



Pemetaan Laju Erosi Daerah Aliran Sungai Serayu Terhadap Pendangkalan Waduk Mrica Tahun 2018-2022 Berbasis Citra Satelit Sentinel-2

Mapping The Erosion Rate of The Serayu River Watershed on The Shallowing of Mrica Reservoir From 2018 To 2022 Based on Sentinel-2 Satellite Imagery

Matias Ronaldo Dimas Surya Laksana, Muhammad Rofid Azzuhdi, Firman Hadi, Shofiyatul Qoyimah

Departemen Teknik Geodesi Universitas Diponegoro, Indonesia

Penulis Korespondensi: Firman Hadi | **Email:** firmanhadi21@lecturer.undip.ac.id

Diterima (*Received*): 02/Apr/2024 | Direvisi (*Revised*): 02/Dec/2024 | Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 28/Dec/2024

ABSTRAK

Waduk Mrica merupakan infrastruktur vital yang berperan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), sumber irigasi, pengendali banjir di bagian hilir, dan perikanan. Kemampuan waduk untuk menjalankan fungsinya tergantung pada kapasitas penyimpanannya, yang dipengaruhi oleh tingkat sedimentasi akibat erosi pada Daerah Aliran Sungai (DAS). Untuk mengatasi masalah pendangkalan dan dampak erosi tanah, diperlukan pemahaman mendalam mengenai tingkat bahaya erosi dan nilai sedimentasi dalam periode waktu tertentu. Penelitian ini bertujuan memberikan gambaran menyeluruh mengenai laju erosi di DAS Serayu dan dampaknya terhadap pendangkalan Waduk Mrica dalam rentang waktu 2018-2022 dengan memanfaatkan citra satelit Sentinel-2. Penelitian meliputi prediksi laju erosi DAS Serayu menggunakan metode *Universal Soil Loss Equation*, kemudian dilakukan estimasi kedalaman Waduk Mrica dengan algoritma *Random Forest* yang dikalibrasi dengan data perekaman batimetri *in situ*. Hasil penelitian ini menunjukkan estimasi kedalaman menggunakan citra Sentinel-2 mampu memberikan informasi kedalaman 0-25 m di Waduk Mrica pada periode 2018-2022, dengan nilai R^2 pada rentang 0,83-0,92, MAE pada rentang 0,367-0,593, RMSE pada rentang 0,819-1,401 m. Hasil penelitian menunjukkan tren penurunan total volume Waduk Mrica dari tahun 2018 hingga 2022, menandakan berkurangnya kapasitas penyimpanan waduk. Terjadi variasi laju erosi, total erosi, dan *sediment yield* di DAS Serayu selama periode tersebut. Sub DAS Serayu Hulu secara konsisten menjadi kontributor terbesar terhadap total erosi dibanding Sub DAS lainnya. Terdapat hubungan antara sedimen hasil erosi DAS Serayu dan pendangkalan Waduk Mrica pada tahun 2019 dan 2020, tetapi pada tahun 2021 dan 2022 terjadi ketidaksesuaian di mana sedimen DAS meningkat sedangkan sedimen waduk menurun yang disebabkan adanya tindakan pengendalian sedimen waduk.

Kata Kunci: DAS, *Universal Soil Loss Equation*, *Satellite Derived Bathymetry*, *Universal Soil Loss Equation*, Waduk

ABSTRACT

Mrica reservoir serves as a vital infrastructure, functioning as a Hydropower Plant (PLTA), irrigation source, flood control downstream, and fishery. Its capacity relies on sedimentation levels due to erosion in the Watershed Area (DAS). Understanding erosion hazards and sedimentation values over time is crucial to address siltation issues and erosion impacts. This study aims to provide a comprehensive overview of erosion rates in the Serayu Watershed and their effects on Mrica reservoir's siltation from 2018 to 2022, utilizing Sentinel-2 satellite imagery. The research involves predicting the Serayu Watershed's erosion rates using the *Universal Soil Loss Equation* method, followed by estimating Mrica reservoir's depth with *Random Forest* algorithm calibrated with *in-situ* bathymetric recordings. Findings indicate that depth estimation using Sentinel-2 imagery provides depth information from 0 to 25 m in Mrica reservoir during 2018-2022, with R^2 values ranging from 0.83 to 0.92 and RMSE ranging from 0.819 to 1.401 m. The study reveals a decreasing trend in Mrica reservoir's total volume from 2018 to 2022, indicating reduced storage capacity. Variations in erosion rate, total erosion, and *sediment yield* occurred in the Serayu Watershed during this period. Sub Watershed Serayu Hulu consistently contributes the most to total erosion compared to other Sub Watershed. There is a correlation between sediment resulting from Serayu Watershed erosion and Mrica reservoir's siltation in 2019 and 2020, but mismatch occurred in 2021 and 2022 due to waduk sediment control measures.

Keywords: Watershed Area, *Universal Soil Loss Equation*, *Satellite Derived Bathymetry*, *Universal Soil Loss Equation*, Reservoir

1. Pendahuluan

Waduk merupakan infrastruktur vital yang berperan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), sumber irigasi, pengendali banjir di bagian hilir, dan perikanan sistem karamba. Kemampuan waduk untuk menjalankan fungsinya tergantung pada kapasitas penyimpanannya, yang dipengaruhi oleh tingkat sedimentasi. Sedimentasi pada waduk sangat bergantung pada *sediment yield*, yang merupakan debit sedimen melalui saluran keluar sungai per satuan luas daerah tangkapan per satuan waktu. Faktor utama yang memengaruhi *sediment yield* adalah erosi tanah di Daerah Aliran Sungai (DAS) (Dutta, 2016).

Salah satu waduk yang berfungsi sebagai PLTA adalah Waduk Panglima Besar Jenderal Sudirman atau lebih dikenal sebagai Waduk Mrica, yang terletak di Kecamatan Bawang, Kabupaten Banjarnegara, dengan kapasitas 180,93 MW. Sedimen utama di Waduk Mrica berasal dari DAS Serayu yang rentan terhadap erosi tanah karena topografi curam dan aktivitas agrikultur yang tinggi. DAS Serayu, sebagai wilayah dengan aliran sungai yang melintasi daerah berbatuan lepas dan mudah terkikis, menunjukkan tingkat kepekaan yang tinggi terhadap erosi tanah. Kondisi ini semakin diperparah oleh model penggunaan lahan yang dominan untuk pertanian, yang tidak mendukung upaya pencegahan erosi secara efektif. Tutupan lahan yang mayoritas digunakan untuk kegiatan pertanian dapat meningkatkan risiko erosi, mengingat aktivitas ini sering melibatkan penggunaan tanah yang intensif dan kurangnya praktik konservasi (Al-Fathin et al., 2019).

Erosi tanah di DAS Serayu memiliki dampak signifikan pada kondisi Waduk Mrica karena wilayah ini merupakan daerah tangkapan air (*catchment area*) bagi waduk. Berdasarkan laporan PT. Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan (UBP) Mrica pada tahun 2018, volume sedimen yang tertimbun di dalam waduk per Oktober 2018 mencapai 122,073 juta m³ atau 82,22% dari total volume waduk. Hal ini mengakibatkan pengurangan drastis daya tampung waduk. Untuk mengatasi masalah pendangkalan dan dampak erosi tanah, diperlukan pemahaman mendalam tentang tingkat bahaya erosi dan nilai sedimentasi dalam periode waktu tertentu.

Penggunaan citra satelit merupakan metode efektif untuk memetakan dan memantau perubahan laju erosi di DAS Serayu serta dampaknya terhadap pendangkalan Waduk Mrica. Konsep ini melibatkan prediksi laju erosi DAS Serayu menggunakan metode *Universal Soil Loss Equation*, diikuti perhitungan *Sediment Delivery Ratio*. Metode kedua menggunakan *Satellite Derived Bathymetry* untuk mengestimasi kedalaman Waduk Mrica dengan data citra Sentinel-2. Peningkatan sedimentasi waduk diamati melalui perhitungan selisih volume waduk dari perhitungan multitemporal kedalaman air waduk, dengan menguji keakuratan hasil estimasi tersebut menggunakan data *in situ* pemeruman tahunan waduk.

Penelitian ini bertujuan memberikan gambaran menyeluruh mengenai laju erosi di DAS Serayu dan dampaknya terhadap pendangkalan Waduk Mrica dalam rentang waktu 2018-2022. Pemetaan dan analisis laju erosi berbasis citra satelit diharapkan memberikan informasi akurat dan terperinci tentang tingkat bahaya erosi di daerah aliran sungai serta kondisi pendangkalan perairan waduk akibat sedimentasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan strategi konservasi tanah di DAS Serayu dan membantu pihak terkait dalam penanganan sedimentasi Waduk Mrica secara terpadu. Intensinya guna merumuskan kebijakan yang tepat untuk mengurangi laju erosi dan mengatasi masalah pendangkalan Waduk Mrica di masa mendatang.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

Lokasi penelitian terbagi menjadi dua bagian yaitu DAS Serayu untuk prediksi laju erosi menggunakan metode *Universal Soil Loss Equation* serta Waduk Mrica untuk estimasi kedalaman dan penghitungan volume sedimentasi menggunakan metode *Satellite Derived Bathymetry*. Data yang digunakan meliputi data jenis tanah dari BBWS Serayu Opak, data curah hujan tahun 2018-2022 dari *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), DEMNAS dari Badan Informasi Geospasial (BIG), citra satelit Sentinel-2 tahun 2018-2022 dari European Space Agency (ESA), dan data pengukuran kedalaman Waduk Mrica tahun 2018-2022 dari PT. Indonesia Power unit Mrica PGU. Data-data tersebut kemudian diolah menggunakan perangkat lunak teknologi geoinformasi meliputi Google Earth Engine untuk *preprocessing* dan pengolahan citra berbasis *cloud*, GUI SDB untuk pengolahan *Satellite Derived Bathymetry*, serta QGIS 3.28 untuk prediksi laju erosi dan analisis data spasial.

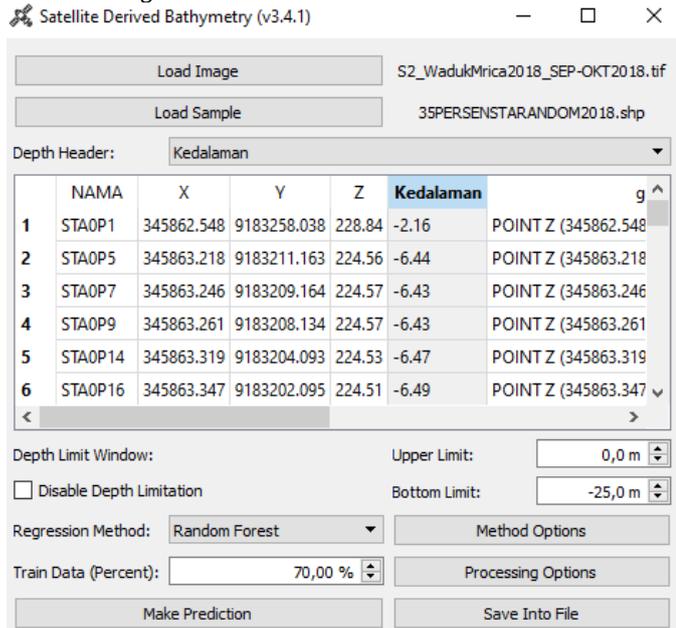
2.2. Pengolahan Kedalaman Waduk Mrica

2.2.1 Preprocessing Citra

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas pemetaan batimetri menggunakan citra satelit sensor optis. Faktor yang umumnya mempengaruhi kualitas pemetaan batimetri diantaranya tutupan awan, kilatan matahari, dan kekeruhan air. Untuk mengatasi hal ini, rentetan tahap *preprocessing* citra diterapkan di *platform* Google Earth Engine. Tahap pertama, citra Sentinel-2 *Multispectral Instrument* (MSI) Level-2A yang sudah tekoreksi secara radiometrik dan atmosferik menggunakan algoritma *Sen2Cor* dipanggil dari *library* Google Earth Engine. Selanjutnya dilakukan *cloud masking* pada citra menggunakan *quality assesment* (QA60) *bitmask* dan *band aerosol* untuk mengurangi tutupan awan. Tahap akhir *preprocessing* citra melibatkan koreksi *sun glint* untuk mengurangi efek kilatan matahari dengan membagi *band blue*, *green*, dan *red* dengan *band red edge*.

2.2.2 Estimasi Kedalaman Waduk

Estimasi kedalaman waduk dilakukan dengan algoritma *machine learning* menggunakan *platform* SDB GUI. Algoritma yang dipilih adalah *Random Forest Regression* (RFR). RFR dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya yang menunjukkan RFR memberikan akurasi dan presisi *Satellite-Derived Bathymetry* terbaik dibanding algoritma *machine learning* lainnya. RFR memberikan tingkat *robustness* yang baik terhadap air yang keruh (Merchant, 2023). Data *training* yang digunakan adalah data survei *in situ* pemeruman yang dilakukan oleh PT. Indonesia Power pada tahun 2018 hingga 2022. Data *training* dibagi menjadi dua bagian yakni 70% untuk *training* dan 30% untuk *testing*.



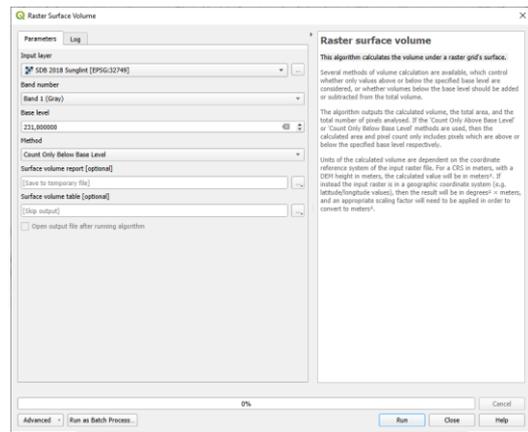
Gambar 1 Estimasi kedalaman waduk

2.2.3 Validasi Kedalaman Waduk

Hasil prediksi model dievaluasi menggunakan serangkaian statistik validasi umum, meliputi koefisien determinasi (R^2), *mean absolute error* (MAE), *mean squared error* (MSE), dan *root mean square error* (RMSE). Uji akurasi dilakukan dengan membandingkan nilai kedalaman set data *testing* dengan nilai kedalaman hasil estimasi. Alasan menggunakan set data *testing* dalam memvalidasi kedalaman yang diestimasi adalah untuk menciptakan data independen sebagai kontrol. Selain itu, dilakukan pengecekan profil melintang kedalaman dengan cara membandingkan profil kedalaman model estimasi dengan profil kedalaman *in-situ*.

2.2.4 Perhitungan Volume Waduk

Perhitungan volume waduk dilakukan dengan *surface volume* pada *software* QGIS. Algoritma *tools* ini menghitung volume di bawah permukaan grid raster. Ketinggian awal yang digunakan adalah 234,3 m. Hal ini mengacu pada standar ketinggian *maximum main spillway* pada Waduk Mrica berdasarkan data teknis dari PT. PLN Indonesia Power.



Gambar 2 Perhitungan volume waduk

2.3. Pengolahan Erosi DAS Serayu

2.3.1 Penentuan Faktor Erosivitas Hujan

Erosivitas hujan merupakan penggerak (*driving force*) yang mengakibatkan partikel tanah terkelupas dan berpindah ke daerah yang lebih rendah. Penelitian ini menggunakan data curah hujan bulanan tahun 2018-2022 dari *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS). Data curah hujan yang berbentuk *raster* diekstraksi ke dalam bentuk poin, di mana jumlah titik stasiun yang digunakan adalah 126 titik dengan interval 5,52 km. Metode penghitungan erosivitas hujan dilakukan menggunakan rumus Lenvain (1978).

$$Rm = 2,21 \times (Rain) m^{1,36} \quad (1)$$

Keterangan:

Rm : Erosivitas curah hujan bulanan

$(Rain)m$: Jumlah curah hujan bulanan (cm)

Selanjutnya data erosivitas hujan dilakukan interpolasi menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) di *software* QGIS.

2.3.2 Penilaian Faktor Erodibilitas Tanah

Faktor erodibilitas tanah mencerminkan sejauh mana partikel tanah menahan agar tidak terlepas dan diangkut oleh energi kinetik hujan dan limpasan (Alie, 2015). Dalam penelitian ini, data jenis tanah didapat dari BBWS Serayu-Opak sebagai badan pengelola wilayah DAS.

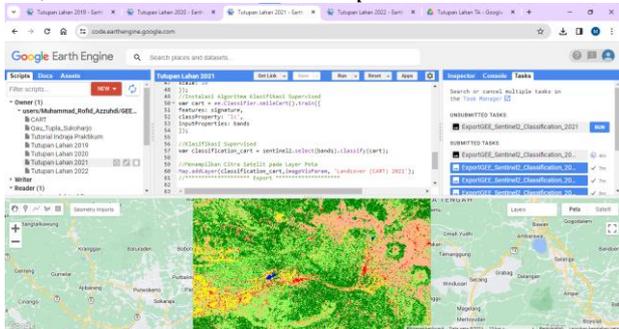
2.3.3 Penilaian Faktor Kemiringan Lereng

Faktor kemiringan lereng melibatkan penilaian terhadap intensitas erosi dengan mempertimbangkan kemiringan lahan dibandingkan dengan besar erosi yang diamati pada lahan uji (Aisy et al., 2019). Parameter kemiringan lereng didapatkan melalui pengolahan data DEMNAS yang memiliki resolusi spasial 8 m. Pengolahan kemiringan lereng dilakukan dengan menggunakan fitur *slope* yang terdapat pada *software* QGIS.

2.3.4 Penilaian Faktor Tutupan Lahan dan Konservasi

Faktor tutupan lahan dan konservasi didapatkan dengan cara melakukan klasifikasi pada citra Sentinel-2 dengan resolusi 10 m menggunakan metode *supervised classification* dengan algoritma *Classification and Regression Trees* (CART). Cara kerja algoritma CART

adalah memisahkan data melalui simpul-simpul hingga mencapai simpul akhir dengan membentuk hierarki pohon keputusan yang menggambarkan hasil pengelompokan (Farikhi & Widodo, 2023). Pengolahan dilakukan menggunakan Google Earth Engine meliputi beberapa tahapan yaitu *masking* citra Sentinel-2, *filtering* tanggal akuisisi dan *cloudy percentage*, pembuatan ROI *training sample* di setiap kelas klasifikasi, penerapan algoritma CART, dan terakhir melakukan *export* data hasil klasifikasi.



Gambar 3 Supervised classification CART

2.3.5 Uji Akurasi Klasifikasi Tutupan Lahan

Berdasarkan aturan Anderson nilai akurasi tutupan lahan minimal 85% sehingga hasil klasifikasi dapat diterima. Pengujian akurasi dilakukan dengan menggunakan *plugin* Acatama di *software* QGIS dengan membandingkan citra hasil klasifikasi terhadap citra yang memiliki resolusi spasial lebih tinggi. Dalam hal ini citra Sentinel-2 hasil klasifikasi yang memiliki resolusi spasial 10 m dibandingkan dengan citra PlanetScope yang memiliki resolusi spasial 3 m. Teknik *sampling* yang digunakan adalah *stratified random sampling*. Penentuan jumlah sampel menggunakan rumus Taro Yamane dan Slovin dalam (Febianto et al., 2022).

$$n = N / (N \times d^2 + 1) \quad (2)$$

Keterangan:

- n* : Jumlah sampel
- N* : Luas wilayah (km²)
- d* : Presisi yang diterapkan

2.3.6 Perhitungan Prediksi Laju Erosi

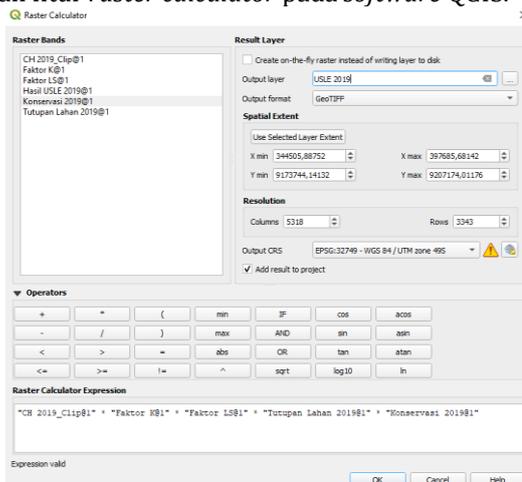
Diantara banyak metode untuk memprediksi besarnya erosi, metode *Universal Soil Loss Equation* yang dicetuskan oleh Wischmeir dan Smith (1978) menjadi metode yang umum digunakan untuk memperkirakan rata-rata erosi jangka panjang. USLE digunakan karena merupakan salah satu model erosi yang telah diterapkan secara luas pada skala yang berbeda. Model prediksi erosi USLE menggunakan persamaan empiris berikut:

$$E = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

Keterangan:

- E* : Banyaknya tanah tererosi (ton/ha /tahun)
- R* : Faktor erosivitas hujan
- K* : Faktor erodibilitas tanah
- LS* : Faktor kemiringan lereng
- C* : Faktor tutupan lahan
- P* : Faktor tindakan konservasi

Perhitungan laju erosi berbasis raster dengan resolusi 10x10 m dilakukan menggunakan metode *overlay* dengan bantuan fitur *raster calculator* pada *software* QGIS.



Gambar 4 Perhitungan prediksi laju erosi

2.3.7 Perhitungan Sediment Delivery Ratio

Kehilangan tanah secara keseluruhan seringkali lebih tinggi daripada jumlah yang terukur di daerah tangkapan karena pada umumnya tidak semua sedimen yang tererosi terbawa ke sungai atau terangkut ke tempat lain. Sebagian tanah akan menjadi sedimen yang kemudian diendapkan di suatu tempat di permukaan tanah. Perbandingan jumlah sedimen yang terangkut ke sungai terhadap jumlah erosi yang terjadi di daerah aliran sungai disebut *Sediment Delivery Ratio* (SDR) (Sabila et al., 2020). Renfro (1975) dalam (Sabila et al., 2020) merumuskan persamaan SDR sebagai berikut:

$$\log(SDR) = 2,94259 + 0,82362 \log(Rb / L) \quad (4)$$

Keterangan:

- SDR* : Sediment delivery ratio
- Rb* : Relief Basin (km)
- L* : Panjang Basin (km)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengolahan Kedalaman Waduk Mrica

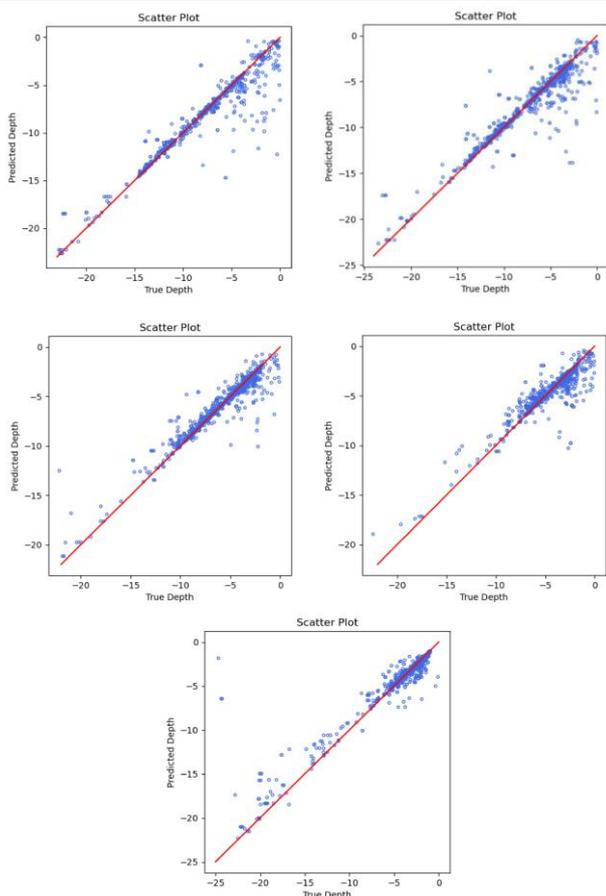
3.1.1 Asesmen Akurasi Estimasi Kedalaman Waduk Mrica

Dalam penelitian ini, untuk memprediksi kedalaman waduk, data sampel kedalaman yang digunakan berkisar antara 2000 hingga 4000 titik. Pembagian data dilakukan secara proporsional, di mana 70% dari data digunakan sebagai data pelatihan (*training data*) untuk melatih model *Random Forest Regression*. Sementara itu, 30% sisanya merupakan data uji (*testing data*) yang digunakan untuk menguji akurasi dari model kedalaman waduk. Penggunaan *dataset testing* yang terpisah bertujuan untuk menciptakan data independen sebagai variabel kontrol. Ini berarti bahwa model dievaluasi menggunakan data yang tidak pernah dilihat sebelumnya selama proses pelatihan, memastikan bahwa model tidak hanya menghafal data pelatihan tetapi juga dapat melakukan prediksi secara umum. Informasi asesmen akurasi SDB meliputi jumlah

titik training, jumlah titik testing, *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan koefisien keputusan (R^2) seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Akurasi Model Estimasi Kedalaman

Tahun	Data In-Situ		RMSE (m)	MAE	R ²
	Training	Testing			
2018	1954	838	1,401	0,593	0,90
2019	2506	1074	1,303	0,592	0,89
2020	3362	1442	0,819	0,367	0,92
2021	2431	1042	0,967	0,490	0,83
2022	2569	1102	1,393	0,437	0,87



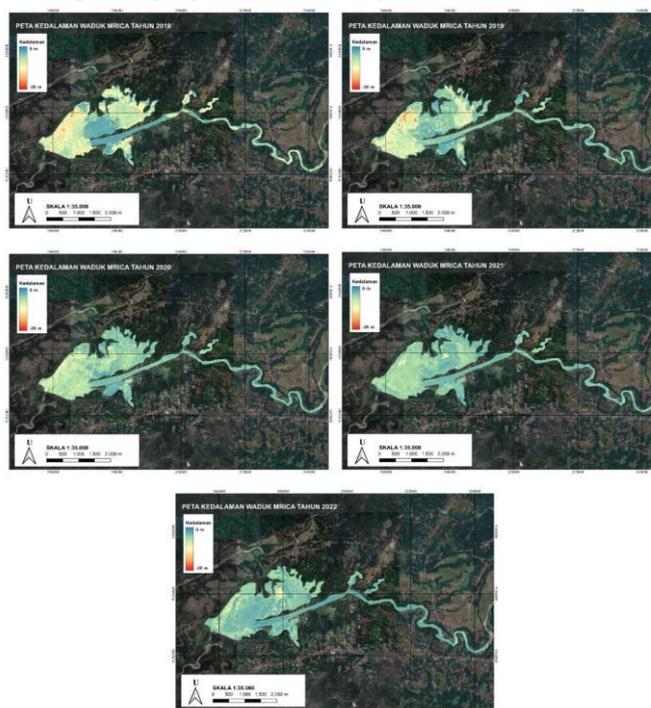
Gambar 5 Scatter plot estimasi kedalaman Waduk Mrica tahun 2018 (atas kanan), 2019 (atas kiri), 2020 (tengah kanan), 2021 (tengah kiri), 2022 (bawah)

Pada *scatter plot* di atas, terlihat bahwa hubungan antara estimasi kedalaman dan *dataset testing* menunjukkan variasi yang cukup signifikan, terutama ketika kedalaman meningkat. Idealnya, nilai prediksi akan sama dengan nilai sebenarnya, namun dalam praktiknya, hal ini sangat sulit dicapai. Rentang kedalaman 0-5 m menunjukkan akurasi yang lebih baik, sedangkan semakin dalam kedalaman, akurasi prediksi cenderung menurun. Hal ini dapat dijelaskan oleh sejumlah faktor yang mempengaruhinya. Pertama, dengan meningkatnya kedalaman, lebih banyak energi cahaya diserap dan dihamburkan dalam kolom air, menyebabkan berkurangnya reflektansi cahaya yang direkam oleh sensor satelit. Selain itu, adanya partikel sedimen dalam

air dapat mengurangi penetrasi cahaya biru dan hijau, meningkatkan reflektansi untuk gelombang cahaya yang lebih panjang, dan secara signifikan mempengaruhi keakuratan hasil pemodelan (Merchant, 2023).

3.1.2 Model Estimasi Kedalaman Waduk Mrica

Pemodelan kedalaman absolut dilakukan dengan menggunakan kombinasi saluran biru, hijau, merah, dan inframerah dekat. Pada citra Sentinel-2, saluran biru, hijau, merah, dan inframerah dekat terdapat pada saluran B2, B3, B4, dan B8. Citra *band stacking* Sentinel-2 dilatih menggunakan algoritma *Random Forest* dengan jumlah pohon keputusan sebanyak 300. Algoritma *Random Forest* dipilih berdasarkan rekomendasi penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa algoritma ini memberikan hasil yang paling akurat dan konsisten. Selain itu, algoritma *Random Forest* juga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap *noise* dibandingkan dengan algoritma *machine learning* lainnya (Merchant, 2023).



Gambar 6 Peta kedalaman Waduk Mrica tahun 2018 (atas kanan), 2019 (atas kiri), 2020 (tengah kanan), 2021 (tengah kiri), 2022 (bawah)

3.1.3 Perbandingan Profil Elevasi In-Situ Waduk Mrica

Perbandingan profil elevasi in-situ dengan elevasi prediksi dilakukan untuk mengevaluasi kinerja model hasil estimasi terhadap data lapangan. Proses ini dilakukan pada area yang sama setiap tahunnya. Idealnya, elevasi prediksi akan menunjukkan pola yang serupa dengan elevasi *in-situ*. Namun, untuk mencapai kesesuaian tersebut sangat sulit karena hasil model prediksi dipengaruhi oleh berbagai faktor yang memengaruhi nilai reflektansi citra. Variasi kesalahan estimasi kedalaman *Satellite Derived Bathymetry* pada setiap tahunnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Variasi kesalahan estimasi kedalaman

Kedalaman	Rata-rata Error (m)				
	2018	2019	2020	2021	2022
0-5 m	1,681	0,842	0,737	0,542	0,434
5-10 m	0,589	0,861	0,740	0,893	1,188
10-15 m	1,319	1,913	3,331	4,379	4,760
>15 m	5,862	3,739	6,650	11,806	9,489
Error Tahunan	1,334	1,192	0,981	0,795	0,963

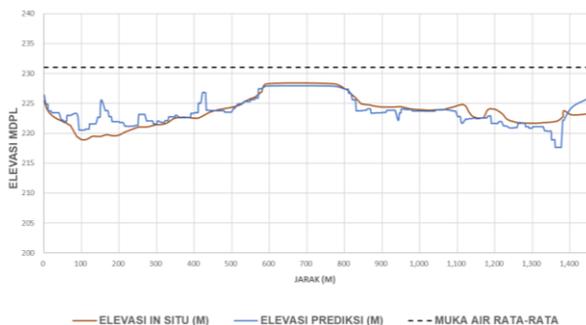
Kedalaman estimasi dibagi menjadi empat interval. Tingkat kesalahan tiap kelas pada tiap tahunnya bervariasi. Secara umum, estimasi kedalaman menunjukkan tingkat kesalahan minimal pada interval 0-10 m, namun meningkat secara signifikan pada kedalaman di atas 10 m. Total kesalahan estimasi kedalaman Waduk Mrica dengan menggunakan metode *Satellite Derived Bathymetry* selama periode 2018 hingga 2022 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Total kesalahan estimasi kedalaman

Kedalaman	Jumlah Titik	Rata-rata Error (m)
0-5 m	11.151	0,848
5-10 m	6.032	0,853
10-15 m	2.408	3,140
>15 m	542	7,509

Pada interval kedalaman 0-5 m, terdapat 11.151 titik yang diuji, dengan rata-rata kesalahan sebesar 0,848 m. Interval ini menunjukkan tingkat kesalahan yang paling rendah, meskipun jumlah titik yang diuji signifikan lebih banyak daripada interval kedalaman lainnya. Di sisi lain, pada kedalaman di atas 15 m, meskipun jumlah titik yang diuji lebih sedikit (542 titik), rata-rata kesalahan mencapai 7.509 m, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan dengan interval kedalaman lainnya. Contoh perbandingan profil elevasi in-situ dengan elevasi prediksi dapat dilihat pada Gambar 7.

PROFIL MELINTANG 2019
LOKASI : WADUK MRICA
STASIUN : 3L - 3R



Gambar 7 Contoh grafik perbandingan profil elevasi

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 7, dapat dilihat pada profil dengan elevasi 220 mdpl ke bawah, atau kedalaman di atas 10 m, hasil elevasi prediksi terhadap elevasi in-situ terlihat kurang akurat. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma *Random Forest* mengalami kesulitan dalam memperkirakan variasi perubahan kedalaman pada kedalaman yang lebih besar. Selain itu, perbedaan resolusi spasial antara citra Sentinel-2 (10 m) dan interval antar titik sampel in-situ (1-5 m) juga memengaruhi akurasi prediksi.

3.2. Hasil Penambahan Volume Sedimentasi Waduk Mrica

Setelah melakukan estimasi kedalaman Waduk Mrica menggunakan metode *Satellite Derived Bathymetry* (SDB), selanjutnya dilakukan perhitungan volume untuk melihat daya tampung dan penambahan sedimentasi dari waduk tersebut. Hasil penelitian menunjukkan volume Waduk Mrica dari tahun 2018-2022 terus mengalami tren penurunan yang mengindikasikan semakin berkurangnya daya tampung waduk tersebut. Penurunan ini disebabkan karena semakin bertambahnya jumlah sedimen yang dikirimkan dari DAS Serayu yang merupakan daerah tangkapan air (DTA) bagi Waduk Mrica. Nilai penambahan volume sedimentasi didapatkan dari selisih volume waduk dalam dua tahun yang berurutan.

Tabel 4 Total Volume Daya Tampung Waduk Mrica

Tahun	Total Volume Waduk (m ³)
2018	26.909.307,268
2019	24.185.578,859
2020	21.645.156,765
2021	19.360.679,983
2022	17.531.767,057

Tabel 5 Penambahan Volume Sedimentasi Waduk Mrica

Rentang Tahun	Penambahan Sedimentasi (m ³)
2018-2019	4.034.846,095
2019-2020	3.806.103,685
2020-2021	3.038.628,696
2021-2022	1.429.650,466

3.3. Hasil Laju Erosi DAS Serayu

3.3.1 Faktor Erosivitas Hujan DAS Serayu

Klasifikasi curah hujan mengacu pada Peraturan Menteri Kehutanan No 32 Tahun 2009. Berdasarkan hasil interpolasi IDW curah hujan yang terdapat di DAS Serayu terbagi kepada empat klasifikasi dengan rincian pada Tabel 6.

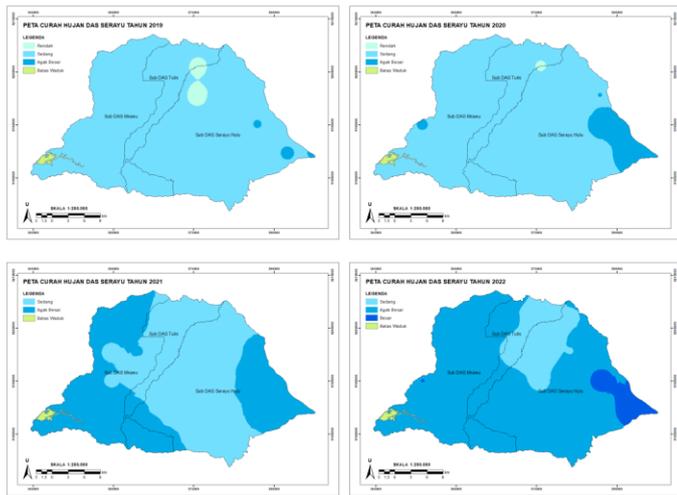
Tabel 6 Klasifikasi curah hujan DAS Serayu

Kelas	Range (mm/th)	Luas (km ²)			
		2019	2020	2021	2022
Rendah	<2500	23,95	3,09	0	0
Sedang	2500-3500	986,57	942,34	546,82	155,59
Agak Besar	3500-4500	7,74	72,84	471,44	810,78
Besar	4500-5500	0	0	0	51,90

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat perbedaan intensitas curah hujan di DAS Serayu dari tahun 2019-2022. Perbedaan ini juga menyebabkan terjadinya perubahan nilai erosi yang dihasilkan. Rentang nilai erosi hujan DAS Serayu dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Rentang nilai erosi hujan DAS Serayu

Tahun	Erosivitas Hujan (MJ.cm/ha.jm/th)		
	Min	Max	Mean
2019	2262,583	4123,244	3006,475
2020	2112,780	4382,371	2945,466
2021	2142,398	4190,404	3037,336
2022	2329,150	5077,313	3527,295



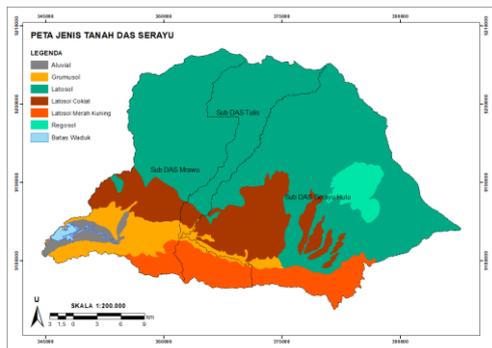
Gambar 8 Peta curah hujan DAS Serayu tahun 2019 (atas kanan), 2020 (atas kiri), 2021 (bawah kanan), 2022 (bawah kiri)

3.3.2 Faktor Erodibilitas Tanah DAS Serayu

Erodibilitas tanah di DAS Serayu diperoleh berdasarkan jenis tanah yang tersebar pada wilayah tersebut. Jenis tanah yang terdapat di wilayah DAS Serayu terdiri dari lima jenis, yaitu alluvial, grumusol, latosol, latosol coklat, latosol merah kuning, dan regosol. Nilai erodibilitas tanah DAS Serayu beserta luasannya dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8 Nilai erodibilitas tanah DAS Serayu

Jenis Tanah	Nilai K	Luas (km ²)	Persentase
Aluvial	0,47	22,200	2,18 %
Grumusol	0,20	74,804	7,35 %
Latosol	0,31	631,365	62,00 %
Latosol Coklat	0,43	157,917	15,51 %
Latosol Merah Kuning	0,56	98,817	9,70 %
Regosol	0,40	33,165	3,26 %



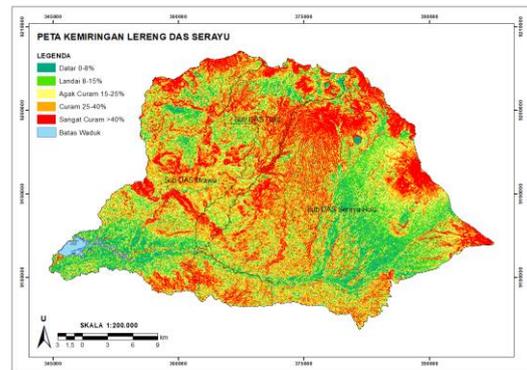
Gambar 9 Peta jenis tanah DAS Serayu

3.3.3 Faktor Kemiringan Lereng DAS Serayu

DAS Serayu, yang secara geografis terletak di Kabupaten Banjarnegara dan Kabupaten Wonosobo, merupakan daerah yang memiliki topografi dengan kemiringan lereng cukup tinggi. Topografi yang bervariasi dibuktikan dengan pengolahan data DEMNAS di mana hasilnya menunjukkan DAS Serayu memiliki nilai kemiringan lereng di semua kelas. Kelas kemiringan lereng terdiri dari kelas datar, landai, agak curam, curam, dan sangat curam. Nilai kemiringan lereng DAS Serayu beserta luasannya dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9 Nilai kemiringan lereng DAS Serayu

Kelas	Slope	LS	Luas (km ²)	Persentase
Datar	0-8 %	0,4	121,106	11,89 %
Landai	8-15 %	1,4	183,332	18,00 %
Agak Curam	15-25 %	3,1	240,194	23,59 %
Curam	25-40 %	6,8	259,813	25,52 %
Sangat Curam	>40 %	9,5	213,821	21,00 %



Gambar 10 Peta kemiringan lereng DAS Serayu

3.3.4 Faktor Tutupan Lahan dan Konservasi DAS Serayu

Berdasarkan hasil pengolahan yang telah dilakukan, terdapat perbedaan luasan kelas tutupan lahan DAS Serayu pada setiap tahunnya. Tutupan lahan di DAS Serayu dari yang terluas didominasi oleh hutan, tegalan, kebun, lahan terbangun, sawah, dan terakhir badan air. Hal ini sesuai dengan kenampakan aslinya di lapangan di mana mayoritas wilayah DAS Serayu berada di dataran tinggi sehingga banyak ditemukan hutan serta pola pertaniannya berupa tegalan dan kebun. Adapun untuk kawasan padat terbangun dan sawah lebih banyak ditemui di area dataran rendahnya. Perubahan luasan klasifikasi tutupan lahan dan konservasi di DAS Serayu dari tahun 2019-2022 dapat dilihat pada Tabel 10.

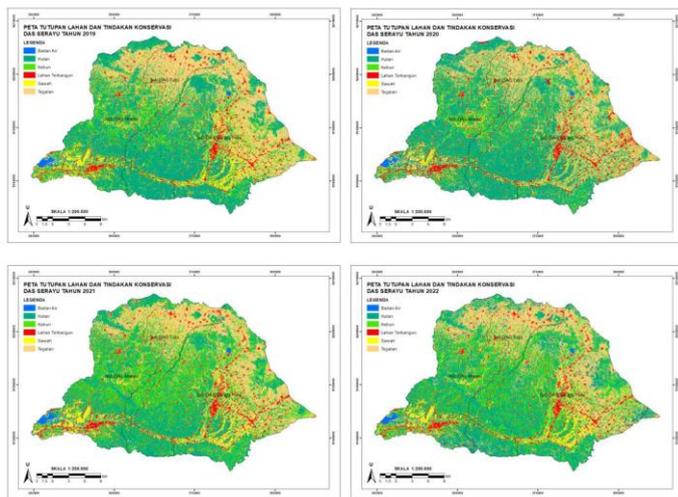
Tabel 10 Luasan klasifikasi tutupan lahan DAS Serayu

Klasifikasi	Luas (km ²)			
	2019	2020	2021	2022
Badan Air	7,714	9,510	6,123	5,718
Hutan	402,597	458,266	362,292	393,097
Sawah	35,618	38,912	51,988	49,681
Tegalan	318,085	291,513	267,840	272,911
Kebun	196,497	151,532	264,051	232,916
Lahan Terbangun	57,757	68,533	65,974	63,943

Hasil klasifikasi tutupan lahan perlu dilakukan uji akurasi untuk mengevaluasi tingkat kesalahan klasifikasi dan untuk menentukan persentase ketepatan dalam pemetaan. Jumlah titik sampel uji akurasi yang digunakan adalah 92 titik. Hasil *overall accuracy* dari keseluruhan tahun klasifikasi tutupan lahan DAS Serayu berada diatas ambang 85% artinya klasifikasi terbimbing yang telah dilakukan dapat diterima dan memenuhi standar.

Tabel 11 Akurasi klasifikasi tutupan lahan DAS Serayu

Klasifikasi Tahun	Overall Accuracy
2019	86,96 %
2020	89,13 %
2021	88,04 %
2022	86,96 %



Gambar 11 Petautupan lahan dan konservasi DAS Serayu tahun 2019 (atas kanan), 2020 (atas kiri), 2021 (bawah kanan), 2022 (bawah kiri)

3.3.5 Klasifikasi Laju Erosi DAS Serayu

Berdasarkan indeks parameter penentu laju erosi metode USLE, maka didapatkan hasil perhitungan laju erosi di DAS Serayu yang terbagi dalam lima kelas. Lima kelas tersebut yakni sangat ringan (I), ringan (II), sedang (III), berat (IV), dan serta sangat berat (V).

Tabel 12 Klasifikasi laju erosi DAS Serayu

Kelas	Range (ton/ha/th)	Luas (km ²)			
		2019	2020	2021	2022
I	0-15	78,48	107,33	80,82	63,93
II	15-60	279,23	303,68	223,45	218,55
III	60-180	319,19	303,41	318,50	336,39
IV	180-400	124,36	108,76	139,42	141,63
V	>400	217,00	195,09	256,09	257,76

Selain itu dilakukan juga perhitungan total erosi dari setiap Sub DAS yang terdiri dari Sub DAS Mrawu, Sub DAS Tulis, dan Sub DAS Serayu Hulu untuk mengetahui Sub DAS mana yang menyumbang total erosi terbesar. Perhitungan total erosi dilakukan dengan menggunakan *tools zonal statistic* di *software QGIS* kemudian membaginya dengan resolusi *pixel* resampling yang digunakan.

Tabel 13 Total erosi DAS Serayu

Tahun	Total Erosi Sub DAS (ton/th)			Total Erosi (ton/th)
	Mrawu	Tulis	Serayu Hulu	
2019	8.510.56	5.299.31	15.948.63	29.758.513,38
2020	7.081.33	4.878.74	14.920.91	26.880.988,98
2021	9.234.63	5.654.19	17.295.14	32.183.969,08
2022	10.027.94	6.101.65	18.490.44	34.620.033,53

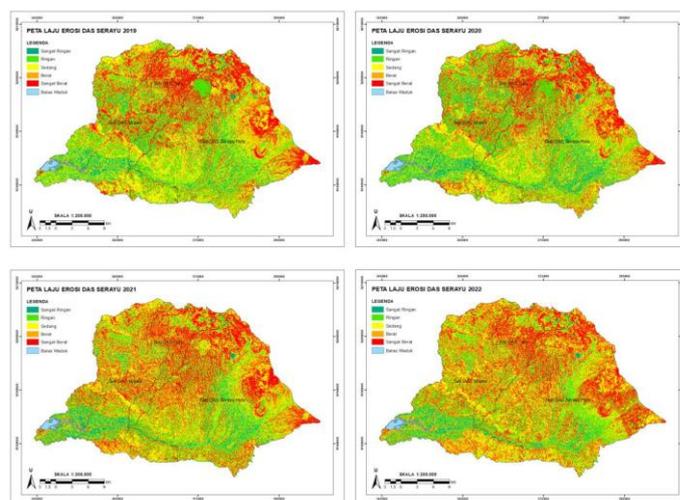
Sub DAS yang konsisten menyumbangkan total erosi terbesar di setiap tahunnya adalah Sub DAS Serayu Hulu dan yang terkecil adalah Sub DAS Tulis. Namun, hal ini dapat terjadi karena Sub DAS Serayu Hulu memiliki luasan area yang lebih luas dibandingkan dua Sub DAS lainnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan perhitungan rata-rata intensitas erosi dari setiap Sub DAS dengan mempertimbangkan luasan areanya sehingga dapat

diketahui Sub DAS mana yang memiliki dampak erosi terparah.

Tabel 14 Intensitas erosi DAS Serayu

Sub DAS	Luas (ha)	Intensitas Laju Erosi (ton/ha/th)			
		2019	2020	2021	2022
Mrawu	32810,73	259,38	215,82	281,45	305,63
Tulis	15630,16	339,04	312,14	361,75	390,38
Serayu Hulu	53385,83	298,74	279,49	323,96	346,35

Perhitungan intensitas erosi dilakukan dengan membagi total erosi dengan luas area setiap Sub DAS. Hasilnya dapat diketahui Sub DAS yang memiliki dampak erosi terparah adalah Sub DAS Tulis di mana ditunjukkan dari nilai intensitas erosinya yang selalu lebih besar dibandingkan dua Sub DAS lainnya pada setiap tahunnya. Hal ini dibuktikan dengan keadaan sebenarnya di lapangan yaitu pada area Sub DAS ini, utamanya disebelah utara, merupakan wilayah dataran tinggi dengan kemiringan lereng yang sangat curam serta mayoritas dimanfaatkan sebagai lahan pertanian tegalan sehingga perhitungan erosinya menghasilkan laju erosi yang sangat berat.



Gambar 12 Peta laju erosi DAS Serayu tahun 2019 (atas kanan), 2020 (atas kiri), 2021 (bawah kanan), 2022 (bawah kiri)

3.3.6 Faktor Pengaruh Perubahan Erosi DAS Serayu

Terdapat perbedaan total erosi di DAS Serayu dari tahun 2019-2022. Hal ini membuktikan terjadinya perubahan laju erosi dalam rentang waktu tersebut. Terjadinya perubahan laju erosi di DAS Serayu tidak terlepas dari pengaruh perubahan parameter pendukung laju erosi. Parameter laju erosi berbanding lurus dengan nilai laju erosi sehingga peningkatan ataupun penurunan intensitas masing-masing parameter sangat berpengaruh terhadap besar atau kecilnya laju erosi. Dalam persamaan USLE, parameter yang memungkinkan untuk mengalami perubahan adalah erosivitas hujan (R), tutupan lahan (C), dan konservasi (P). Perubahan nilai R disebabkan karena berubahnya intensitas curah hujan yang turun, sedangkan perubahan nilai CP disebabkan oleh perubahan tutupan lahan yang terjadi di DAS Serayu.

Tabel 15 Perbandingan erosivitas hujan dan erosi DAS Serayu

Tahun	Erosivitas Hujan Rata-rata	Laju Erosi Rata-rata (ton/ha/th)	Total Erosi (ton/th)
2019	3006,475	292,237	29.758.513,38
2020	2945,466	263,979	26.880.988,98
2021	3037,336	316,055	32.183.969,08
2022	3527,295	339,978	34.620.033,53

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Aisy (2022), diketahui bahwa perubahan curah hujan menjadi faktor utama yang menyebabkan terjadinya perubahan laju erosi. Hal ini dapat dibuktikan dari kesesuaian hasil pengolahan USLE di DAS Serayu di mana perubahan erosivitas curah hujan yang signifikan memberikan pengaruh yang besar terhadap perubahan nilai laju erosi yang terjadi. Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa semakin tinggi erosivitas curah hujan maka semakin besar juga nilai laju erosi dan total erosi yang dihasilkan.

3.3.7 Sediment Delivery Ratio DAS Serayu

Pada umumnya total sedimen yang tererosi tidak seluruhnya terangkut masuk ke dalam aliran sungai. Nisbah antara jumlah sedimen yang terangkut ke dalam sungai terhadap total erosi yang terjadi di dalam DAS dihitung menggunakan *sediment delivery ratio*. Renfro (1975) dalam (Sabila et al., 2020) merumuskan persamaan SDR dengan menggunakan parameter panjang basin dan relief basin. Panjang basin merupakan panjang sungai utama pada DAS Serayu yaitu sepanjang 76,058 km. Adapun relief basin dihitung menggunakan nilai elevasi tertinggi dan nilai elevasi terendah pada DAS Serayu. Nilai elevasi tertinggi DAS Serayu yaitu 3288,360 m sedangkan elevasi terendah yaitu 125,263 m, sehingga dapat diketahui relief basinnnya 3163,097 m. Dengan menggunakan persamaan (4) didapat nilai konstanta SDR DAS Serayu sebesar 0,257. Selanjutnya nilai total erosi dikalikan dengan konstanta SDR sehingga didapatkan jumlah total *sediment yield*. Hasil perhitungan SDR di DAS Serayu dari tahun 2019-2022 dapat dilihat pada Tabel 16.

Tabel 16 Hasil perhitungan SDR DAS Serayu

Tahun	Total Erosi (ton/th)	Sediment Yield (ton/th)
2019	29.758.513,383	7.633.415,581
2020	26.880.988,979	6.895.296,061
2021	32.183.969,081	8.255.574,057
2022	34.620.033,534	8.880.453,805

Diketahui jumlah total erosi berbanding lurus dengan jumlah *sediment yield* yang terendapkan, sehingga peningkatan ataupun penurunan total erosi berpengaruh terhadap besar atau kecilnya *sediment yield*. Berdasarkan Tabel 10, terjadi penurunan *sediment yield* di DAS Serayu pada tahun 2020, sedangkan pada tahun-tahun setelahnya terus mengalami kenaikan jumlah sedimen.

3.4. Hasil Pola Erosi Terhadap Pendangkalan Waduk

Berdasarkan dua metode pengolahan yang telah dilakukan, yaitu *Satellite Derived Bathymetry* (SDB) untuk pemetaan estimasi kedalaman dan sedimentasi Waduk Mrica serta *Universal Soil Loss Equation* untuk pemetaan

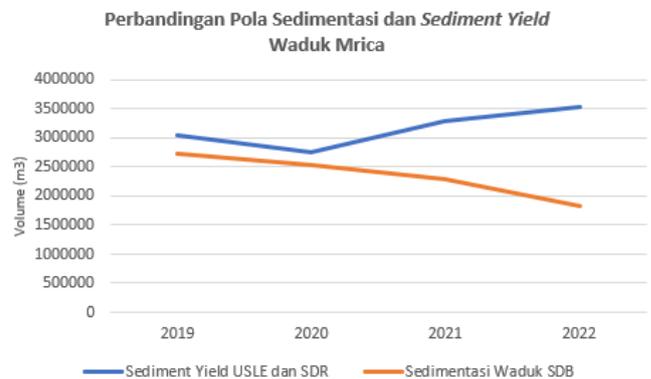
erosi dan *sediment yield* DAS Serayu, yang merupakan daerah tangkapan air (DTA) Waduk Mrica, maka dapat diketahui perbandingan hasil sedimen diantara keduanya. Perbandingan pola antara erosi DAS Serayu terhadap pendangkalan Waduk Mrica dilakukan untuk melihat dan menganalisis kesesuaian kedua metode tersebut.

Sebelum dilakukan perbandingan, terlebih dahulu perlu dilakukan perhitungan berapa banyak *sediment yield* DAS Serayu yang masuk ke tampungan Waduk Mrica menggunakan *trap efficiency*. *Sediment yield* DAS Serayu hasil perhitungan *sediment delivery ratio* (SDR) merupakan rasio sedimen potensial yang terhanyut di sepanjang area basin dari total erosi yang terjadi. Nilai *sediment yield* DAS Serayu tersebut harus dikalikan dengan *trap efficiency* untuk mendapatkan proporsi *sediment yield* yang masuk dan terendapkan di dalam tampungan Waduk Mrica. Berdasarkan data teknis dari PT. PLN Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan (UBP) Mrica, besaran *trap efficiency* di Waduk Mrica adalah 41%. Hal tersebut menunjukkan bahwa diperkirakan 41% dari *sediment yield* DAS Serayu masuk dan terendapkan di dalam tampungan waduk.

Selain itu, perlu dilakukan penyamaan satuan di mana data yang didapatkan dari besaran *sediment yield* yang masuk ke tampungan Waduk Mrica metode USLE masih berbentuk massa sehingga perlu dikonversi kedalam bentuk volume, menyesuaikan dengan satuan sedimentasi Waduk Mrica yang digunakan dari metode SDB. Konversi satuan dari massa ke volume dilakukan dengan cara membagi *sediment yield* yang masuk ke tampungan Waduk Mrica dengan massa jenis dari sedimen layang (*suspended load*). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Wulandari (2020), konversi tersebut dilakukan dengan membagi volume sedimentasi dengan berat massa suspensi yaitu 1,029 kg/m³. Hasil perhitungan sedimentasi DAS Serayu terhadap Waduk Mrica dari tahun 2019-2022 dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17 Sedimentasi Waduk Mrica dan DAS Serayu

Tahun	Sedimentasi Waduk SDB (m ³)	Sediment Yield Waduk USLE (m ³)
2019	4.034.846,095	5.681.382,297
2020	3.806.103,685	5.137.050,966
2021	3.038.628,696	7.005.053,289
2022	1.429.650,466	7.570.510,205



Gambar 13 Pola sedimentasi DAS Serayu dan Waduk Mrica

Berdasarkan Tabel 17, terdapat perbedaan antara sedimentasi Waduk Mrica hasil SDB dengan *sediment yield* Waduk Mrica hasil USLE dan SDR. Adapun jika ditinjau dari perbandingan polanya, dapat dilihat di tahun 2019 dan 2020 terdapat kesesuaian antara sedimen DAS Serayu dan sedimen Waduk Mrica. Namun, pada tahun 2021 dan 2022 terdapat data yang saling berlawanan di mana sedimen DAS cenderung naik sedangkan sedimen waduk cenderung turun. Hal ini disebabkan karena adanya tindakan pengendalian sedimentasi Waduk Mrica berupa *dredging* dan *flushing* sedimen yang dilakukan oleh PT. Indonesia Power UBP Mrica selaku pengelola waduk, sehingga perbedaan pola tersebut wajar terjadi dan beralasan

Pada perbandingan *sediment yield* DAS Serayu dengan penambahan sedimen pada Waduk Mrica, idealnya perlu memasukkan perhitungan volume sedimen yang terbuang dari proses *dredging* dan *flushing* yang dilakukan oleh pengelola waduk agar hasil perbandingan yang didapatkan lebih akurat dan mendekati nilai sebenarnya. Selain itu, perlu dilakukan perbandingan dengan kurva *hidrograf volume area* (H-V-A) Waduk Mrica pada tahun-tahun sebelumnya untuk melihat pola kapasitas tampungan waduk. Namun, karena keterbatasan data yang dapat diakses oleh Penulis, maka pada penelitian ini perbandingan terhadap volume sedimen yang terbuang dari *dredging* dan *flushing* serta Kurva H-V-A tidak dapat dilakukan. Hal ini menjadi saran yang perlu diterapkan bagi peneliti-peneliti selanjutnya yang mengambil topik yang sama untuk mempertimbangkan kedua hal tersebut agar analisis hasil yang didapatkan lebih optimal.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil serta pembahasan, maka dapat diperoleh kesimpulan dari penelitian ini yaitu:

1. Hasil penelitian menunjukkan rentang kedalaman 0-10 m memiliki akurasi yang lebih baik dibanding rentang kedalaman di atas 10 m. Penurunan akurasi estimasi kedalaman disebabkan oleh sejumlah faktor seperti seiring meningkatnya kedalaman maka lebih banyak energi cahaya diserap dan dihamburkan dalam kolom air, mengakibatkan berkurangnya reflektansi cahaya yang direkam oleh sensor satelit. Selain itu, adanya partikel sedimen dalam air juga berdampak pada berkurangnya penetrasi cahaya ke dalam kolom air.
2. Penambahan nilai sedimentasi dapat dilihat dari berkurangnya volume daya tampung Waduk Mrica dari tahun 2018 hingga tahun 2022. Nilai sedimentasi didapatkan dari selisih volume waduk dalam dua tahun yang berurutan dengan penambahan terbanyak sejumlah 4.034.846,095 m³ pada tahun 2019 dan paling sedikit sejumlah 1.429.650,466 m³ pada tahun 2022.
3. Terdapat perbedaan laju erosi, total erosi, dan *sediment yield* di DAS Serayu dari tahun 2019 sampai 2022. Penurunan dampak erosi terjadi pada tahun

2020, adapun pada tahun-tahun setelahnya terus mengalami kenaikan. Nilai parameter berbanding lurus dengan nilai laju erosi sehingga peningkatan ataupun penurunan intensitas tiap parameter sangat berpengaruh terhadap nilai laju erosi. Adapun peningkatan atau penurunan *sediment yield* bergantung pada jumlah total erosi DAS Serayu di setiap tahunnya.

4. Terdapat kesesuaian pola antara sedimen hasil erosi DAS Serayu dan pendangkalan Waduk Mrica pada tahun 2019 dan 2020. Namun, pada tahun 2021 dan 2022 terdapat ketidaksesuaian di mana sedimen DAS cenderung naik sedangkan sedimen waduk cenderung turun di mana hal ini disebabkan karena adanya *dredging* dan *flushing* sedimen Waduk Mrica sehingga hasil sedimentasinya saling berlawanan.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini (*The authors declare no competing interest*).

6. Referensi

- Abdul Gafoor, F., Al-Shehhi, M. R., Cho, C. S., & Ghedira, H. (2022). Gradient Boosting and Linear Regression for Estimating Coastal Bathymetry Based on Sentinel-2 Images. *Remote Sensing*, 5037.
- Ahmad Shofiyul Huda, Arief Laila Nugraha, Nurhadi Bashit. (2020). Analisis Perubahan Laju Erosi Periode Tahun 2013 Dan Tahun 2018 Berbasis Data Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis (Studi Kasus : DAS Garang). *Jurnal Geodesi UNDIP*, 106-114.
- Alie, M. E. (2015). Kajian Erosi Lahan pada DAS Dawas Kabupaten Musi Banyuasin Sumatera Selatan. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 750-754.
- Anindya Majhi, Rohit Shaw, Kunal Mallick, Priyank Pravin Patel. (2021). Towards Improved USLE-Based Soil Erosion Modelling In India: A Review Of Prevalent Pitfalls And Implementation Of Exemplar Methods. *Earth-Science Reviews*, 1-25.
- ASCE. (1982). Relationships Between Morphology of Small Streams and Sediment Yield. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1328-1365.
- Danoedoro, P. (2012). *Pengantar Penginderaan Jauh*. Yogyakarta: ANDI Yogyakarta.
- Dutta, S. (2016). Soil erosion, sediment yield and sedimentation of reservoir: A review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2. doi:10.1007/s40808-016-0182-y
- Faiz Al Farikhi, Retno Widodo Dwi Pramono. (2023). Perbandingan Algoritma Classification And Regression Tree (CART) dan *Random Forest* (RF) Untuk Klasifikasi Penggunaan Lahan Pada Google Earth Engine. *Spatial Wahana Komunikasi dan Informasi Geografi*, 171-179.

- Fakhrizal Arifandi, Cahyono Ikhsan. (2019). Pengaruh Sedimen Terhadap Umur Layanan Pada Tampungan Mati (Dead Storage) Waduk Krisak di Wonogiri Dengan Metode USLE (Universal Soil Losses Equation). *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 430-439.
- Gelmore, S., Saleem, A., & Dewan, A. (2018, September 29). Effectiveness of DOS (Dark-Object Subtraction) Method and Water Index Techniques to Map Wetlands in Rapidly Urbanising Megacity with Landsat 8 Data. *Remote Sensing and Geographic Information System*, hal. 1.
- Hedley, J., Harborne, A., & Mumby, P. (2005). Technical note: Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*.
- Jaelani, M. (2016, April 5). Teori Dasar Koreksi Atmosfer. hal. 1.
- Jerlov, N. (1976). *Marine Optics*. Amsterdam: Elsevier O.
- Kataraihya, D. J. (2021). *Refinement and Automation of Satellite Derived Bathymetry and Development of a new Software Tool*. Genova: Universita Degli Studi di Genova.
- Kehutanan, K. (2008). *Pedoman Penyusunan Rencana Teknik Rehabilitasi Teknik Lapangan dan Konservasi Tanah Daerah Aliran Sungai*.
- Loupe, G. (2014). *Understanding Random Forest*. Liege: University of Liege.
- Lukiawan, R., Purwanto, E. H., & Ayundyahrini, M. (2019). Standar Koreksi Geometrik Citra Satelit Resolusi Menengah Dan Manfaat Bagi Pengguna. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Standardisasi, Badan Standardisasi Nasional*, 46-47.
- Masita Dwi Mandini Manessa, M. H. (2017). Determination Of The Best Methodology For Bathymetry Mapping Using Spot 6 Imagery: A Study Of 12 Empirical Algorithms. *International Journal Of Remote Sensing And Earth Sciences*, 127-136.
- Merchant, M. A. (2023). Modelling Inland Arctic Bathymetry From Space Using Cloud-Based Machine Learning And Sentinel-2. *Space Research*, 4256-4271.
- Muhammad Asadullah Al-Fathin, Bambang Sudarsono, Nurhadi Bashit. (2019). Analisis Perbandingan Peningkatan Sedimentasi di Waduk Mrica dengan Perubahan Tutupan Lahan pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Merawu Menggunakan Data Citra Satelit Landsat. *Jurnal Geodesi Undip*, 388-397.
- Nugraha, D. K. (2021). Dampak Perubahan Curah Hujan Terhadap Tingkat Kerentanan Erosi Tanah di Sub DAS Merawu, Jawa Tengah . *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 356-366.
- Nur Ariva Sabila, Bambang Yulistiyanto, Djoko Legono. (2020). Kajian Sedimen Delivery Ratio Bendungan Bener Kabupaten Purworejo. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2020* (hal. 177-184). Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Pasaribu, J. M. (2012). Perbandingan Teknik Interpolasi DEM SRTM dengan Metode Inverse Distance Weighting (IDW), Natural Neighbor, dan Spline. *Jurnal Penginderaan Jauh*, 126-132.
- Plevris, V., Solorzano, G., Bakas, N., & Ben Seghier, M. (2022). Investigation of Performance Metrics in Regression Analysis and Machine Learning-Based Prediction Models. *World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress*. PT. Indonesia Power. (2018). *Laporan Pelaksanaan Penyelidikan Sedimentasi Waduk PLTA Banjarnegara*.
- Rahman, A. (2018). *Modul Ajar Pengolahan Citra Digital (Studi Kasus Perubahan Lahan Mangrove dan Rawa)*. Banjarbaru: Universitas Lambung Mangkurat.
- Rifky Muhammad Zulfa Fauzi, Maryono. (2016). Kajian Erosi Dan Hasil Sedimen Untuk Konservasi Lahan DAS Kreo Hulu. *Jurnal Pembangunan Wilayah Kota*, 429-445.
- Rihadatul Aisy, Abdi Sukmono, Hana Sugiastu Firdaus. (2022). Analisis Perubahan Laju Erosi Pada Sub DAS Keduang Tahun 2016-2021 dengan Metode Universal Soil Loss Equation (USLE). *Jurnal Geodesi Undip*, 1-10.
- Schowengerdt, R. (2007). *Remote Sensing*. Burlington: Academic PRess.
- Su, H.; Liu, H.; Heyman, W.D. (2008). Automated Derivation of Bathymetric Information from Multi-Spectral Satellite Imagery Using a Non-Linear Inversion Model. *Marine Geodesy*, 31(4), 281-298.
- Sugiyono. (2018). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan Kombinasi (Mixed Methods)*. Bandung: Alfabeta.
- Suripin. (2004). *Pelestarian Sumber Daya Tanah dan Air*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Sutapa, I. W. (2010). Analisis Potensi Erosi Pada Daerah Aliran Sungai (DAS) di Sulawesi Tengah. *Jurnal SMARTek*, 169-181.
- Tambunan, S. B. R., & Santosa, P. B. (2018). Progo Watershed Delineation and River Network Analysis Using SRTM DEM and Contour DEM Hypsography of RBI 1: 25000. *Proceedings - 2018 4th International Conference on Science and Technology, ICST 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528287>
- Ulya, S. F. (2018). Analisis Prediksi Quick Count Dengan Metode Stratified Random Sampling dan Estimasi Confidence Interval Menggunakan Metode Maksimum Likelihood. *UNNES Journal of Mathematics*, 108-119.
- Vira Febianti, Bandi Sasmito, Nurhadi Bashit. (2022). Pemdelan Perubahan Tutupan Lahan Berbasis

- Penginderaan Jauh (Studi Kasus Kota Semarang).
Jurnal Geodesi Undip, 1-10.
- Walter H. Wischmeier, D. D. (1978). *Predicting Rainfall-Erosion Losses : A Guide To Conservation Planning*. USDA Agriculture Handbook.
- Weifeng Zhou, Bingfang wu. (2008). Assessment of Soil Erosion and Sediment Delivery Ratio Using Remote Sensing And GIS: a Case Study of Upstream Chaobaihe River Catchment, North China. *International Journal of Sediment Research*, 167-173.
- Xu, R. (2013). *Improvements to Random Forest Methodology*. Iowa: Iowa State Univesity.
- Yanbo Jiang, Anchen Qin. (2023). Research on Rainfall Prediction Based on RBF Neural Network Model and Stormwater Inundation Risk in Scenic Areas: a Case Study Of The Yesanpo Scenic Area, Baoding, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1-7.