Kelayang secara umum memiliki kondisi yang mirip dengan lokasi penelitian yang dilakukan oleh Li et al., (2021), yaitu yang memiliki perairan dangkal yang cukup jernih dan keragaman habitat bentik seperti makro alga, terumbu karang, dan lamun. Kandungan klorofil-a di wilayah penelitian tidak hanya dipengaruhi oleh musim, tetapi juga faktor-faktor lainnya, seperti adanya pengaruh resuspensi sedimen akibat aktivitas gelombang intensif dalam waktu lama, sedimentasi, dan arus dimana dalam penelitian ini faktor-faktor tersebut diabaikan dengan pertimbangan lokasi penelitian tidak memiliki muara sungai besar yang menyumbangkan sedimentasi ke perairan Tanjung Kelayang. Hal ini sesuai dengan paper rujukan Li et al., (2021) yang memilih lokasi riset untuk *automated bathymetry mapping* di perairan pesisir kepulauan kecil dengan *run off* air tawar dari daratan yang minim / tidak ada muara sungai, seperti di Heron Island, Australia; West Coast of Hawai'i Island, Hawai'i; Saona Island, Dominican Republic; Punta Cana, Dominican Republic; St. Croix, U.S. Virgin Islands; The Grenadines. Karena fokus riset adalah pada implementasi algoritma untuk ekstraksi batimetri secara cepat pada perairan dangkal (0 – 15 m) dengan variasi zona geomorfologi dan tipe habitat bentik yang berbeda. Sehingga, anggapan bahwa nilai klorofil-a dapat merepresentasikan kondisi IOP dan AOP di perairan ini mungkin tidak selalu berlaku di berbagai kondisi kejernihan air wilayah perairan dangkal dengan tutupan dasar perairan yang beragam (Traganos et al., 2018). Selain itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk membuktikan bahwa pengaruh konsentrasi klorofil-a di perairan dangkal akan sangat berpengaruh terhadap akurasi SDB yang dihasilkan, mengingat waktu untuk memperoleh citra perekaman tunggal yang bersih dari gangguan atmosfer tidak selalu bertepatan dengan tinggi atau rendahnya kandungan klorofil-a di wilayah perairan yang ingin dipetakan.

Kedua, faktor yang menyebabkan akurasi model SDB pada penelitian ini cukup rendah adalah proses pembangunan citra komposit *clean coastal water*. Seperti telah diketahui, bahwa algoritma pra-pemrosesan untuk membangun komposit citra *clean-coastal-water* dari Li et al., (2021) memiliki batasan, yaitu algoritma tersebut hanya dapat diimplementasikan pada wilayah dengan tutupan awan yang tidak begitu rapat, perairan jernih dan tidak diimplementasikan pada area dengan muara sungai besar yang memiliki kekeruhan tinggi. Sehingga dengan menggunakan citra komposit *clean-coastal-water* diasumsikan efek TSS dalam ekstraksi nilai kedalaman perairan ditiadakan. Asumsi ini didasari pada rujukan lokasi riset Li et al (2021) yang memilih pada wilayah dengan minim tutupan awan, perairan jernih dengan habitat bentik (terumbu karang, lamun, pasir, dll). Pada lokasi penelitian, tutupan awan pada citra Sentinel-2 sepanjang tahun 2020 mencapai

lebih dari 60% (Simonetti et al., 2021). Kondisi tersebut menyebabkan proses komposit menghasilkan *pseudo-image* (citra semu), atau citra yang sudah terdegradasi kualitasnya (Traganos et al., 2018), sehingga dapat mempengaruhi akurasi model SDB (Hedley et al., 2018; Kerr & Purkis, 2018; Li et al., 2021).

Citra yang dihasilkan dari proses komposit *clean-coastal-water* tersusun dari berbagai nilai piksel dari tanggal perekaman yang berbeda dan fungsi agregasi yang digunakan (yaitu median), dimana setiap piksel bisa saja berasal dari musim tertentu di antara yang digunakan dalam koleksi citra, atau menjadi nilai median sepanjang bulan-bulan tersebut (Traganos et al., 2018). Kontaminasi ini dapat menimbulkan masalah, terutama di lokasi atau periode waktu perekaman dengan tutupan awan yang tinggi, perubahan tutupan dasar perairan berupa habitat bentik yang relatif cepat (yaitu lamun), resuspensi sedimen dasar laut akibat aktivitas gelombang intensif dalam waktu lama atau di lokasi dengan kandungan klorofil-a yang dinamis (Traganos et al., 2018). Sementara itu, hasil penelitian Li et al., (2021) menunjukkan bahwa hasil komposit citra selama 12 bulan tersebut dapat memberikan model batimetri dengan akurasi yang jauh lebih baik dibandingkan dengan hasil komposit dari rentang waktu perekaman citra yang lebih pendek. Namun demikian, pada penelitian ini, khususnya wilayah perairan dangkal Tanjung Kelayang model SDB yang memiliki akurasi cukup baik adalah yang diturunkan dari citra perekaman tunggal. Oleh karena itu, perlu dilihat bagaimana akurasi hasil model batimetri jika algoritma Li et al., (2021) diimplementasikan di wilayah perairan dangkal lainnya dan atau pada rentang waktu perekaman citra berbeda.

Ketiga, yaitu penggunaan data input dan metode yang berbeda dengan yang dilakukan Dewi et al., (2020) di lokasi penelitian yang sama. Model SDB yang dihasilkan oleh Dewi et al., (2020) diperoleh dari citra Sentinel-2 perekaman tunggal, data pengukuran kedalaman in situ (SBES) dan menggunakan metode *machine learning*. Akurasi model batimetri yang dihasilkan pun cukup memuaskan, dengan nilai RMSE 0,62 meter. Akan tetapi, untuk memperoleh model SDB yang cukup akurat tersebut dibutuhkan dataset pengukuran kedalaman in situ yang sangat banyak yang membutuhkan proses akuisisi data yang cukup memakan biaya dan waktu (Liu et al., 2021).

Secara visual, terdapat kemiripan pola distribusi kedalaman perairan hasil citra komposit 3 bulan (Gambar 10b), 6 bulan (Gambar 11a) dan 12 bulan (Gambar 12a) dengan batimetri hasil pemeruman (Gambar 13). Kemiripan pola distribusi kedalaman perairan tersebut terlihat pada rentang 0 – 5 m yang berada di sepanjang pesisir Tanjung Kelayang hingga Pulau Burung (barat) dan Pulau Kepayang (utara). Untuk itu, distribusi spasial residu model SDB dipetakan sebagai cara sederhana untuk memeriksa secara visual distribusi spasial dari performa model SDB (Traganos et al., 2018). Distribusi spasial residu dari model SDB dapat dilihat pada Gambar 15. Dari 4 (empat) model SDB yang diuji, yaitu model batimetri Q2 (April-Juni), S1 (Januari-Juni), 12m (Januari-Desember), dan perekaman tunggal, dapat dilihat distribusi spasial potensi kesalahan prediksi nilai kedalaman yang dihasilkan oleh model SDB memiliki nilai residu mulai dari 0 meter sampai dengan lebih dari 20 meter. Potensi kesalahan prediksi nilai kedalaman tersebut ditunjukkan oleh semakin besar nilai residu antara kedalaman model SDB dengan kedalaman hasil pengukuran in situ (SBES) di daerah penelitian. Dari 4 (empat) peta tersebut memperlihatkan bahwa

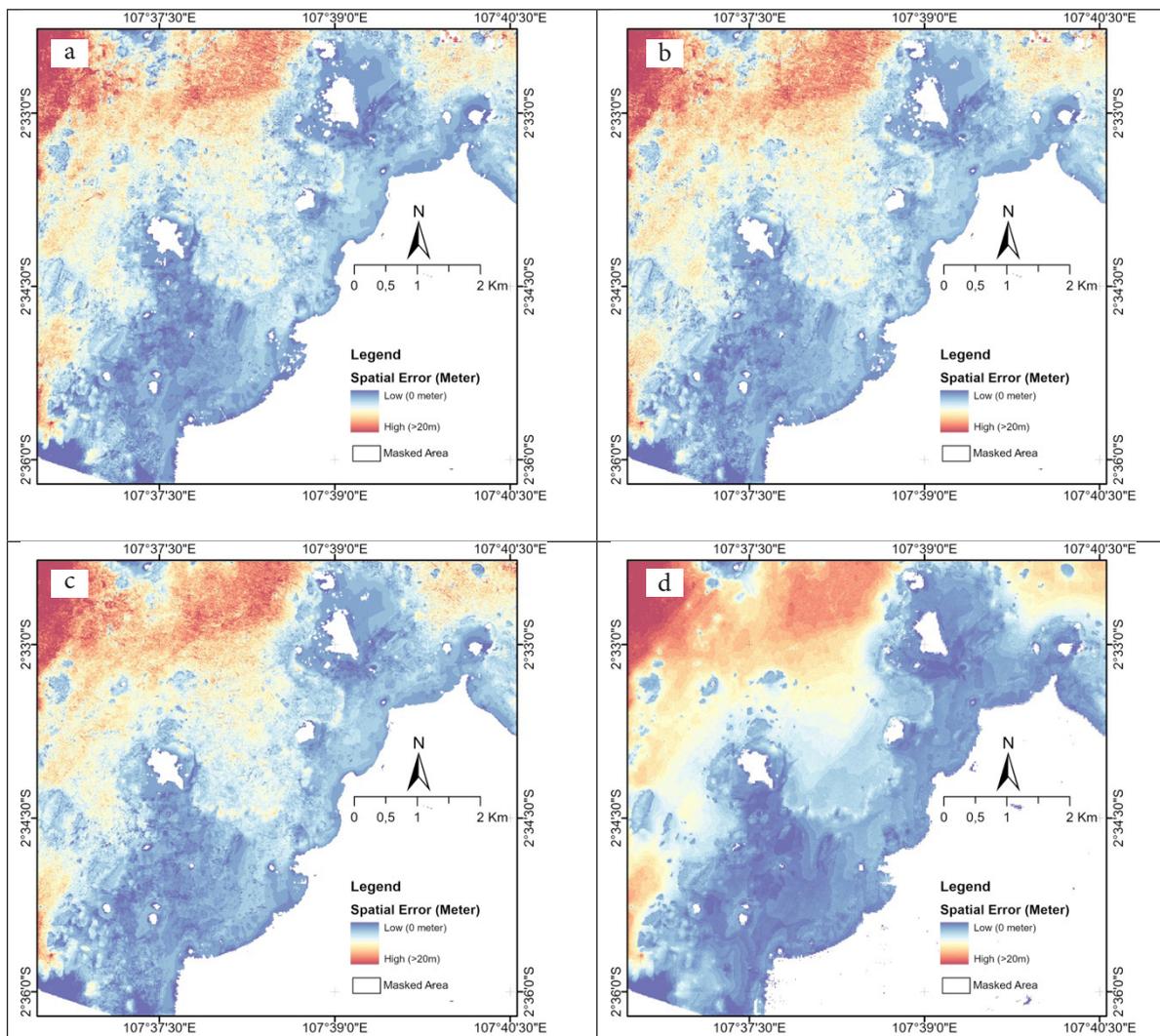
semakin dalam perairan maka semakin tinggi nilai *spatial error* yang dihasilkan. Artinya, semakin dalam perairan maka akurasi dari model SDB yang dihasilkan semakin rendah dan bias. Selain karena faktor sensor pengukuran yang dilakukan berbeda, yaitu data *in situ* dengan pemeruman (SBES) dan model SDB dengan data klorofil-a (*regional*), tingginya nilai *spatial-error* pada dasar laut yang lebih dalam dipengaruhi oleh faktor pelemahan sinyal dari *band* biru dan *band* hijau ketika menembus kolom air (Traganos *et al.*, 2018; Zoffoli *et al.*, 2014). Semakin dalam perairan maka sinyal pantulan dasar perairan yang ditangkap oleh sensor citra Sentinel-2 semakin kecil (Caballero & Stumpf, 2019). Hal tersebut menyebabkan nilai kedalaman optimum yang diperoleh dari model SDB pada penelitian ini hanya sampai kedalaman 5 meter dan kedalaman maksimum sampai dengan 10 meter saja.

Pola *spatial-error* model SDB ini juga memberikan informasi bahwa potensi kesalahan prediksi nilai kedalaman berasal dari data input yang digunakan, yaitu citra komposit *clean-coastal-water* dan nilai klorofil-a dari citra aqua MODIS. Pada Gambar 15d terlihat bahwa model SDB dari citra perekaman tunggal memiliki *spatial-error* yang lebih rendah dibandingkan model SDB yang dihasilkan dari citra komposit. Akan tetapi, hal yang menarik yang kami temukan adalah pada semua model SDB, kedalaman perairan antara 0 – 5 meter memiliki nilai residu yang rendah. Artinya, model

SDB yang dihasilkan untuk rentang kedalaman 0 - 5 meter di daerah penelitian mendekati kondisi rill dan berpotensi untuk dapat mengisi kekosongan data batimetri yang tidak dapat diukur dengan alat pemeruman yang menggunakan kapal besar karena sulit menjangkau perairan kurang dari 5 meter. Dengan demikian, pemetaan batimetri perairan dangkal dengan memanfaatkan citra Sentinel-2 dan data klorofil dari citra aqua MODIS cukup dapat diandalkan untuk pemetaan cepat batimetri di perairan dangkal dengan kedalamankurang dari 5 meter.

Pemetaan cepat batimetri di perairan dangkal

Metode pra-pemrosesan untuk membangun komposit "*clean coastal water*" dan metode *band-ratio* dengan menggunakan nilai klorofil-a sebagai tuning parameter dari Li *et al.*, (2021) dapat diandalkan untuk pemetaan cepat batimetri di perairan dangkal pada kedalaman kurang dari 5 meter. Hal ini sejalan dengan hasil review Ashphaq *et al.*, (2021) terhadap beberapa studi SDB yang menyimpulkan bahwa untuk rentang kedalaman hingga 5 m memiliki RMSE yang lebih rendah dan nilai R^2 yang cukup tinggi. Algoritma komposit "*clean coastal water*" yang diimplementasikan membantu penyediaan citra bebas gangguan atmosferik sebagai input data model SDB. Algoritma ini akan bermanfaat diaplikasikan



Gambar 15. Distribusi spasial dari residu model batimetri: (a) Q2 (April-Juni); (b) S1 (Januari-Juni); (c) 12m (Januari-Desember), dan (d) Perekaman Tunggal

di wilayah perairan Indonesia yang berada di kawasan ekuatorial, dimana kendala tutupan awan dan kilat matahari/*sunglint* di permukaan perairan menjadi isu utama bagi citra satelit. Namun demikian, hasil penelitian ini mengandung potensi terjadinya propagasi eror karena memprediksi nilai kedalaman menggunakan konsentrasi klorofil-a dari citra aqua-MODIS (resolusi 4 km), bukan dari hasil pengukuran langsung di lapangan.

Dalam melakukan pemetaan cepat (*rapid mapping*) untuk pemetaan batimetri, terdapat dua hal yang perlu digarisbawahi, yaitu ketiditalan informasi dan akurasi peta yang dihasilkan (Ajmar et al., 2015). Keakuratan pengambilan SDB berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman di atas 5 m dan setelah itu keandalan kedalaman yang diambil berada di luar tingkat kepercayaan untuk menjamin keselamatan navigasi pelaut (Ashphaq et al., 2021). Dalam Upaya meningkatkan akurasi pemetaan cepat batimetri, dibutuhkan tambahan metode dan tim peneliti yang berpengalaman untuk menghasilkan model SDB yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan (Vindrola-Padros & Johnson, 2020).

Penggunaan platform GEE sebagai system komputasi awan yang disertai dengan ketersediaan dataset citra Sentinel-2 turut mendukung proses pemetaan cepat SDB sehingga lebih hemat dari segi waktu dan biaya. Dengan demikian, proses pemetaan dapat mencakup wilayah yang luas dalam satu waktu. Hal tersebut akan berbeda jika dilakukan secara konvensional yang membutuhkan waktu lebih lama dalam menerapkan algoritma komposit "*clean coastal water*" untuk membuat model SDB.

Variasi kondisi wilayah penelitian turut menjadi pertimbangan dalam melakukan tune-up terhadap algoritma komposit *clean coastal water* juga model SDB dari Li et al., (2021). Kondisi ideal untuk mengaplikasikan metode ini secara optimal adalah pada perairan dangkal (0 – 15 m) dan jernih (Li et al., 2021). Faktor-faktor utama yang mengganggu dalam estimasi SDB diantaranya kekeruhan perairan serta variasi benthik dan klasifikasinya (Ashphaq et al., 2021). Sebagian besar studi SDB telah dilakukan perairan jernih dan transparan (Poliyapram et al., 2017; Poursanidis et al., 2019; Traganos et al., 2018), sebaliknya, daerah yang memiliki anak sungai dan saluran yang sarat dengan sedimen masih jauh dari cakupan studi SDB (Ashphaq et al., 2021). Untuk itu, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai pengembangan model SDB untuk pemetaan cepat batimetri perairan dangkal yang dapat mengakomodir berbagai karakteristik perairan di Indonesia.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa algoritma pra-pemrosesan untuk membangun citra komposit "*clean coastal water*" dan model SDB dari Li et al., (2021) dapat diandalkan sebagai alternatif metode untuk pemetaan cepat batimetri di perairan dangkal yang relative jernih dan TSS rendah. Beberapa kelebihan yang dijumpai diantaranya yaitu input data yang digunakan *free access*, platform GEE membuat waktu pengerjaan lebih cepat, bisa memetakan wilayah yang luas sekaligus, sangat terbuka untuk dilakukan tune-in terhadap algoritma yang digunakan. Hanya saja proses komposit "*clean coastal water*" dapat mempengaruhi nilai spektral citra, akurasi model SDB tergolong rendah jika dibandingkan dengan model SDB dengan metode lain, dan perlu adanya analisis untuk mengurangi bias dari parameter-parameter dinamis seperti kandungan klorofil-a. Selain itu,

diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai pengembangan model SDB baik dengan menggunakan data dari komposit citra maupun klorofil-a sebagai salah satu agen dalam menentukan redaman kolom air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Pusat Pemetaan Kelautan dan Lingkungan Pantai (PKLP) Badan Informasi Geospasial atas dukungan data SBES wilayah Tanjung Kelayang. Selanjutnya, terima kasih juga disampaikan kepada Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas beasiswa SAINTEK Tahun Anggaran 2021. Selain itu, ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dr.Sc. Sanjiwana Arjasakusuma, S.Si., M.GIS. dan Dr. Iswari Nur Hidayati, S.Si., M.Sc. sebagai Dosen pengampu Mata Kuliah Teknik Pemrosesan Geoinformasi Terpadu.

KONTRIBUSI PENULIS

Munawaroh mendisain metode penelitian, analisis data, interpretasi hasil dan membuat naskah publikasi; **Penulis Kedua** dan **Penulis Ketiga** review naskah publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajmar, A., Boccardo, P., Disabato, F., & Giulio Tonolo, F. (2015). Rapid Mapping: geomatics role and research opportunities. *Rendiconti Lincei*, 26, 63–73. <https://doi.org/10.1007/s12210-015-0410-9>
- Ashphaq, M., Srivastava, P. K., & Mitra, D. (2021). Review of near-shore satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 6(4), 340–359. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.02.006>
- Balsamo, G., Dutra, E., Stepanenko, V. M., Viterbo, P., Miranda, P. M. A., & Mironov, D. (2010). Deriving an effective lake depth from satellite lake surface temperature data: A feasibility study with MODIS data. *Boreal Environment Research*, 15(2), 178–190.
- Barale, V., Jaquet, J. M., & Ndiaye, M. (2008). Algal blooming patterns and anomalies in the Mediterranean Sea as derived from the SeaWiFS data set (1998-2003). *Remote Sensing of Environment*, 112(8), 3300–3313. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.014>
- Barnes, B. B., Hu, C., Schaeffer, B. A., Lee, Z., Palandro, D. A., & Lehrter, J. C. (2013). MODIS-derived spatiotemporal water clarity patterns in optically shallow Florida Keys waters: A new approach to remove bottom contamination. *Remote Sensing of Environment*, 134, 377–391. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.016>
- Bukhari, B., Adi, W., & Kurniawan, K. (2017). Pendugaan Daerah Penangkapan Ikan Tenggiri berdasarkan Distribusi Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a di Perairan Bangka. *JURNAL PERIKANAN TANGKAP (Juperta)*, 01(No. 3), 1–22.
- Caballero, I., & Stumpf, R. P. (2019). Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 226, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106277>
- Dewi, R. S., Lumban-Gaol, Y., Saffi, A. N., Rizaldi, A., Syetiawan, A., & Rahadiati, A. (2020). Assessing the effect of various training and testing set ratios to model the satellite derived bathymetry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 500(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/500/1/012032>
- Dong, Y., Liu, Y., Hu, C., & Xu, B. (2019). Coral reef geomorphology of the Spratly Islands: A simple method based on time-series of Landsat-8 multi-band inundation maps. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 157, 137–154. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.011>
- Eugenio, F., Marcello, J., & Martin, J. (2015). High-Resolution Maps of Bathymetry and Benthic Habitats in Shallow-Water

- Environments Using Multispectral Remote Sensing Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(7), 3539–3549. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2377300>
- Giardino, C., Bresciani, M., Cazzaniga, I., Schenk, K., Rieger, P., Braga, F., Matta, E., & Brando, V. E. (2014). Evaluation of multi-resolution satellite sensors for assessing water quality and bottom depth of Lake Garda. *Sensors (Switzerland)*, 14(12), 24116–24131. <https://doi.org/10.3390/s141224116>
- Hedley, J. D., Roelfsema, C., Brando, V., Giardino, C., Kutser, T., Phinn, S., Mumby, P. J., Barrilero, O., Laporte, J., & Koetz, B. (2018). Coral reef applications of Sentinel-2: Coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping with comparison to Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 216, 598–614. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.014>
- Hlaing, S., Harmel, T., Gilerson, A., Foster, R., Weidemann, A., Arnone, R., Wang, M., & Ahmed, S. (2013). Evaluation of the VIIRS ocean color monitoring performance in coastal regions. *Remote Sensing of Environment*, 139, 398–414. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.013>
- Hu, C., Lee, Z., & Franz, B. (2012). Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1). <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>
- Hussein, K. A., Al Abdouli, K., Ghebreyesus, D. T., Petchprayoon, P., Al Hosani, N., & Sharif, H. O. (2021). Spatiotemporal variability of chlorophyll-a and sea surface temperature, and their relationship with bathymetry over the coasts of uae. *Remote Sensing*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/rs13132447>
- Kanno, A., & Tanaka, Y. (2012). Modified lyzenga's method for estimating generalized coefficients of satellite-based predictor of shallow water depth. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4), 715–719. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2179517>
- Kerr, J. M., & Purkis, S. (2018). An algorithm for optically-deriving water depth from multispectral imagery in coral reef landscapes in the absence of ground-truth data. *Remote Sensing of Environment*, 210, 307–324. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.024>
- Kutser, T., Hedley, J., Giardino, C., Roelfsema, C., & Brando, V. E. (2020). Remote sensing of shallow waters – A 50 year retrospective and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111619. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111619>
- Kutser, T., Paavel, B., Kaljurand, K., Ligi, M., & Randla, M. (2019). Mapping Shallow Waters of the Baltic Sea with Sentinel-2 Imagery. 2018 IEEE/OES Baltic International Symposium, BALTIC 2018, September 2017, 1–6. <https://doi.org/10.1109/BALTIC.2018.8634850>
- Lee, Z. P., Darecki, M., Carder, K. L., Davis, C. O., Stramski, D., & Rhea, W. J. (2005). Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 110(2), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2004JC002573>
- Lee, Z., Weidemann, A., & Arnone, R. (2013). Combined effect of reduced band number and increased bandwidth on shallow water remote sensing: The case of world view 2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5), 2577–2586. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2218818>
- Li, J., Knapp, D. E., Lyons, M., Roelfsema, C., Phinn, S., Schill, S. R., & Asner, G. P. (2021). Automated Global Shallow Water Bathymetry Mapping Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(8), 1469. <https://doi.org/10.3390/rs13081469>
- Li, J., Knapp, D. E., Schill, S. R., Roelfsema, C., Phinn, S., Silman, M., Mascaro, J., & Asner, G. P. (2019). Adaptive bathymetry estimation for shallow coastal waters using Planet Dove satellites. *Remote Sensing of Environment*, 232(January), 111302. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111302>
- Liu, Y., Zhao, J., Deng, R., Liang, Y., Gao, Y., Chen, Q., Xiong, L., Liu, Y., Tang, Y., & Tang, D. (2021). A downscaled bathymetric mapping approach combining multitemporal Landsat-8 and high spatial resolution imagery: Demonstrations from clear to turbid waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.07.015>
- Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., & Tanis, F. J. (2006). Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2251–2259. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872909>
- Moerwanto, A. S., & Junoasmoro, T. (2017). Strategi pembangunan infrastruktur wisata terintegrasi. *Jurnal HPJI*, 3(2), 67–78.
- Morel, A., & Maritorena, S. (2001). Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C4), 7163–7180. <https://doi.org/10.1029/2000jc000319>
- O'reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., & Carder, K. L. (1998). *Ocean Color Chlorophyll Algorithms for SEAWIFS Ocean Color Chlorophyll Algorithms for SEAWIFS Scholar Commons Citation Scholar Commons Citation*. https://digitalcommons.usf.edu/msc_facpub/6
- Poliyapram, V., Raghavan, V., Metz, M., Delucchi, L., & Masumoto, S. (2017). Implementation of algorithm for satellite-derived bathymetry using open source GIS and evaluation for tsunami simulation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi6030089>
- Poursanidis, D., Traganos, D., Reinartz, P., & Chrysoulakis, N. (2019). On the use of Sentinel-2 for coastal habitat mapping and satellite-derived bathymetry estimation using downscaled coastal aerosol band. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.012>
- Purkis, S. J. (2018). Remote sensing tropical coral reefs: The view from above. *Annual Review of Marine Science*, 10(August 2017), 149–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063249>
- Purkis, S. J., & Pasterkamp, R. (2004). Integrating in situ reef-top reflectance spectra with Landsat TM imagery to aid shallow-tropical benthic habitat mapping. *Coral Reefs*, 23(1), 5–20. <https://doi.org/10.1007/s00338-003-0351-0>
- Simonetti, D., Pimple, U., Langner, A., & Marelli, A. (2021). Pan-tropical Sentinel-2 cloud-free annual composite datasets. *Data in Brief*, 39, 107488. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107488>
- Song, X., Gu, Y., Zhai, F., Li, P., Liu, P., Liu, Z., Wu, W., Chen, Y., Jiang, X., & He, J. (2021). Climatology and seasonal variability of satellite-derived chlorophyll a around the Shandong Peninsula. *Journal of Oceanology and Limnology*, 39(4), 1222–1244. <https://doi.org/10.1007/s00343-020-0249-5>
- Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48(1 II), 547–556. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- Traganos, D., Poursanidis, D., Aggarwal, B., Chrysoulakis, N., & Reinartz, P. (2018). Estimating satellite-derived bathymetry (SDB) with the Google Earth Engine and sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(6), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs10060859>
- Traganos, D., & Reinartz, P. (2018). Machine learning-based retrieval of benthic reflectance and Posidonia oceanica seagrass extent using a semi-analytical inversion of Sentinel-2 satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(24), 9428–9452. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1519289>
- Ulfa, K., Muchsin, F., Surya Chandra, D., Adi Pradono, K., Fibriawati, L., Indriani Oktavia, M., & Winda Veronica Damanik Pusat Teknologi dan Data Penginderaan Jauh, K. (2019). Analisa Pola Spektral Citra Sentinel-2 (Spectral Analysis of Sentinel-2 Images). *Nasional Jl. Lapan No*, 20(2), 38–43.
- Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2014). Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 145, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.009>

- Vindrola-Padros, C., & Johnson, G. A. (2020). Rapid Techniques in Qualitative Research: A Critical Review of the Literature. In *Qualitative Health Research* (Vol. 30, Issue 10, pp. 1596–1604). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/1049732320921835>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2006). On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1), 89–102. <https://doi.org/10.1080/13658810500286976>
- Zoffoli, M., Frouin, R., & Kampel, M. (2014). Water Column Correction for Coral Reef Studies by Remote Sensing. *Sensors*, 14(9), 16881–16931. <https://doi.org/10.3390/s140916881>