Estimasi Kedalaman Berbasis Transformasi Multiband Citra Sentinel-2 Menggunakan Metode *Satellite Derived Bathymetry* Di Waduk Sermo, Kulon Progo Daerah Istimewa Yogyakarta

Rezky Ramadhan[1,*], Dian Adhetya Arif[2], Dilla Angraina[3], Dedy Fitriawan[4]

[1] Departemen Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis, Fakultas Sekolah Vokasi, Universitas Negeri Padang, Jalan Prof. Dr. Hamka, Air Tawar Padang, Sumatera Barat, 25131, Indonesia

[*)] Email Korespondensi: ramadhanresky130@gmail.com

Sitasi:
Rezky Ramadhan, Dian Adhetya Arif, Dilla Angraina, Dedy Fitriawan (2026). *Estimasi kedalaman berbasis transformasi multiband citra sentinel-2 menggunakan metode satellite derived bathymetry di waduk sermo, Kulon Progo Daerah Istimewa Yogyakarta.* Jurnal Sains Geografi. Vol. 04, No. 02.

Sejarah Artikel:
Diterima: 05/10/2026
Revisi: 14/10/2026
Disetujui: 22/10/2026
Online: 01/11/2026
Publikasi: 01/11/2026

Abstract

Bathymetric mapping is essential for obtaining accurate information on water depth however, measurements using singlebeam echosounders (SBES) are relatively expensive and time consuming and have a limited detection range. Satellite derived bathymetry (SDB), which is based on multispectral imagery, offers a more efficient alternative for depth estimation. The objective of this study is to compare the results of multiband transformation using the blue, green and red bands, and to determine the optimal multiband transformation for depth estimation in the Sermo Reservoir through accuracy testing. This study employs a quantitative approach by applying the SDB method and the Stumpf algorithm using Sentinel-2 imagery and field data. Data processing included atmospheric correction, masking of non-water areas, image cropping, extraction of the blue (B2), green (B3) dan red (B4) and the application of multiband transformation, which were then calibrated against field depth data through regression analysis. The estimation results were evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE) and the coefficient of determination (R^2). The results of the study show that the transformation of the green band with the red band produced an RMSE of 7.040 m and R^2 of 0.4829 the blue band with green band produced an RMSE of 7.567 m and R^2 of 0.2427 while the blue band with the red band produced an RMSE of 7.899 m and R^2 of 0.0241. Based on the accuracy test results, the transformation of the green band with the red band had the lowest RMSE and the highest R^2 values, making it the most optimal transformation in this study.

Keywords: Satellite Derived Bathymetry, Sentinel-2, Stumpf Algoritma, Multiband Transformation, Depth Estimation.

Abstrak

Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Pemetaan batimetri penting untuk memperoleh informasi kedalaman perairan secara akurat, namun survei menggunakan Singlebeam Echosounder (SBES) membutuhkan biaya dan waktu relatif besar serta memiliki keterbatasan cakupan wilayah. Satellite Derived Bathymetry (SDB) berbasis citra multispectral menjadi alternatif untuk mengestimasi kedalaman secara lebih efisien. Penelitian ini bertujuan membandingkan hasil transformasi multiband menggunakan band blue, band green, band red dan menentukan transformasi multiband yang optimal untuk estimasi kedalaman di waduk sermo berdasarkan uji akurasi. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode SDB dan algoritma Stumpf menggunakan citra sentinel-2 dan data lapangan. Pengolahan data meliputi koreksi atmosferik, masking area non-perairan, pemotongan citra, ekstraksi band Blue (B2), Green (B3), dan Red (B4) dan penerapan transformasi multiband yang selanjutnya dihubungkan dengan data kedalaman lapangan melalui analisis regresi. Hasil estimasi di uji menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2). Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformasi band Green dengan band Red menghasilkan RMSE sebesar

7,040 m dan R^2 sebesar 0,4829, band Blue dengan band Green menghasilkan RMSE sebesar 7,567 m dan R^2 sebesar 0,2427, sedangkan band Blue dengan band Red menghasilkan RMSE sebesar 7,899 m dan R^2 sebesar 0,0241. Berdasarkan hasil uji akurasi, transformasi band Green dengan band Red memiliki nilai RMSE terendah dan R^2 tertinggi sehingga menjadi transformasi yang paling optimal dalam penelitian ini.

Kata Kunci: Satellite Derived Bathymetry, Sentinel-2, Algoritma Stumpf, Transformasi multiband, Estimasi kedalaman.

1. PENDAHULUAN

Pemetaan batimetri merupakan salah satu proses penting dalam memperoleh informasi kedalaman perairan secara akurat. Waduk sermo di Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, dipilih sebagai Lokasi penelitian karena memiliki karakteristik perairan daratan yang berbeda dari wilayah pesisir yang banyak digunakan dalam penelitian Satellite Derived Bathymetry (SDB). Waduk sermo merupakan satu-satunya waduk dan yang pertama kali dibangun di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), waduk sermo mempunyai luas sekitar 157 hektar dengan kapasitas genangan air sebanyak 25 juta m^3 (Triyatmo 1991). Karakteristik tersebut menjadikan waduk sermo sebagai objek yang relevan untuk menguji kemampuan citra sentinel-2 dalam mengestimasikan kedalaman perairan pada lingkungan waduk. Bahwasannya informasi yang berkaitan dengan batimetri pada waduk diperlukan untuk mendukung kondisi morfologi dasar perairan, perubahan kapasitas tampungan serta potensi sedimentasi di waduk sermo. Secara ideal, data kedalaman diperoleh melalui survei batimetri secara langsung dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi akustik. Teknologi akustik yang digunakan untuk mengetahui kedalaman perairan yaitu dengan menggunakan singlebeam echosounder dan multibeam echosounder (Laily 2024). Namun secara realita metode survei konvensional tersebut memerlukan biaya operasional yang besar, waktu pengumpulan data relatif lama dan memiliki keterbatasan cakupan wilayah, sehingga kurang efisien untuk pemetaan area perairan yang luas. Perkembangan teknologi penginderaan jauh pada saat ini telah berkembang dengan adanya *Satellite Derived Bathymetry* (SDB) adalah salah satu metode alternatif yang sedang dikembangkan untuk mendapatkan data batimetri dengan menggunakan sumber data yaitu satelit optis (Sentanu Aji, Abdi Sukmono 2021). Citra yang digunakan dalam penelitian ini yaitu citra satelit multispektral yang mana citra tersebut adalah Sentinel-2 yang memiliki resolusi spasial 10 meter untuk band biru, hijau, merah dan near-infrared (Miranda and Aryuni 2021). Meskipun demikian, akurasi estimasi kedalaman sangat dipengaruhi oleh Teknik pengolahan citra dan transformasi spektral yang digunakan, sehingga diperlukan transformasi multiband yang tepat untuk memperoleh hasil estimasi kedalaman yang lebih optimal.

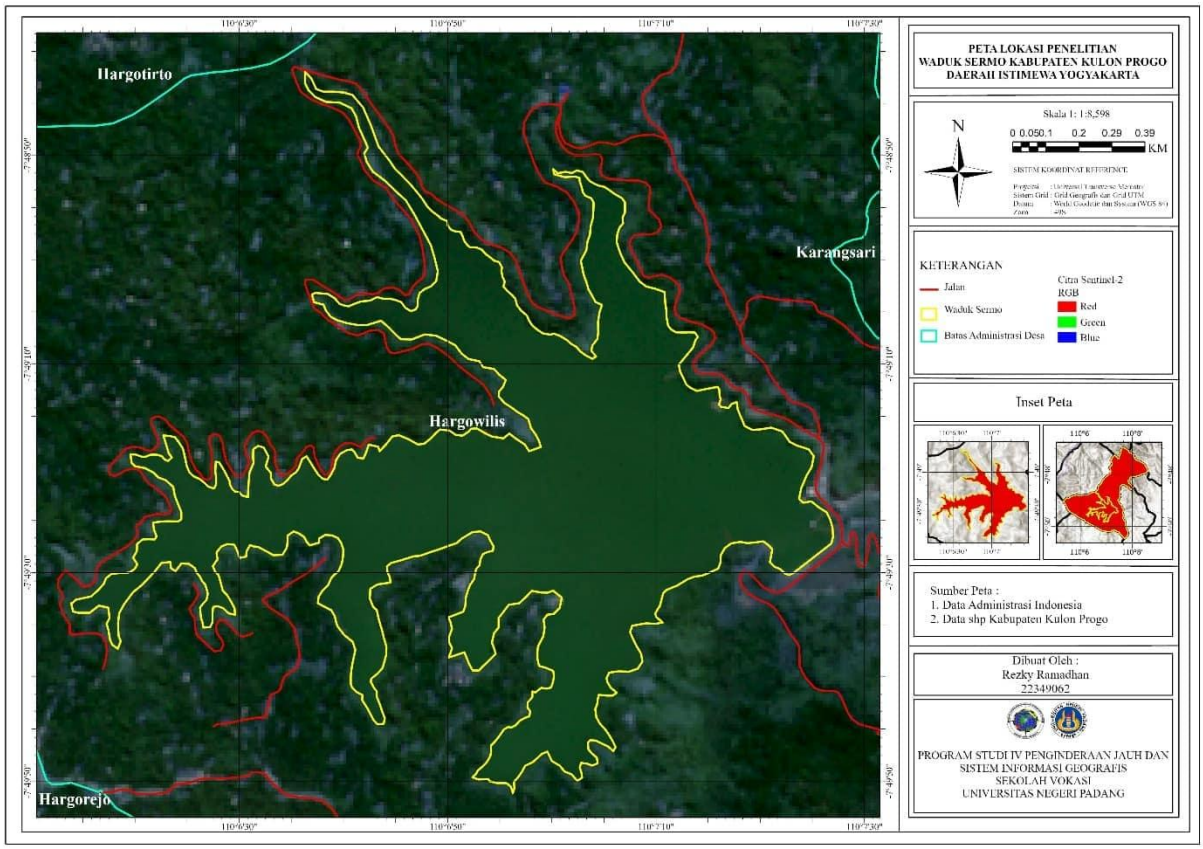
Penelitian sebelumnya telah memanfaatkan citra sentinel-2 dalam pemetaan batimetri menggunakan pendekatan *Satellite Derived Bathymetry.* Penelitian yang dilakukan oleh (Sentanu Aji, Abdi Sukmono 2021), penelitian ini membahas tentang efisiensi metode Satellite Derived Bathymetry menggunakan citra sentinel-2A yang mana survei dilakukan di pelabuhan Malahayati, Aceh. Membandingkan dua pendekatan yaitu algoritma Lyzenga dan algoritma Stumpf dengan itu hasil menunjukkan bahwa algoritma Lyzenga memakai tiga band spektral yaitu biru, hijau dan merah memiliki hasil lebih unggul dibandingkan algoritma Stumpf menggunakan dua band spektral yaitu biru dan hijau. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh, (Pujianiki et al. 2023), Pada penelitian ini membahas tentang pemanfaatan metode Satellite Derived Bathymetry (SDB) untuk mengestimasi kedalaman perairan dengan menggunakan citra sentinel-2 pada beberapa wilayah di Provinsi Bali. Algoritma yang dipakai dalam penelitian ini Lyzenga dan juga menggunakan pendekatan multilinear regression serta melakukan pengolahan rumus NDWI. Metode SDB dengan algoritma Lyzenga mampu mengestimasikan kedalaman perairan dengan Tingkat akurasi yang bervariasi pada enam

Lokasi penelitian. Perkembangan metode Satellite Derived Bathymetry (SDB) yang memanfaatkan citra sentinel-2 telah banyak digunakan sebagai alternatif pemetaan kedalaman perairan karena mampu mencakup wilayah yang luas dengan lebih efisien dibandingkan survei konvensional. Metode SDB pada pada lingkungan pesisir dan perairan dangkal, seperti wilayah di provinsi bali serta Kawasan pesisir lainnya. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kemampuan estimasi kedalaman di pengaruhi oleh pemilihan algoritma, kombinasi pita spektral dan karakteristik optik perairan. Perbedaan lingkungan perairan dapat berkaitan dengan Tingkat kejernihan air, konsentrasi bahan tersuspensi, keberadaan vegetasi perairan dan karakteristik material dasar perairan yang mempengaruhi respons spektral citra. Namun akurasi estimasi kedalaman masih dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kondisi optik perairan, kekeruhan air. Selain itu, penggunaan algoritma seperti Stumpf, maupun metode yang lain dapat menghasilkan tingat akurasi yang berbeda pada setiap wilayah penelitian. Oleh karena itu, diperlukannya investigasi lebih lanjut terkait bagaimana menentukan pendekatan transformasi multiband mana yang paling sesuai dalam meningkatkan ketelitian estimasi kedalaman perairan. Permasalahan yang muncul dari latar belakang tersebut yaitu bagaimana hasil estimasi kedalaman perairan waduk sermo menggunakan metode Satellite Derived Bathymetry menggunakan citra sentinel-2 berbasis transformasi multiband menggunakan band Blue (B2), Green (B3), Red (B4) dan Transformasi multiband manakah yang paling efektif untuk estimasi kedalaman perairan waduk sermo berdasarkan hasil uji akurasi. Penting penelitian tersebut mengenai estimasi kedalaman berbasis transformasi multiband citra sentinel-2 menggunakan metode Satellite Derived Bathymetry menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini juga diharapkan dapat mengkaji penerapan Teknik transformasi multiband dalam mengolah informasi spektral citra satelit untuk menghasilkan estimasi kedalaman perairan yang lebih efektif dan efisien. Penelitian ini membahas tentang komperatif kinerja tiga kombinasi rasio band sentinel-2, yaitu band biru dengan band hijau, band hijau dengan band merah serta band biru dengan band merah dalam mengestimasi kedalaman perairan waduk sermo menggunakan algoritma stumpf, dengan membandingkan hasil estimasi terhadap data kedalaman hasil survei dengan menggunakan singlebeam echosounder (SBES) melalui parameter uji akurasi root mean square error (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2). penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi kombinasi band dengan kinerja relatif terbaik, tetapi juga mengevaluasi keterbatasan model dalam merepresentasikan variasi kedalaman. Dengan itu, hasil penelitian ini diharapkan memberikan informasi empiris mengenai Tingkat kesalahan, kekuatan hubungan model dan kesesuaian penggunaan transformasi rasio band untuk estimasi kedalaman pada waduk sermo tersebut. Maksud dan tujuan dari penelitian ini membandingkan hasil estimasi kedalaman berbasis transformasi multiband menggunakan band Blue (B2), Green (B3), Red (B4) dan menentukan transformasi multiband yang paling efektif untuk estimasi kedalaman perairan di waduk sermo berdasarkan hasil uji akurasi.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan di waduk sermo yang mana waduk tersebut terletak di Desa Hargowilis, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Kabupaten ini berbatasan dengan Provinsi Jawa Tengah di Barat dan Utara, Samudra Hindia di sebelah Selatan. Kabupaten ini secara geografis terletak antara 7°38'42" - 7°59'3" Lintang Selatan dan 110°1'37" - 110°16'26" Bujur Timur. Kabupaten Kulon Progo dengan luas wilayah 58.627,54 hektar, yang meliputi 12 Kecamatan dan 88 desa. Waduk Sermo merupakan satu-satunya waduk yang ada di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan telah menjadi salah satu objek wisata di Desa Hargowilis, Kabupaten Kulon Progo. Secara geografis waduk sermo berada pada koordinat 7°49'27.67" Lintang Selatan dan 110°7'13.24" Bujur

Timur dengan volume tangkapan tidak terlalu luas hanya 25 juta m³ dengan luas daerah genangan 157 hektar (Bappeda Kabupaten Kulon Progo, 2010).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Pengumpulan Data, Tahap pelaksanaan pertama ini diawali dengan tahap persiapan yaitu pengumpulan data berupa citra sentinel-2 yang mencakup wilayah Waduk sermo di Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, Data batimetri hasil survey lapangan, data batas administrasi dalam format shapefile serta data koordinat hasil pengukuran GNSS. Citra sentinel-2 diperoleh dari website Copernicus dengan tanggal akusisi 26 Juni 2026, sedangkan data batimetri dari lapangan diperoleh melalui survei menggunakan singlebeam echosounder pada tanggal 3 sampai 4 Februari 2026. Selain pengumpulan data, pada tahap awal penelitian juga dilakukan tinjauan Pustaka mengenai metode Satellite Derived Bathymetry (SDB) dan transformasi, tahap pengolahan serta pemilihan variabel yang relevan untuk estimasi kedalaman perairan.

Table 1. Karakteristik pita spektral cahaya tampak pada citra sentinel-2

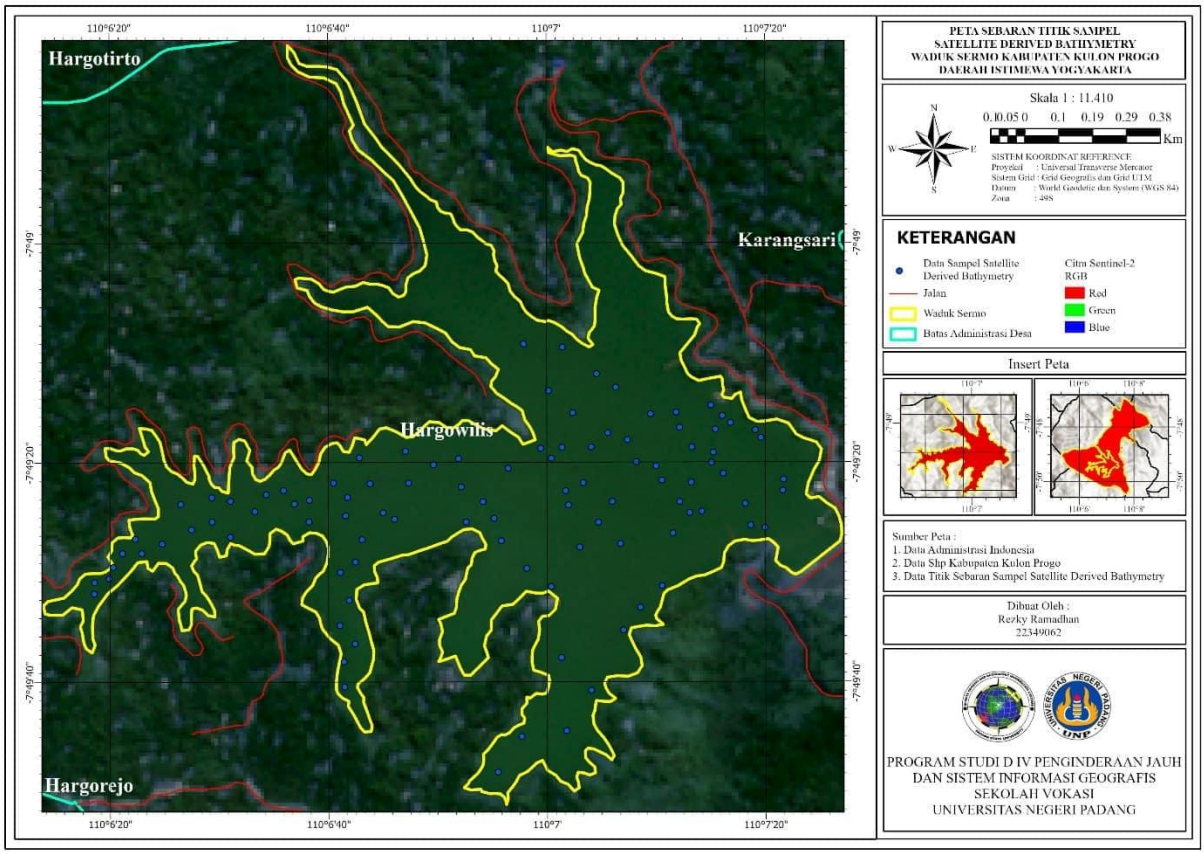
	Sentinel-2	
Pita	**Panjang Gelombang (nm)**	**Resolusi Spasial (m)**
Biru	398-594	10
Hijau	515-605	10
Merah	626-702	10
NIR	790-980	10

Sumber: Prasetya, Siregar and Agus, 2023

Pengolahan Data, Tahap pra-processing diawali dengan koreksi atmosferik citra sentinel-2 untuk memperoleh nilai reflektansi permukaan yang lebih representatif, kemudian dilakukan masking area non-perairan dan pemotongan citra sesuai batas wilayah kajian. Untuk

titik sampel SDB yang mana menggunakan 100 titik uji sampel di setiap satu pixel mewakili 1 titik sampel pada citra sentinel-2 tersebut. Data hasil survei lapangan dengan menggunakan singlebeam echosounder (SBES) digunakan sebagai data referensi untuk kalibrasi dan validasi model satellite derived bathymetry (SDB). Dari data survei yang berjumlah 7.757 akan dipilih 100 titik sampel yang mewakilkan pada setiap 1 pixel pada citra sentinel-2 cara pengambilan titik sampel tersebut dengan memilih data titik kedalaman dari survei SBES dan juga perlu mempertimbangkan sebaran secara spasial titik pengukuran, keterwakilan rentang kedalaman serta ketercakupan bagian utama dan percabangan waduk sermo, hal ini bertujuan agar sampel tidak hanya terkonsentrasi pada bagian tertentu, tetapi dapat merepresentasikan variasi kondisi perairan yang menjadi objek penelitian.

Sebanyak 100 titik sampel kemudian dibagi menjadi 70 titik untuk kalibrasi model dan 30 titik untuk validasi. Data titik kalibrasi digunakan untuk membangun persamaan regresi antara nilai transformasi rasio band dan kedalaman aktual, dan untuk data validasi digunakan untuk mengevaluasi kemampuan prediksi model terhadap data yang digunakan dalam proses kalibrasi. Pembagian data dilakukan dengan mempertimbangkan keterwakilan rentang kedalaman dan distribusi spasial sampel. Ketiga kombinasi rasio band, yaitu band biru dengan band hijau, band hijau dengan band merah serta band biru dengan band merah dievaluasi menggunakan titik kalibrasi dan validasi yang sama agar perbandingan kinerja model dapat di lakukan secara konsisten.



Gambar 2. Peta Sebaran Sampel

Selanjutnya dengan menggunakan tiga band yang memiliki sensitivitas terhadap kedalaman perairan dangkal, yaitu band biru (B2), hijau (B3) dan merah (B4). Ketiga band tersebut yang akan digunakan dalam metode Satellite Derived Bathymetry (SDB) dengan algoritma Stumpf melalui transformasi multiband band biru dengan band hijau, band hijau dengan band merah serta band biru dengan band merah.

$$Z = m_1 . \frac{In(R(\lambda_i))}{In(R(\lambda_j))} - m_0 \qquad (1)$$

Keterangan:
Z : Kedalaman perairan
m1, m0 : Koefisien regresi model untuk ekstrak nilai kedalaman
R(λi) : Nilai reflektan dari biru
R(λj) : Nilai reflektan dari hijau

Hasil transformasi kemudian dihubungkan dengan data kedalaman lapangan hasil survei Singlebeam Echosounder (SBES) sebagi data referensi. Data lapangan dalam format CSV dimasukkan ke ArcGIS, kemudian dilakukan clip dan extract value to point untuk memperoleh nilai rester pada setiap titik pengukuran. Pasangan data nilai kedalaman lapangan dan nilai raster hasil transformasi selanjutnya diekspor ke format dBase table dan diolah menggunakan Microsoft Excel untuk kalibrasi model, dari hasil raster yang diperoleh dari pengolahan algoritma Stumpf tersebut sebelum menjadi format dBase maka akan dibagi menjadi 70 untuk titik kalibrasi dan 30 untuk titik validasi. Dengan 70 titik kalibrasi tersebut akan dilakukannya proses kalibrasi regresi linear, yaitu untuk memperoleh hubungan matematis antara nilai citra sentinel-2 dan kedalaman aktual perairan. Dengan demikian untuk memperoleh kedalaman duga dari hasil regresi rasio nilai-nilai reflektansi pada masing-masing band yang digunakan serta menggunakan rumus persamaan regresi linear (Mahestro and Helmi 2022).

$$Y = \dot{a}X + b \qquad (2)$$

Keterangan:
Y : Kedalaman perairan
a : Slope (mewakili koefisien m1)
b : Intercept (mewakili koefisien m0)
X : Hasil rasio nilai reflektan pada band yang digunakan

Analisis Data, Tahap pengolahan dilakukan dengan proses ekstraksi nilai raster pada titik kedalaman lapangan. Data hasil extract value to points yang memuat pasangan antara nilai kedalaman lapangan hasil pengukuran echosounder dan nilai raster hasil transformasi algoritma Stumpf kemudian diekspor ke dalam bentuk table dBase dan selanjutnya diolah dengan Microsoft excel. Kemudian penyusunan data untuk validasi data batimetri yang telah diambil survei lapangan, serta dilakukannya analisis menggunakan pendekatan statistik, dengan regresi linear guna untuk memperoleh estimasi kedalaman yang sesuai dari tiga transformasi multiband tersebut. Selanjutnya dilakukannya uji akurasi yaitu data lapangan yang diambil menggunakan alat echosounder dan data citra sentinel-2 yang telah di proses dengan menggunakan metode Satellite Derived Bathymetry dan algoritma Stumpf tersebut. Dalam melakukan uji akurasi pada kedalaman SDB menggunakan RMSE dan R^2.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum(Z_i - Z_j)^2}}{n} \qquad (3)$$

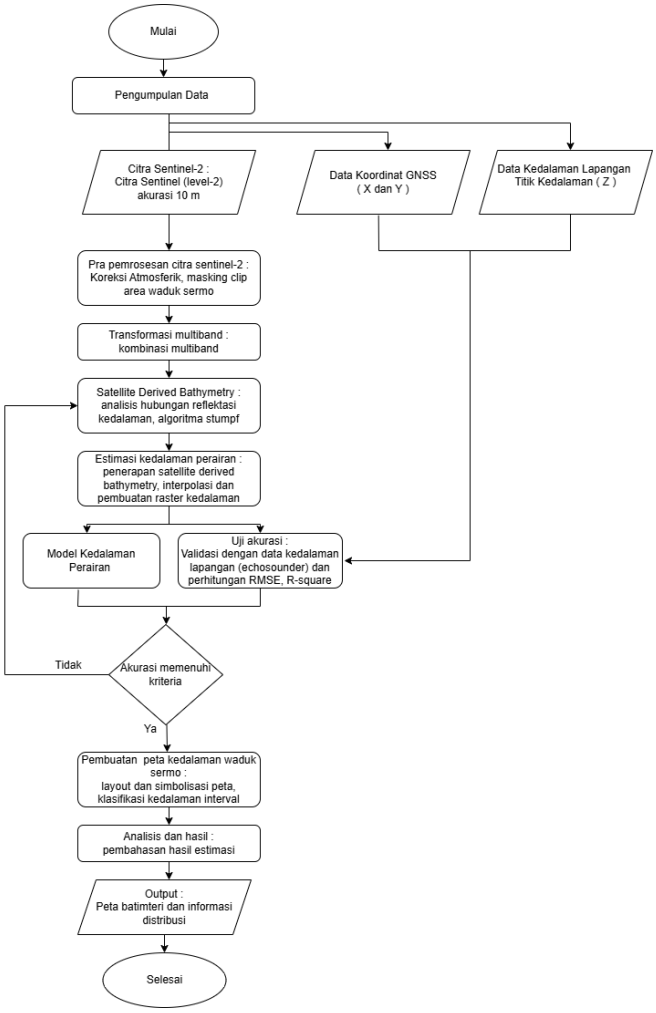
Keterangan:
Zi : Data hasil analisis citra satelit

Zj : Data hasil pengambilan di lapangan
N : Jumlah data

Semakin kecil nilai RMSE Error maka data yang didapatkan maka semakin bagus dan akurat. Uji analisis menggunakan RMSE error, RMSE error mencerminkan perbedaan antara nilai data lapangan dengan nilai hasil ekstraksi citra satelit (Halida Nuriya and Nugraha 2010). RMSE (*Root Mean Square Error*) digunakan untuk mengetahui seberapa besar rata-rata kesalahan prediksi yang dihasilkan model dibandingkan dengan jumlah data lapangan (Agustina & Gustian, 2025). Uji akurasi yang akan digunakan selanjutnya yaitu R^2 (*R-square*) digunakan untuk mengukur seberapa besar model dapat menjelaskan atau merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan (Sari, Arifin, and Darmanto 2025).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \widehat{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2} \quad (4)$$

Keterangan:
ȳ : Rata-rata dari nilai lapangan
Pembilang : Jumlah kuadrat dari error prediksi
Penyebut : Jumlah kuadrat dari deviasi nilai lapangan terhadap rata-rata

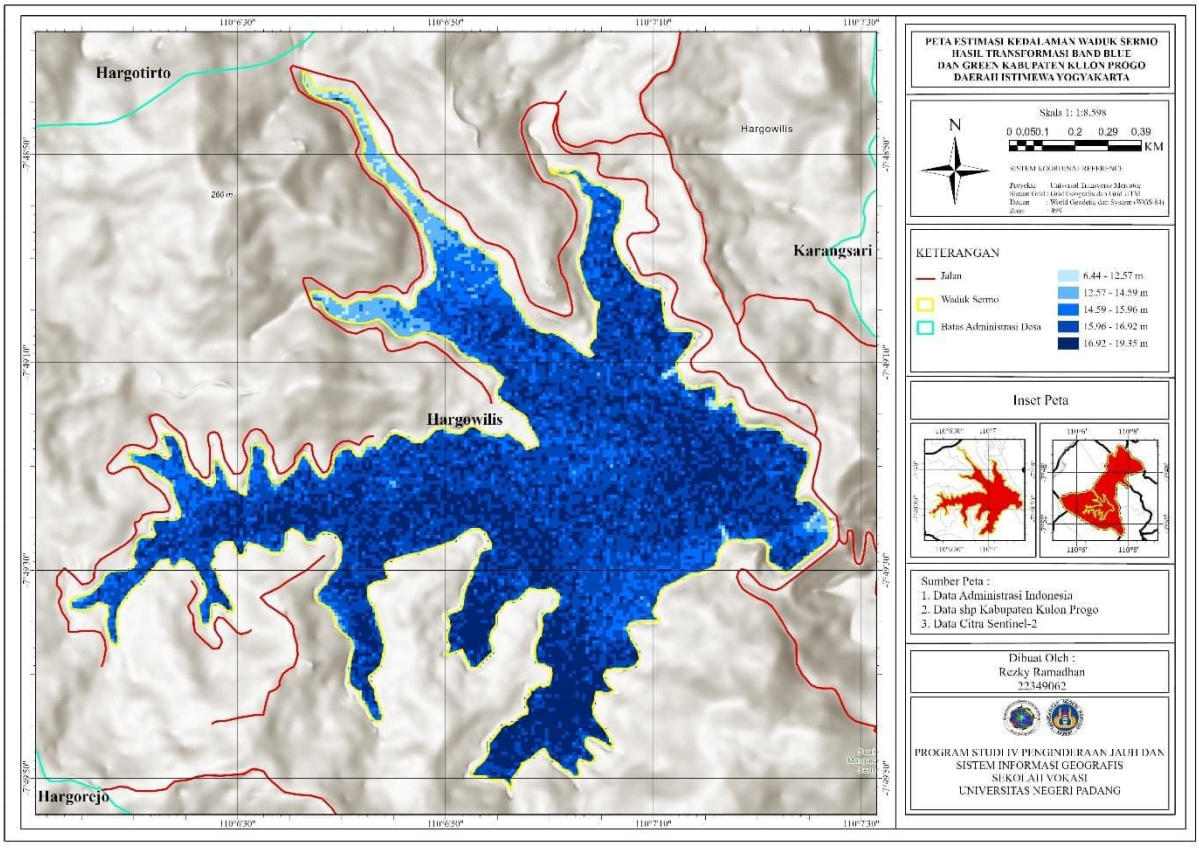


Gambar 3. Diagram Alir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. HASIL

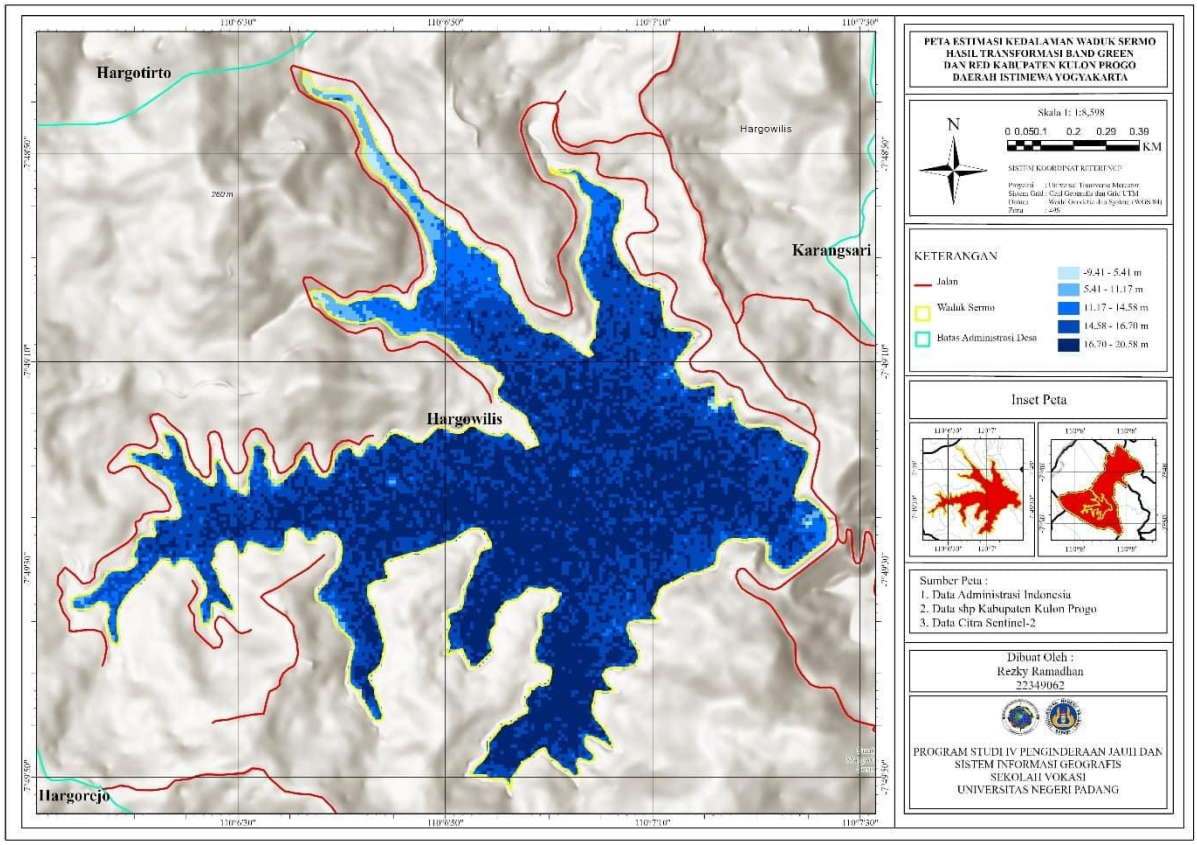
Hasil pemodelan kedalaman menggunakan data kedalaman aktual dan data citra sentinel-2, data citra sentinel-2 yang telah melalui proses koreksi atmosferik dan juga telah dilakukannya clipping terhadap daerah waduk sermo tersebut. Untuk hasil pemodelan kedalaman terbagi menjadi tiga transformasi multiband yaitu, transformasi band blue dengan band green, band green dengan band red serta band blue dengan band red.



Gambar 4. Peta Estimasi Kedalaman Transformasi Band Blue dan Band Green

Pada gambar diatas adalah peta hasil transformasi band blue dan band green ini adalah hasil yang telah di dapatkan dari persamaan regresi linear dengan hasil rumus algoritma stumpf yang sama dengan menggunakan band blue dan band green tersebut setelah semua proses dilakukan maka mendapatkan data raster kedalaman untuk estimasi kedalaman tersebut. Peta estimasi kedalaman merupakan hasil pengolahan citra sentinel-2 menggunakan metode satellite derived bathymetry dengan menggunakan pendekatan transformasi band blue (B2) dan green (B3). Hasil estimasi kedalaman divisualisasikan dalam lima kelas kedalaman, perbedaan kelas kedalaman ditampilkan menggunakan gradasi warna biru, warna biru muda menunjukkan perairan yang lebih dangkal sedangkan warna biru tua menunjukkan perairan yang lebih dalam. Berdasarkan peta, terlihat bahwa bagian Tengah waduk sermo didominasikan oleh warna biru tua yang menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki kedalaman terbesar dengan kisaran 16,92 sampai 19,35 meter. Sedangkan bagian tepi waduk sermo dan ujung-ujung waduk memperlihatkan warna biru muda hingga biru sedang yang mana kedalaman berkisaran antara 6,44 sampai 12,37 meter. Pola ini menunjukkan bahwa kedalaman perairan semakin berkurang menuju daratan waduk akibat bentuk morfologi dasar waduk yang semakin landai, selain itu daerah tersebut berpotensi mengalami pengendapan sedimen yang berasal dari aliran Sungai

maupun limpasan dari daerah tangkapan air, sehingga menyebabkan dasar perairan menjadi lebih dangkal dibandingkan bagian Tengah waduk. Secara spasial, distribusi kedalaman pada peta menunjukkan pola yang cukup konsisten, yaitu kedalaman meningkat dari tepian menuju bagian Tengah waduk. Pola tersebut sesuai dengan karakteristik umum waduk yang memiliki dasar berbentuk cekungan sehingga bagian Tengah menjadi Lokasi dengan kedalaman maksimal.

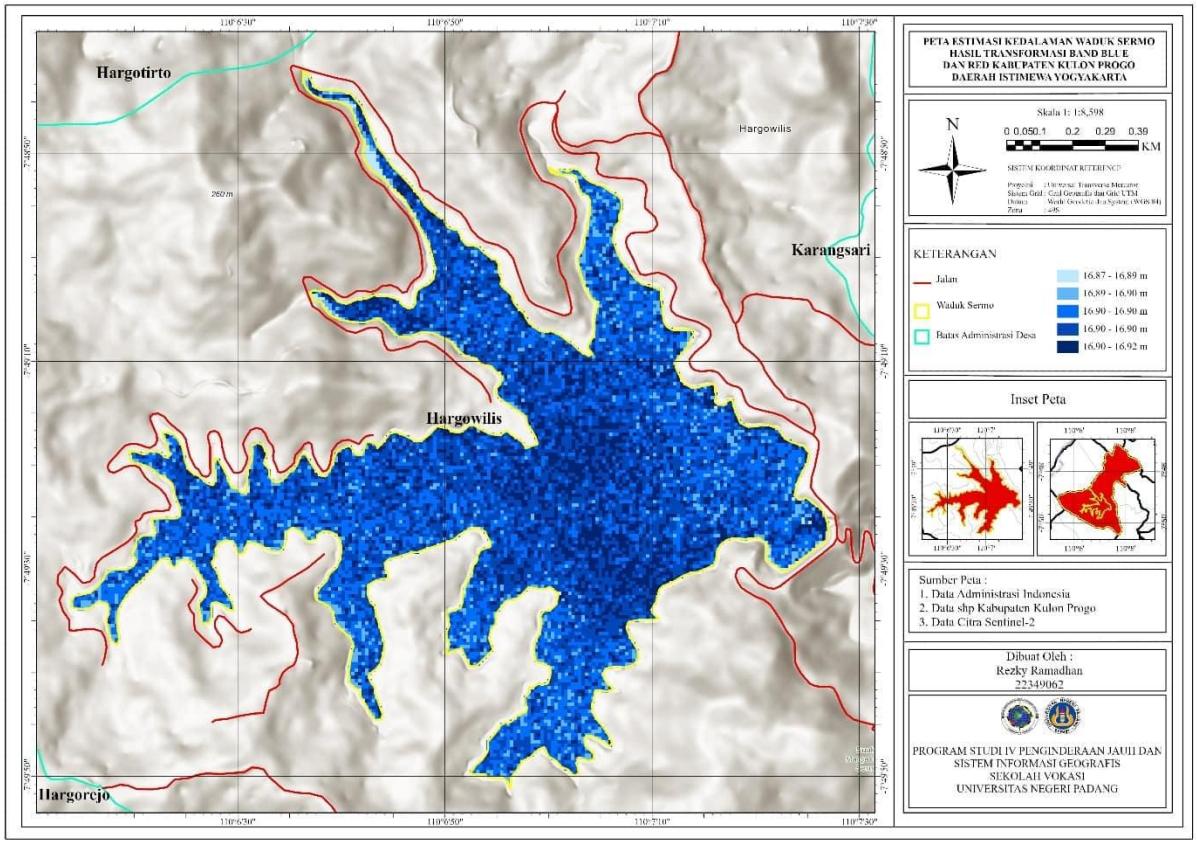


Gambar 5. Peta Estimasi Kedalaman Transformasi Band Green dan Band Red

Pada gambar yang tersedia diatas ini adalah peta hasil transformasi band green dan band red adalah hasil yang telah di dapatkan dari persamaan regresi linear dengan hasil rumus algoritma stumpf yang sama dengan menggunakan band green dan band red setelah proses mendapatkan data raster kedalaman untuk estimasi kedalaman. Hasil klasifikasi peta estimasi kedalaman dibagi menjadi lima kelas, secara spasial distribusi kedalaman hasil transformasi band green dan red menunjukkan adanya peningkatan kedalaman secara bertahap dari tepian menuju bagian Tengah waduk sermo. Pada peta terlihat warna biru tua mendominasi dibagian Tengah waduk sermo dan untuk bagian tepain waduk tampak berwarna biru muda yang mana daerah tersebut bagian dangkal dari waduk tersebut. Pada peta terdapat kedalaman yang sangat dalam pada kisaran 16,70 sampai 20,58 meter, kedalaman tersebut adalah kedalaman yang paling dalam dan memiliki warna biru tua yang pekat, yang mana pola-pola kedalaman yang ada pada peta ini yaitu untuk transformasi band green dan band red.

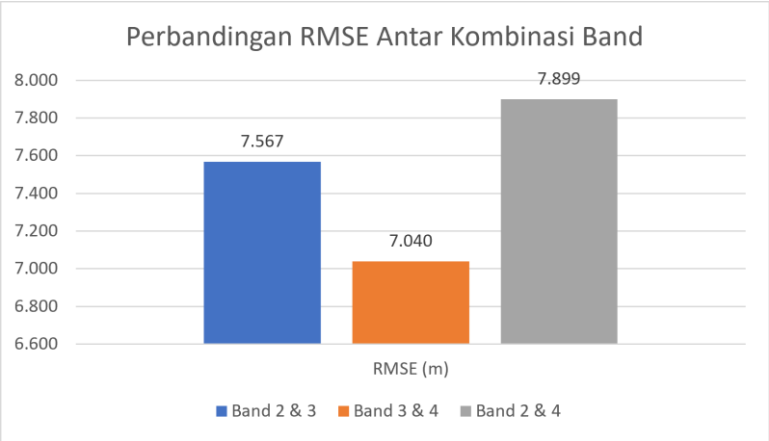
Peta ini merupakan hasil pengolahan citra sentinel-2 yang menggunakan transformasi band green dan band red sehingga distribusi kedalaman yang ditampilkan merupakan estimasi dan perlu dibandingkan dengan data kedalaman lapangan untuk mengetahui Tingkat ketelitian model. Dengan ini dapat digunakan untuk menggambarkan pola spasial estimasi kedalaman waduk sermo serta menjadi dasar dalam evaluasi akurasi transformasi band green dan band red. Rentang hasil kedalaman pada peta diatas ini menunjukkan minimum sebesar -9,41 m dan

maksimum sebesar 20,58 m, nilai negatif yang terlihat di dalam peta tersebut error negative hanya berarti model mengunderestimasi dibandingkan kedalaman terukur, wajar sebagai residual bukan tanda kedalaman model minus. Model stumpf dan regresi linear terhadap rasio band, bila rasio band suatu piksel di luar rentang yang di pakai untuk membangun koefisien m0 dan m1 (ekstrapolasi), piksel sangat terang (darat, sunglint) atau sangat gelap (bayangan, awan dan air sangat dalam) hasil regresi bisa jatuh di bawah nol.



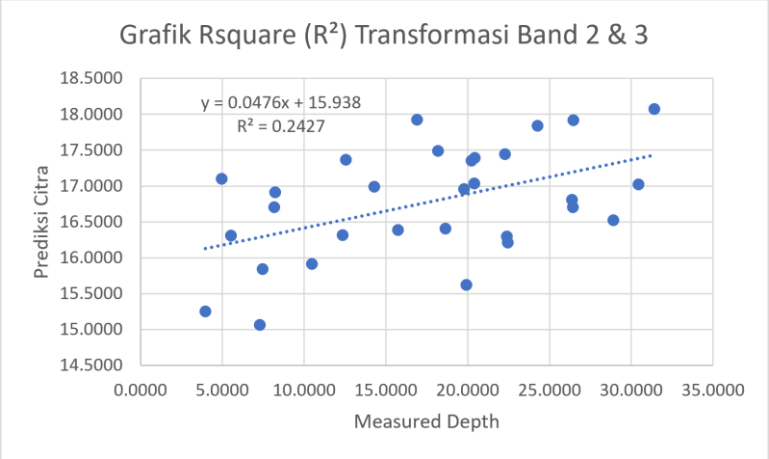
Gambar 6. Peta Estimasi Kedalaman Transformasi Band Blue dan Band Red

Pada gambar peta yang ada di atas ini yaitu peta hasil transformasi band blue dan band red adalah hasil yang telah di dapatkan dari persamaan regresi linear dengan hasil rumus algoritma stumpf. Berdasarkan hasil transformasi band blue dan band red setelah proses mendapatkan data raster kedalaman untuk estimasi kedalaman tersebut. Berbeda dengan hasil transformasi band blue green maupun band green dan red pada transformasi band blue dan red rentang kedalaman yang dihasilkan berada pada kisaran 16,87 sampai 16,92 meter, sehingga variasi kedalaman dangkal tidak terlihat jelas. Hal ini menunjukkan bahwa model transformasi band blue dan red tersebut cenderung menghasilkan estimasi kedalaman yang lebih homogen dengan rentang nilai yang relative sempit.



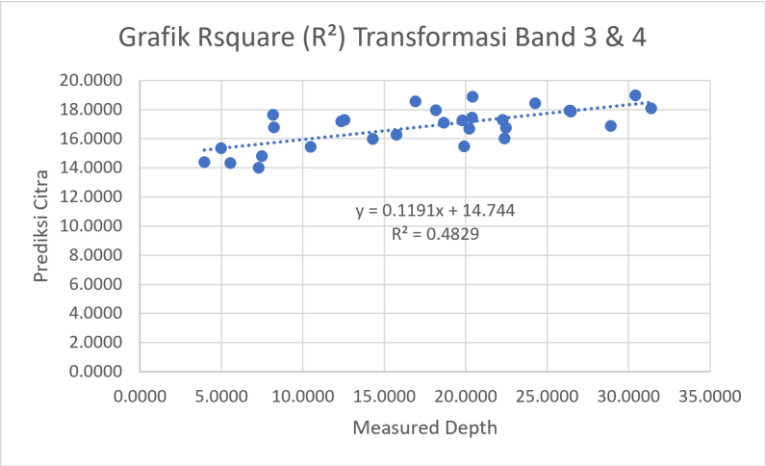
Gambar 7. Perbandingan RMSE Antar Kombinasi Band

Pada gambar diatas ini terdapat hasil uji akurasi RMSE, terlihat yang mana nilai RMSE berbeda pada setiap transformasi band sentinel-2 yang digunakan dalam estimasi kedalaman. Transformasi band blue dengan band green menghasilkan RMSE sebesar 7,567 meter, sedangkan transformasi band green dengan red menghasilkan RMSE sebesar 7,040 meter. Transformasi band blue dengan band red menghasilkan nilai RMSE paling tinggi yaitu, 7,899 meter. Nilai RMSE menunjukkan besarnya rata-rata kesalahan antara kedalaman hasil estimasi citra dengan kedalaman hasil pengukuran lapangan, sehingga semakin kecil nilai RMSE maka semakin kecil kesalahan estimasi dan semakin baik Tingkat akurasinya.



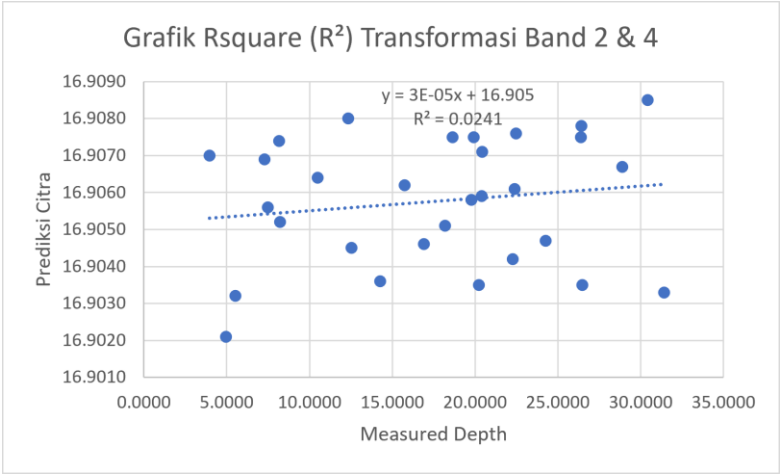
Gambar 8. Grafik Rsquare Band Blue dan Band Green

Grafik yang ada diatas ini adalah grafik scatter plot, hubungan antara measured depth atau kedalaman hasil pengukuran lapangan dengan satellite derived bathymetry (SDB) yang diproses menggunakan band blue dengan band green ditunjukkan oleh persamaan regresi y = 0.0476x + 15.938 dengan nilai Rsquare 0.2427. nilai koefisien determine (R^2) sebesar 0.2427 menunjukkan bahwa sekitar 24,27% variasi nilai kedalaman hasil estimasi SDB dapat dijelaskan oleh variasi kedalaman hasil pengukuran lapangan. Nilai (R^2) sebesar 0.2427 mengindikasikan bahwa hubungan linear antara kedalaman hasil pengukuran lapangan dan hasil estimasi SDB tergolong lemah.



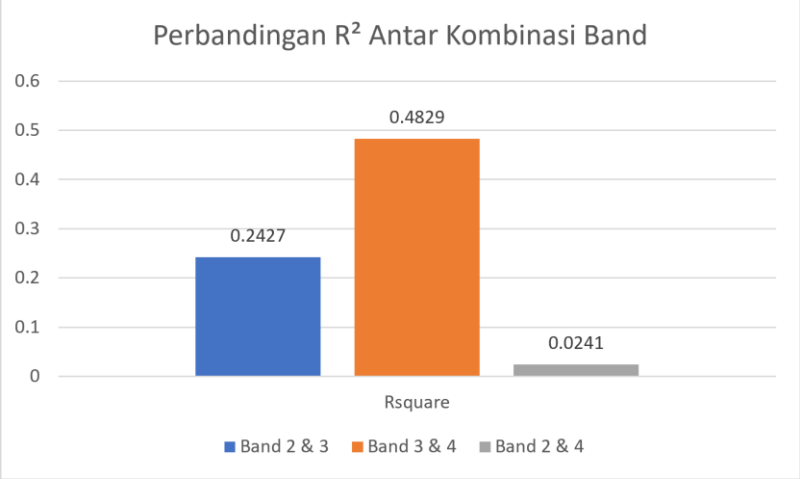
Gambar 9. Grafik Rsquare Band Green dan Band Red

Gambar grafik yang ada diatas ini adalah scatter plot yang mana hubungan antara measured depth dengan satellite derived bathymetry menggunakan band green dan band red dianalisis menggunakan regresi linear yang menghasilkan persamaan y = 0.1191x + 14.744 dengan nilai koefisien determine (R^2) sebesar 0.4829. nilai (R^2) = 04829 menunjukkan bahwa 48.29% variasi nilai kedalaman hasil estimasi SDB dapat dijelaskan oleh variasi kedalaman hasil pengukuran lapangan. Nilai R^2 sebesar 0.4829 menunjukkan bahwa hubungan linear antara data kedalaman lapangan dan hasil estimasi SDB berada pada kategori sedang. Hal ini terlihat dari pola penyebaran titik-titik data yang cenderung mengikuti arah garis regresi, meskipun masih terdapat beberapa titik yang menyebar cukup jauh dari garis tersebut.



Gambar 10. Grafik Rsquare Band Blue dan Band Red

Pada gambar diatas ini adalah scatter plot yang menggambarkan hubungan antara data aktual lapangan dengan data kedalaman yang dihasilkan dari pengolahan satellite derived bathymetry antara band blue dengan band red dianalisis menggunakan regresi linear yang menghasilkan persamaan y = 3E-05x + 16.905 dengan nilai koefisien determine (R^2) sebesar 0.0241. nilai R^2 menunjukkan bahwa hanya sekitar 2,4% variasi nilai kedalaman hasil estimasi SDB yang sangat lemah. Hal ini terlihat dari penyebutan titik-titik data yang tidak membentuk pola yang jelas dan tidak mengikuti garis regresi secara konsisten.



Gambar 11. Perbandingan Rsquare Antara Transformasi Band

Berdasarkan grafik yang ada pada gambar diatas adalah perbandingan nilai Rsquare antara transformasi band terlihat yaitu, bahwa nilai koefisien determine (R^2) berbeda pada setiap transformasi band yang digunakan untuk estimasi kedalaman. Transformasi band blue dan band green memperoleh nilai 0,2427 dan untuk transformasi band green dan band red memperoleh nilai yaitu 0,4829 sedangkan transformasi band blue dan band red hanya memperoleh nilai sebesar 0,0241.

Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa kombinasi band hijau dan merah manghasilkan kinerja relatif terbaik di antara ketiga transformasi yang di uji dengan RMSE sebesar 7,040 m dan R^2 sebesar 0,4829. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model memiliki kesalahan estimasi paling rendah dibandingkan dua kombinasi lainnya, meskipun besarnya kesalahan masih menunjukkan keterbatasan dalam menghasilkan estimasi kedalaman yang presisi. Nilai R^2 sebesar 0,4829 juga menunjukkan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan variasi kedalaman masih terbatas. Kombinasi band biru dengan band hijau menghasilkan RMSE sebesar 7,567 m dan R^2 sebesar 0,2427 sedangkan kombinasi band biru dengan band merah menghasilkan RMSE sebesar 7,899 m dan R^2 sebesar 0,0241. Rentang prediksi band biru dengan band merah yang sangat sempit, mengindikasikan bahwa model hampir tidak mampu membedakan variasi kedalaman secara spasial. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan kombinasi band mempengaruhi kemampuan model dalam merepresentasikan variasi kedalaman.

3.2. PEMBAHASAN

Hasil pemodelan kedalaman menggunakan tiga kombinasi transformasi multiband, yaitu band blue dan green, green dan red, blue dan red menunjukkan adanya perbedaan pola distribusi kedalaman pada waduk sermo. Transformasi band blue dan band green yang mana distribusi kedalaman secara spasial menunjukkan pola yang cukup jelas, daerah tepi waduk dan ujung percabangan cenderung lebih dangkal, sedangkan bagian Tengah waduk menunjukkan kedalaman yang relatif lebih besar. Pola serupa terlihat pada transformasi band green dan band red yang mana mampu memperlihatkan perbedaan antara zona dangkal dan zona yang lebih dalam secara bertahap dari tepian menuju bagian Tengah waduk, tetapi untuk band ini polanya lebih sesuai yang mana kedalmaan paling dalam berada pada Tengah waduk dari pada pola band blue dan band green yang mana polanya yang kedalaman paling dalam tersebar. Sementara itu untuk transformasi band blue dan band red menghasilkan distribusi kedalaman yang relatif homogen dengan rentang nilai yang sempit sehingga variasi kedalaman pada daerah dangkal kurang terlihat. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pemilihan

transformasi band berpengaruh terhadap kemampuan citra sentinel-2 dalam menggambarkan variasi kedalaman perairan waduk sermo.

Perbedaan kinerja tersebut menunjukkan bahwa respons spektral dari setiap transformasi band memberikan pengaruh terhadap hasil estimasi kedalaman. Band green masih memiliki kemempuan penetrasi Cahaya yang cukup baik ke dalam kolom air, sedangkan band red lebih cepat mengalami penyerapan oleh air. Saat ini sentinel-2 merupakan sallah satu satelit yang digunakan untuk menghasilkan citra satelit penutup lahan muka bumi (land cover). Sentinel-2 dilengkapi dengan instrument multispectral dan memiliki 13 pita yang diperoleh dari instrument MSI (multispectral Image), (Miranda and Aryuni 2021).

Perbedaan hasil ketiga transformasi semakin terlihat berdasarkan uji akurasi, transformasi band 2 dan band 3 menghasilkan RMSE sebesar 7,567 meter dan R^2 sebesar 0,2427, sedangkan transformasi band 3 dan band 4 menghasilkan RMSE sebesar 7,040 meter dan R^2 sebesar 0,4829. Sementara itu dengan band 2 dan band 4 menghasilkan RMSE sebesar 7,899 meter dan R^2 sebesar 0,0241. Berdasarkan nilai tersebut, transformasi band 3 dan band 4 menghasilkan kesalahan estimasi paling kecil sekaligus hubungan paling kuat dengan data kedalaman lapangan. RMSE digunakan untuk mengukur besarnya rata-rata kesalahan prediksi yang dihasilkan oleh model terhadap nilai aktual. Nilai RMSE tersebut diperoleh dari akar kuadrat rata-rata selisih kuadrat antara nilai prediksi dan nilai hasil observasi (Retnowati, Sari, and Naufal 2026).

Hasil dari transformasi ketiga band tersebut terlihat berdasarkan uji akurasi dengan menggunakan R^2 yang mana transformasi band 3 dan band 4 memiliki nilai sebesar 0,4829 menunjukkan bahwa sekitar 48,29% variasi kedalaman hasil estimasi yang dapat dijelaskan oleh variasi kedalaman lapangan. Sebaliknya transformasi band 2 dan band 4 memiliki RMSE paling tinggi dan R^2 paling rendah sehingga hubungan antara hasil estimasi dan kedalaman lapangan paling lemah. Dengan demikian berdasarkan dua akurasi yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu transformasi band 3 dan band 4 memberikan hasil estimasi yang paling sesuai terhadap data kedalaman lapangan di waduk sermo. R^2 digunakan untuk mengukur sejauh mana variasi kedalaman lapangan dapat dijelaskan oleh model estimasi kedalaman, semakin mendekati nilai 1 maka model dinilai semakin baik dalam menggambarkan estimasi kedalaman sebenarnya hasil lapangan tersebut (Sari, Arifin, and Darmanto 2025).

Berdasarkan hasil yang ditemukan oleh hakam uzakara dan musret demir, menyampaikan bahwa penelitiannya berkaitan dengan sentinel-2 dalam mengetahui informasi batimetri dengan biaya dan waktu yang lebih rendah dengan membandingkan metode konvensional dan lidar dengan menggunakan metode stumpf yang mana hasil tersebut uji akurasinya menunjukkan hasil Rsquare band blue dengan band green yaitu 0,6432 untuk band blue dan band red menghasilkan 0,7823 serta band green dan band red yaitu 0,8331, penelitian ini dilakukan pada wilayah pesisir Los Angeles (Uzakara and Demir 2021)

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Arip Rahman menjelaskan tentang estimasi kedalaman perairan dangkal menggunakan citra sentinel multispektral sentinel-2A menggunakan algoritma linear transformasi algoritma, ratio transformasi dan juga menggunakan Support Vector Machines (SVM) Lokasi penelitian terletak di pulau kemujan dengan membandingkan tiga algoritma tersebut digunakan dalam estimasi kedalaman perairan dangkal. Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut adalah model SVM memiliki nilai persentase kesalahan yang lebih kecil dibandingkan dengan kudua model lainnya, model SVM dapat memprediksi kedalaman lebih baik dibandingkan kedua model dengan nilai koefisien determinasi yang lebih tinggi dari kedua model tersebut. Hasilnya RMSE dan MAE model SVM memiliki nilai kesalahan yang lebih kecil dibandingkan dengan model lainnya yaitu < 1 meter yang mana menjadikan model SVM tersebut memiliki akurasi yang lebih baik (Rahman and , Vincentius P. Siregar 2020).

Penelitian Rizqi rizaldi Hidayat menjelaskan bagaimana hasil uji akurasi batimetri yang di peroleh dari citra di perairan dangkal menggunakan citra sentinel-2A dengan algoritma Lyzenga, Stumpf dan Modifed stumpf. Algoritma lyzenga hasil koefisien determinasi menghasilkan 0,94 dan RMSE 0,23, modifed stumpf koefisien determinasi 0,93 dan RMSE 0,24 dan juga stumpf hasil koefisien determinasi 0,88 dan RMSE 0,32 untuk penelitian terletak di Pantai utara jawa tepatnya di wilayah kaliwungu, kabupaten Kendal, jawa Tengah (Hidayat et al. 2025).

Penelitian yang dilakukan oleh Fathurrahman Apriliansyah, membandingkan kinerja beberapa metode dalam memtakan kedalaman batimetri menggunakan data SDB karena metode bathymetry konvensional memiliki keterbatasan di perairan dangkal, focus penelitian pada metode apa yang paling akurat untuk berbagai rentang kedalaman, metode manakah yang paling akurat. Random forest, Multiple linear regression dan Van Hengel dan Spitzer algoritma dengan uji akurasi menggunakan Random forest, multiple linear regression dan van hengel dan spitzer algoritma dengan uji akurasi menggunakan RMSE, MAE dan TVU untuk lokasi penelitian tersebut berada di perairan Pulau Bawean, Kabupaten Gresik, Jawa Timur untuk metode random forest mendapatkan nilai Rsquare 0,687 untuk kedalaman < 15 meter dengan metode MLR menghasilkan RMSE 12,325 meter dan MAE 12,244 meter. Kedalaman > 15 meter pada metode algoritma VHS menghasilkan RMSE 17,967 meterdan MAE 17,846 meter (Apriliansyah et al. 2026).

Penelitian yang dilakukan oleh Najhan Md Said, yaitu SDB batimetri menggunakan citra satelit multispektral dengan membandingkan akurasi metode stumpf dan lyzenga untuk uji akurasi dengan RMSE tetapi dengan peningkatan RMSE setelah LSE adjustment untuk meningkatkan hasil akurasi RMSE, hasilnya mendapatkan stumpf RMSE 1,624 meter dan lyzenga RMSE 1,915 meter dan setelah dilakukannya adopsi LSE adjustment adalah stumpf RMSE 1,432 meter dan lyzenga RMSE 1,728 meter, penelitian ini dilakukan di wilayah Tawau, Sabah, Malaysia daerah pendekatan Pelabuhan (Mahmud, Hasan, and Estate 2017).

Pada penelitian yang dilakukan oleh T. A. Gasica menjelaskan tentang estimasi kedalaman perairan dangkal menggunakan satellite derived bathymetry (SDB) berbasis kombinasi band citra sentinel-2 dengan uji akurasi menggunakan korelasi dan RMSE yang hasil tersebut adalah uji akurasi band 2 dan band 3 korelasi 0,64 dan RMSE 0,075 untuk band 1 dan band 3 korelasi 0,76 dan RMSE 0,026 (Gasica and Pratomo 2022).

Pada penelitian G. A. Narciso, tersebut mengintegrasikan stumpf ratio model (SRM) dengan random forest (RF) untuk estimasi kedalaman dari citra satelit sentinel-2 dengan menggunakan metode machine learning berbasis random forest dengan google earth (GEE) dan juga python libraries untuk uji akurasi menggunakan RMSE dan Rsquare dengan model RF menghasilkan RMSE 1,25 meter dan Rsquare 0,854 untuk model multivariate SRM dengan RMSE 2,196 meter dan Rsquare 0,554 dan untuk daerah kajian terletak di Bolinao, Pangasinan, Filipina (Narciso, Tamondong, and Blanco 2024).

Penelitian yang dilakukan di sektor timur Bay of Pozzuali, Italia menggunakan citra sentinel-2 dengan resolusi 10 meter band blue, green, red dan infrared metode yang digunakan dalam ini menerapkan tiga metode ekstraksi kedalaman dengan BRM, 3DPM dan PCAM. Hasil uji akurasi yang didapatkan yaitu BRM dengan RMSE 2,934 meter, 3DPM dengan RMSE 1,950 dan untuk PCAM hasil RMSE 2,603 meter (Figliomeni and Parente 2024).

Penelitian yang membahas tentang estimasi kedalaman menggunakan data satelit dengan membandingkan hasilnya terhadap data kedalaman hasil pengukuran lapangan, metode yang digunakan dalam penelitian adalah data kedalaman sebagai pembanding dan untuk uji akurasinya menggunakan RMSE yaitu hasilnya sensor worldview 2 RMSE 1,08 meter, untuk Lokasi penelitian ini dilakukan di Teluk Elonda, Timur laut Pulau Kreta, Yunani (Evagorou et al. 2022).

Penelitian dari Dongzhen Jia, yang menjelaskan tentang dua Lokasi penelitian di Langhua Reef dan Buck Island tujuan dilakukannya penelitian ini meningkatkan akurasi dan robustness SDB melalui pemrosesan optically deep water, khususnya dengan menerapkan sun glint correction / pantulan sinar matahari. Hasil uji akurasi menggunakan Rsquare, RMSE dan MAE dan untuk uji stabilitas pada penelitian Buck Island sebelum sun glint correction Rsqusre 0,88 – 0,90 RMSE 1,47 – 1,57 meter, MAE 1,13 – 1,24 meter dan koefisien garis regresi 0,83 – 0,90. Untuk Lokasi uji konsistensi temporal di area Langhua Reef tanpa menggunakan sun glint correction Rsquare 0,50 – 0,84 RMSE 1,75 – 2,78 meter dan MAE 1,41 – 469 meter. Dengan sun glint correction Rsquare naik 0,89, RMSE turun 1,50 meter dan MAE turun 1,15 meter (Dongzhen Jia, Yu Li, Xiufeng He, Zhixiang Yang, Yihao Wu 2023).

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Wildan Bobsaid, Lokasi penelitian ini di Pulau Poteran dan Pulau Giliyang yang mana di Kabupaten Sumenep, tentang pemetaan batimetri perairan dangkal dengan citra landsat 8 dan citra sentinel-2A dan menggunakan algoritma Van Hengel dan Spitzer. Hasil dari penelitian ini yaitu landsat 8 lebih baik dari pada sentinel-2A untuk estimasi kedalaman absolut. Rentang kedalaman hasil absolut landsat 8 yaitu 8,714 – 12,052 meter. Korelasi landsat 8 terhadap data kedalaman 0,102 dan korelasi sentinel-2A terhadap data kedalaman 0,08 (Jaelani 2017).

Penelitian yang dibahas oleh Triantafylli Maria Perivolioti, dampak vegetasi akustik terendam terhadap kualitas SDB dengan menggunakan metode stumpf, lyzenga, XGBoost dan Random Forest. Hasil dari uji akurasi tersebut hasil koefisien dari RMSE untuk stumpf dan lyzenga memiliki CV RMSE lebih rendah 0,082 dan 0,078 dibandingkan XGBoost dan random forest 0,102 dan 0,117 (Perivolioti et al. 2026).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil estimasi kedalaman menggunakan metode satellite derived bathymetry (SDB) dengan algoritma stumpf pada citra sentinel-2, penggunaan transformasi multiband antara band 2 dan band 3 (blue dan green), band 3 dan band 4 (green dan red), band 2 dan band 4 (blue dan red) menghasilkan pola distribusi kedalaman yang berbeda pada waduk sermo. Secara umum, perbedaan warna pada ketiga peta menunjukkan adanya variasi hasil estimasi kedalaman akibat penggunaan transformasi band yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformasi band 3 dan band 4 menghasilkan performa paling baik dibandingkan transformasi lainnya, dengan nilai RMSE sebesar 7,040 meter dan R^2 sebesar 0,4829. Nilai tersebut menunjukkan bahwa transformasi band 3 dan band 4 memiliki kesalahan estimasi paling rendah dan hubungan paling kuat dengan data kedalaman hasil pengukuran lapangan.

Transformasi band 2 dan band 3 menghasilkan nilai RMSE sebesar 7,567 meter dan R^2 sebesar 0,2427, sedangkan transformasi band 2 dan band 4 menghasilkan RMSE 7,899 meter dan R^2 0,0241. Dengan demikian, berdasarkan hasil uji akurasi transformasi band 3 dan band 4 atau band green dengan band red menjadi transformasi yang paling sesuai digunakan untuk estimasi kedalaman waduk sermo dalam penelitian ini, karena memiliki RMSE terendah dan R^2 tertinggi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT. TechnoGIS Indonesia yang telah memberikan kesempatan, dan bimbingannya dalam proses pengambilan data batimetri yang menjadi salah satu bagian penting dalam penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih atas perhatian, bantuan dan arahannya selama kegiatan berlangsung atas dampingan dari PT. TechnoGIS Indonesia sangat membantu penulis dalam memperoleh data yang diperlukan untuk pembuatan dan penyusunan tugas akhir ini. Semoga segala bantuan

dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dan dapat terus memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu serta kegiatan pemetaan batimetri di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Apriliansyah, Fathurrahman, Muhammad Ulin Nuha, Aulia Try Atmojo, and Kuncoro Teguh. 2026. "Comparative Accuracy of Satellite-Derived Bathymetry Using Random Forest , Multiple Linear Regression , and Van Hengel and Spitzer Algorithm." 10(1): 48–68. doi:10.70561/geocelebes.v10i1.43582.

Dongzhen Jia, Yu Li, Xiufeng He, Zhixiang Yang, Yihao Wu, Taixia Wu and Nan Xu. 2023. "Methods to Improve the Accuracy and Robustness of Satellite-Derived Bathymetry through Processing of Optically Deep Waters, DeepWaters."

Evagorou, Evagoras, Athanasios Argyriou, Nikos Papadopoulos, Christodoulos Mettas, George Alexandrakis, and Diofantos Hadjimitsis. 2022. "Evaluation of Satellite-Derived Bathymetry from High and Medium-Resolution Sensors Using Empirical Methods."

Figliomeni, F G, and C Parente. 2024. "Methods for Satellite Derived Bathymetry from Sentinel-2 Images : A Comparison." XLVIII(January): 11–12.

Gasica, T A, and D G Pratomo. 2022. "Shallow Waters Depth Estimation Using Empirical Satellite Derived Bathymetry And Sentinel-2 Data , Case Study : East Coastal Waters Of Java Island." XLIII(June): 6–11.

Halida Nuriya, Zainul Hidayah, and Wahyu Andy Nugraha. 2010. "Et Al ., 1961)." 3(1): 60–65.

Hidayat, Rizqi Rizaldi, Amron Amron, Iqbal Ali Husni, Isnaini Prihatiningsih, Hartoyo Hartoyo, Mukti Trenggono, and Muhammad Romdonul Hakim. 2025. "Geodesy And Cartography Accuracy Test Of Satellite Imagery-Derived Bathymetry In Shallow Waters Using Sentinel-2a Multispectral Imagery." 51.

Jaelani, Muhammad Wildan Bobsaid. Lalu Muhamad. 2017. "Studi Pemetaan Batimetri Perairan Dangkal Menggunakan Citra Satelit Landsat 8 Dan." 6(2): 564–69.

Laily, Hilda Hikmatul. 2024. "Analisis Tingkat Akurasi Data Batimetri Menggunakan Singlebeam Echosounder System (Sbes) Analysis Of Bathymetry Data Accuracy Using Singlebeam Echosounder System (SBES)." : 57–70.

Mahestro, Daniel Alfha, and Muhammad Helmi. 2022. "Analisis Perairan Dangkal Berdasarkan Pengolahan Digital Citra Satelit Sentinel-2B Di Perairan Pulau Karimunjawa , Jawa Tengah." 04(04): 1–10.

Mahmud, Mohd Razali, Rozaimi Che Hasan, and Estate. 2017. "Satellite-Derived Bathymetry : Accuracy Assessment On Depths." XLII(October): 159–64.

Miranda, Eka, and Mediana Aryuni. 2021. "Klasifikasi Tutupan Lahan Menggunakan Convolutional Neural Network Pada Citra Satelit Sentinel - 2." 10: 323–35.

Narciso, G A M, A M Tamondong, and A C Blanco. 2024. "Integration Of Stumpf ' S Ratio Model And Random Forest For Satellite-Derived Bathymetry Estimation." XLVIII(December 2023): 6–7.

Perivolioti, Triantafyllia-maria, Maria Tompoulidou, Viktoria Giourieva, Antonios Mouratidis, and Antonios Apostolakis. 2026. "The Impact of Submerged Aquatic Vegetation on Satellite-Derived Bathymetry in Shallow Waters : An Accuracy Assessment." 7254(May). doi:10.1080/22797254.2026.2667786.

Pujianiki, Ni Nyoman, Komang Gede, Putra Airlangga, I Gusti Bagus, and Sila Dharma. 2023. "Analisis Pemanfaatan Sentinel-2 Citra Untuk Batimetri Turunan Satelit Menggunakan Algoritma Lyzenga (Studi Kasus : Provinsi Bali)." 8(3): 413–21.

Rahman, Arip, and & James P. Panjaitan , Vincentius P. Siregar. 2020. "Jurnal Segara." 16(3):

151–62.

Retnowati, Sri, Amelia Permata Sari, and Naifi Naufal. 2026. "Model Regresi Untuk Prediksi Nilai Akhir Mahasiswa Pada Mata Kuliah Introduction to Computer and ICT." 2: 13–24.

Sari, Apriliana, Muhammad Arifin, and Eko Darmanto. 2025. "Prediksi Kebutuhan Stok Barang Menggunakan Algoritma Random Forest Untuk Meningkatkan Efisiensi Penjualan." 9(2): 339–51.

Sentanu Aji, Abdi Sukmono, Fauzi Janu Amarrohman. 2021. "Jurnal Geodesi Undip Januari 2021 Jurnal Geodesi Undip Januari 2021." : 68–77.

Triyatmo, Bambang. 1991. "Studi Kondisi Limnologis Waduk Sermo Pada Tahap Pra-Inundasi Study On Limnologic Conditions Of Sermo Reservoir Pre-Inundation Bambang Triyatmo*)." (2): 1–9.

Uzakara, Hakan, and Nusret Demir. 2021. "Turkish Journal of Remote Sensing Bathymetry Analysis with Use of Sentinel-2 Images." 3(1): 14–20. doi:10.51489/tuzal.863371.