



Analisis Tingkat Kerapatan Vegetasi terhadap Sedimentasi Waduk Batutegi

Analysis of Changes in Vegetation Density Levels on Sedimentation in Batutegi Reservoir

Zulfa Harda Chairunnisa¹, Ridwan^{1*}, Elhamida Rezkia Amien¹, Sandi Asmara¹

¹Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung

*Corresponding Author: zahabridwan@gmail.com

Abstract. *The Batutegi Reservoir is one of the vital infrastructures in Lampung Province, serving as a source of irrigation water, hydroelectric power, raw water, and flood control for the surrounding area. However, changes in vegetation density in the catchment area can affect the rate of erosion and sedimentation in the reservoir, which impacts the storage capacity and useful life of the Batutegi Reservoir. This study aims to analyse changes in vegetation density in the reservoir catchment area using Sentinel-2A imagery and to assess its impact on sedimentation and total suspended solids (TSS) levels in Batutegi Reservoir during the period 2015-2024. The methods used included NDVI and WRI image analysis with satellite image processing using SNAP and ArcMap software, as well as SWAT model simulation to predict erosion and sedimentation. The results showed a 37.41% decrease in high-density vegetation area and a 339.32% increase in low-density vegetation during the observation period. The highest TSS level was recorded in 2018 at 14.51 mg/l, in line with high rainfall due to the La Niña phenomenon. SWAT simulations indicate the highest increase in sedimentation load in the same year, reaching 2,587.90 tonnes/year, with the largest contribution coming from sub-catchment area number 71 and 75. The correlation between sedimentation values from SWAT and Sentinel-2A showed a determination coefficient (R^2) of 0.917. This study confirms that a significant decrease in vegetation density exacerbates reservoir sedimentation. Regular monitoring of changes in vegetation density and reservoir water quality, particularly TSS values, is an important strategy for maintaining the useful life and capacity of the Batutegi Reservoir*

Keywords: *Batutegi Reservoir, NDVI, sedimentation, SWAT, TSS.*

1. Pendahuluan

Waduk Batutegi, yang terletak di Kabupaten Tanggamus, merupakan salah satu sumber daya penting dalam mendukung kegiatan pertanian, pembangkit listrik, pariwisata dan pengendalian banjir di Propinsi Lampung. Menurut Setiawan dkk. (2017), kapasitas tampungan air Waduk Batutegi dipengaruhi oleh aliran masuk dari anak-anak Sungai Way Sekampung, dengan volume efektif waduk sebesar $665 \times 10^6 \text{ m}^3$. Fungsi utama waduk ini sebagai sumber air irigasi untuk lahan irigasi teknis di daerah irigasi Sekampung system seluas 108.553 ha/tahun yang terbagi pada musim tanam rendeng seluas 46.573 hektar dan musim tanam gadu seluas 41.980 hektar (Koei, 2003 dalam Ridwan, 2014). Waduk ini juga difungsikan untuk menyediakan 2.250 lt/dt air baku untuk kebutuhan air minum dan menghasilkan daya listrik sebesar $2 \times 14 \text{ MW}$ dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) Batutegi. Untuk memenuhi fungsi tersebut posisi ketinggian muka air waduk maksimum pada elevasi 281,5 m sedangkan tinggi muka air terendah sebagai dead storage pada posisi 208 m dengan umur guna waduk direncanakan selama 100 tahun (Ridwan, 2014). Namun keberadaan waduk ini terancam oleh fenomena sedimentasi yang dapat mengurangi kapasitas tampung air dan berdampak pada keberlanjutan fungsi waduk.

Fungsi utama waduk sebagai irigasi lahan teknis akan terganggu akibat kondisi lingkungan di daerah tangkapan air (DTA) Waduk Batutegi yang saat ini sangat memprihatinkan. Sub Daerah Aliran Sungai (DAS) Way Sangharus, yang merupakan bagian dari DTA tersebut, telah mengalami konversi fungsi lahan dari hutan menjadi area pertanian. Beberapa area masih terlihat terbuka tanpa vegetasi dan penerapan teknik konservasi tanah, yang berpotensi meningkatkan laju aliran permukaan dan erosi tanah di hulu. Akibatnya, hal ini akan berkontribusi pada peningkatan sedimentasi di hilir (Heryani dkk., 2003). Selanjutnya, Banuwa (2008), menyatakan bahwa kerusakan di wilayah DAS Batutegi disebabkan oleh konversi hutan menjadi lahan pertanian tanpa mempertimbangkan kesesuaian lahan, teknologi pertanian, serta konservasi tanah dan air.

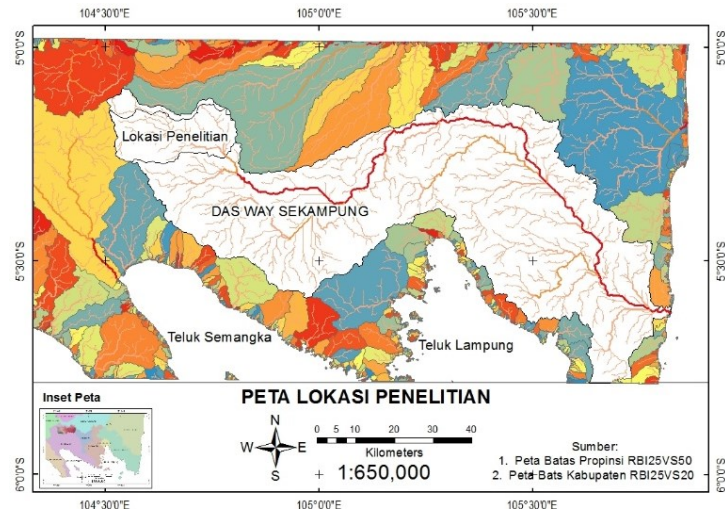
Keberadaan vegetasi tetap atau hutan, penggunaan lahan lainnya, serta kondisi fisik DAS menjadi faktor penentu dalam laju sedimentasi, erosi lahan, dan jumlah aliran permukaan yang masuk ke sungai (Carson, 1989). Kerusakan lahan dan penurunan kemampuan daerah aliran sungai (DAS) dalam meresapkan air merupakan akibat langsung dari deforestasi atau perubahan tutupan lahan hutan. Ketika permukaan tanah terbuka, erosi dapat terjadi melebihi batas toleransi yang diperbolehkan, sehingga material yang tererosi akan masuk ke dalam sungai dan mengendap di waduk. Bersama dengan sedimen, unsur hara, pupuk, partikel tanah, dan polutan lainnya juga akan terbawa, yang dapat menurunkan produktivitas tanah dan menjadi pencemar di dalam waduk (Heryani dkk., 2012). Dampak dari kerusakan fungsi hidrologis tersebut berakibat kepada menurunnya umur guna waduk.

Untuk mengamati dan menganalisis perubahan kondisi tutupan lahan, teknologi penginderaan jauh dengan menggunakan citra satelit menawarkan solusi yang efisien dan efektif. Citra satelit dapat menyediakan informasi yang akurat mengenai kondisi vegetasi dalam jangka waktu yang panjang, tanpa perlu survei lapangan yang memakan waktu dan biaya. Dengan menggunakan citra satelit, analisis terhadap perubahan tutupan vegetasi dapat dilakukan secara kuantitatif dan komprehensif, memungkinkan identifikasi pola dan tren yang mungkin terlewatkan melalui metode konvensional.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data tingkat perubahan kerapatan vegetasi di Daerah Tangkapan Air (DTA) Waduk Batutegi, mendapatkan nilai dugaan *Total Suspended Solid* (TSS) yang masuk ke dalam Waduk Batutegi, dan mendapatkan data besarnya beban sedimentasi yang masuk ke dalam Waduk Batutegi. Melalui pendekatan berbasis penginderaan jauh, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam pemantauan perubahan lingkungan secara lebih efektif dan efisien, serta memberikan kontribusi terhadap upaya pengelolaan sumber daya alam yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari 2025 sampai April 2025, di Laboratorium Rekayasa Sumberdaya Air dan Lahan (RSDAL), Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Sebagai objek penelitian adalah Waduk Batutegi, yang terletak di Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung (Gambar 1).



Gambar 1. Lokasi objek penelitian

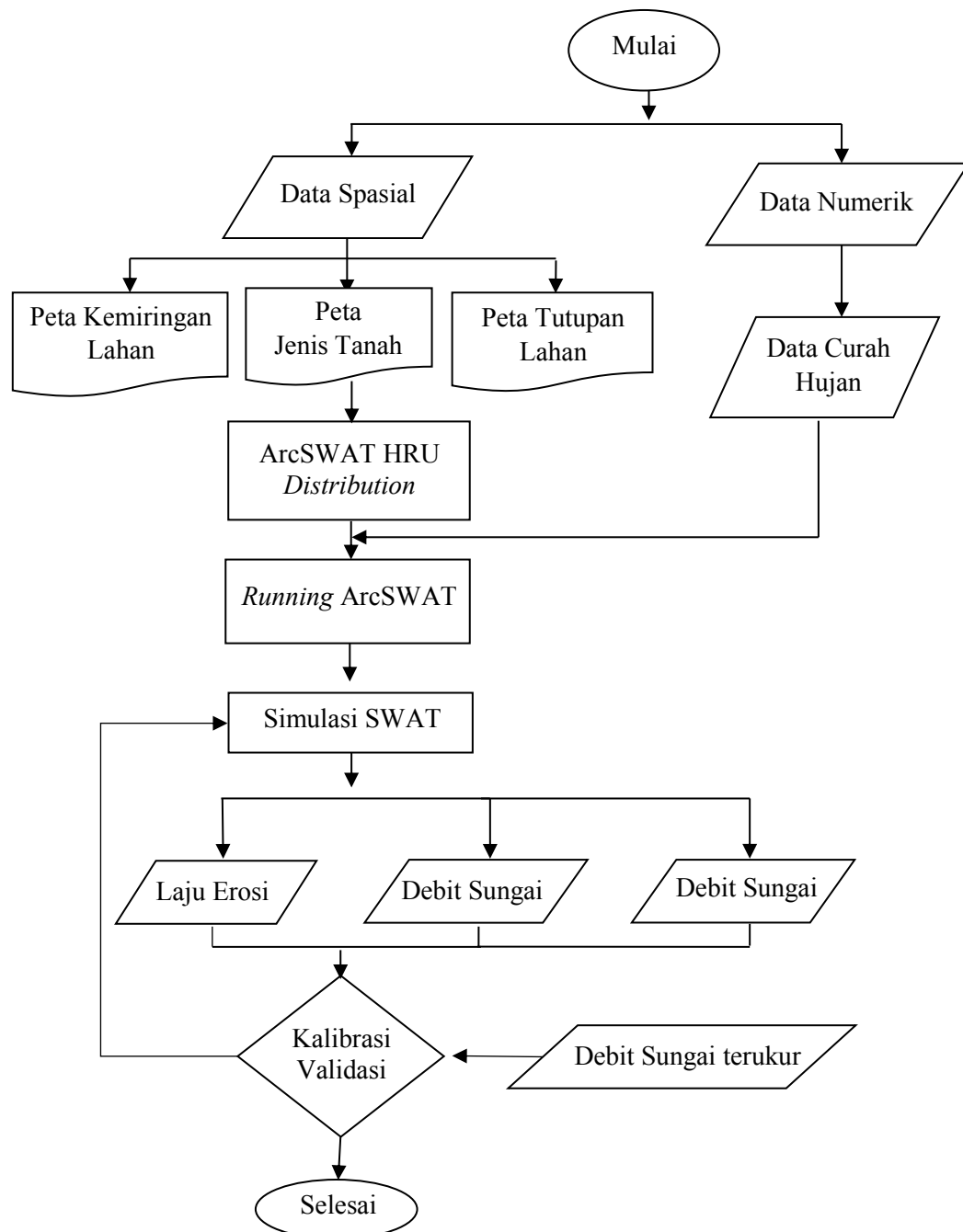
Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi perangkat keras (*hardware*) Laptop ASUS Vivobook, dengan *processor* 12th Gen Intel(R) Core (TM) i3-1215U, 1.20 GHz, RAM 8,00 GB, 64-bit *operating system* dan perangkat lunak (*software*) seperti ArcMap 10.2, SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (ArcSwat) 2012, dan SNAP (*Sentinel Application Platform*) 10.0.0. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder, yaitu data spasial yang dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis dan sumber data penelitian

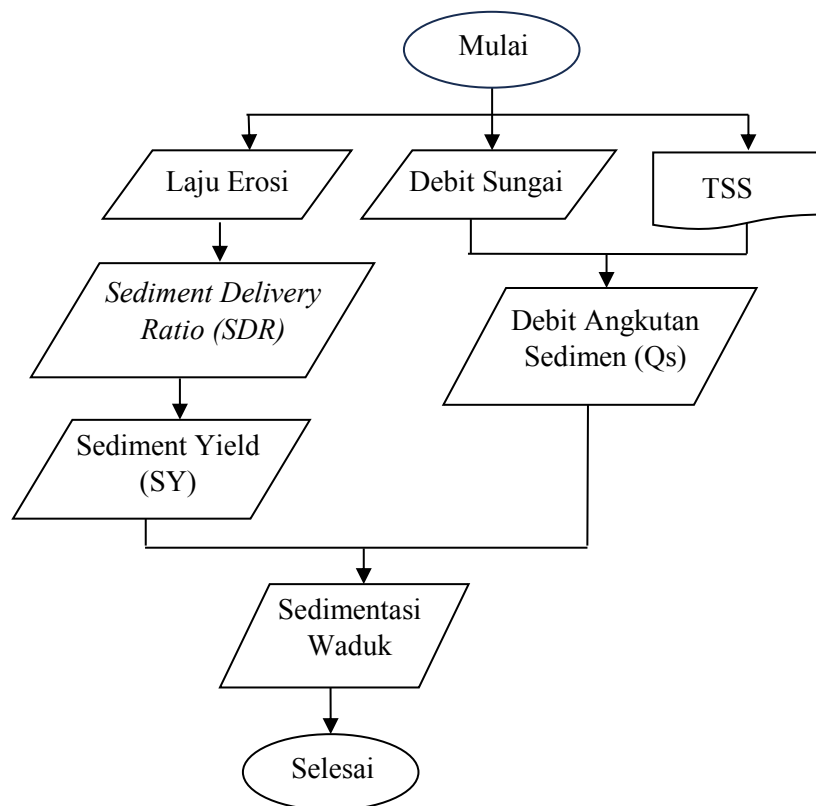
No.	Jenis Data	Keterangan	Sumber Data
1.	Citra Sentinel 2A	Citra digunakan untuk analisis TSS (<i>Total Suspended Solid</i>) dan analisis keberadaan air dan kerapatan vegetasi. Citra yang digunakan pada tahun 2015, 2018, 2021 dan 2024	Copernicus https://browser.dataspace.copernicus.eu/
2.	Curah Hujan	Data curah hujan bulana pada musim penghujan pada tahun 2015-2024	Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Pesawaran
3.	– Peta Administrasi Kabupaten Tanggamus – Peta Tutupan Lahan – Peta Jaringan Sungai – Peta Jenis Tanah – Peta Kemiringan Lahan	Peta digunakan untuk analisis debit sungai, erosi, dan sedimentasi	Badan Informasi Geospasial https://tanahair.indonesia.go.id/portall-web/

2.1 Tahap Pengolahan Data

Seluruh data yang sudah didapat kemudian diproses menjadi peta digital menggunakan *software* SNAP dan ArcMap. Peta yang dibuat yaitu, Peta Administrasi Kabupaten Tanggamus, Peta Sebaran TSS (*Total Suspended Solid*), Peta Kerapatan Vegetasi, Peta Keterdapatan Air, Peta Batas dan karakteristik fisik DAS. Untuk menduga besarnya debit sungai, laju erosi, dan sedimentasi di sungai dilakukan dengan menggunakan model SWAT sebagaimana yang dilakukan oleh Ridwan (2014) dengan bagan alir proses disajikan pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Diagram Alir Running SWAT dan Kalibrasi Model



Gambar 3. Diagram alir analisis sedimentasi waduk batutegei

2.2 Analisis dan Interpretasi Data

2.2.1 Analisis WRI dan TSS

Water Ratio Index (WRI) merupakan indeks yang dibuat untuk mengidentifikasi keberadaan air di permukaan bumi, terutama di sungai, danau, dan genangan air. Algoritma yang diterapkan untuk mengukur nilai WRI menggunakan Persamaan berikut (Shen dan Li, 2010).

$$WRI = \frac{(Band\ Green - Band\ Red)}{(Band\ NIR + Band\ SWIR\ 1)} \quad (1)$$

dimana *Band Green* adalah reflektansi panjang gelombang hijau (*Band 3*), *Band Red* adalah reflektansi panjang gelombang merah (*Band 4*), *Band NIR* adalah reflektansi panjang gelombang *Near Infrared* (NIR) (*Band 8*), *Band SWIR* adalah reflektansi inframerah gelombang menengah (*SWIR*) (*Band 11*).

Total Suspended Solid (TSS) merupakan indikator penting untuk menilai kualitas air sungai, yang mencakup partikel padat seperti lumpur, pasir, dan bahan organik yang tersuspensi dalam air. Algoritma yang diterapkan untuk mengukur nilai TSS menggunakan Persamaan berikut (Cabezas dkk., 2021).

$$TSS = 31,42 \times \frac{(\log_{10}(Band\ Green))}{(\log_{10}(Band\ Red))} - 12,719 \quad (2)$$

dimana *Band Green* adalah reflektansi panjang gelombang hijau (*Band 3*), *Band Red* adalah reflektansi panjang gelombang merah (*Band 4*).

2.2.2 Analisis Kerapatan Vegetasi

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) merupakan indeks vegetasi yang paling sering digunakan untuk pemantauan vegetasi. Algoritma yang diterapkan untuk mengukur kehijauan suatu wilayah menggunakan Persamaan berikut (Hanif, 2015).

$$NDVI = \frac{(Band\ NIR - Band\ Red)}{(Band\ NIR + Band\ Red)} \quad (3)$$

dimana *Band NIR* adalah reflektansi panjang gelombang *Near Infrared* (NIR) (*Band 8*), *Band Red* adalah reflektansi panjang gelombang merah (*Band 4*).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Area Bendungan

Bendungan Batutegi terletak di Desa Way Harong, Kecamatan Pulau Panggang, Kabupaten Tanggamus, sekitar 90 km sebelah barat daya dari kota Bandar Lampung. Bendungan ini terletak diantara 5°18'30" LS dan 104°36'30" BT, dibangun di Daerah Aliran Sungai (DAS) Way Sekampung bagian hulu, dengan ketinggian 122 meter dan panjang puncak hampir 701 meter. Bagian tengahnya berada pada elevasi +284,50 meter, sementara puncaknya selebar 12 meter.

3.2 Kondisi Iklim dan Curah Hujan

Iklim didefinisikan sebagai rata-rata dan variabilitas parameter meteorologis (suhu, presipitasi, penguapan, dan angin) dalam periode panjang (bulanan hingga skala geologis), sedangkan cuaca merujuk pada kondisi atmosfer jangka pendek. Keduanya memengaruhi limpasan secara signifikan, di mana hujan sebagai komponen utama cuaca berperan krusial dalam pembentukan aliran sungai. Parameter seperti intensitas hujan, suhu, kelembaban, radiasi matahari, tekanan atmosfer, kecepatan angin, dan evaporasi saling berinteraksi, menciptakan dinamika cuaca dan iklim yang fluktuatif (Amin, 2015).

DAS Way Sekampung Hulu memiliki iklim tropis dengan dua musim, yaitu hujan dan kemarau. Untuk analisis menggunakan model SWAT, data curah hujan sangat penting karena memengaruhi perhitungan debit, sedimentasi, dan erosi.

Tabel 2. Curah hujan rata-rata DAS Way Sekampung

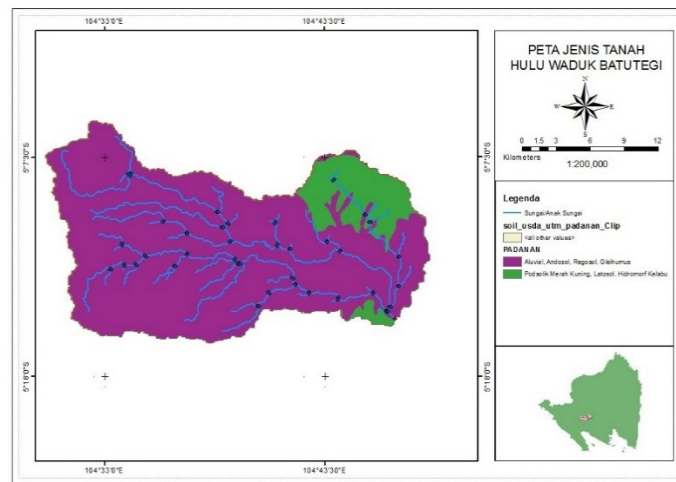
Tahun	Curah Hujan Rata-Rata Bulanan (mm)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
2015	409	210	120	125	175	65	54	27	10	20	50	160
2018	153	265	461	136	144	119	44	32	64	58	236	164
2021	265	350	341	191	96	15	29	43	81	121	170	199
2024	257	457	274	272	208	66	12	33	100	80	207	289
Rerata	271	320	299	181	156	66	35	34	64	70	166	203

Sumber: BMKG Radin Intan, 2025

Faktor penting penentu iklim bulanan pada suatu tempat adalah curah hujan. Adapun data curah hujan bulanan disajikan pada Tabel 2. Rata-rata hujan bulanan tertinggi terjadi pada bulan Februari mencapai 320 mm, sedangkan rata-rata curah hujan terendah terjadi pada bulan Agustus mencapai 34 mm. Berdasarkan data rata-rata curah hujan bulanan, secara umum wilayah DAS Way Sekampung menunjukkan kondisi relatif basah pada setiap bulannya. Namun demikian, terdapat beberapa bulan tertentu yang mengalami penurunan hujan secara signifikan, sehingga menunjukkan kondisi yang relatif lebih kering yaitu pada bulan Juni hingga Agustus.

3.3 Kondisi Jenis Tanah

Berdasarkan hasil interpretasi peta tanah eksplorasi Provinsi Lampung yang diklasifikasikan oleh Pusat Penelitian Tanah Bogor serta disesuaikan dengan sistem klasifikasi USDA, jenis tanah yang terdapat di wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) Way Sekampung meliputi andosol (Andisol), latosol (Inceptisol), aluvial (Entisol), dan podsolik (Ultisol) (*Soil Survey Staff*, 2014). Jenis tanah yang paling dominan di wilayah penelitian adalah latosol, yang mencakup area seluas 18.355 ha atau sekitar 51,14% dari total wilayah. Tanah podsolik mencakup 15.066,19 ha (42,27%), diikuti oleh tanah aluvial seluas 2.159,19 ha (6,04%), dan tanah andosol dengan luasan 484,17 ha (1,36%). Sebaran jenis tanah di daerah tangkapan Waduk Batutegi disajikan pada Gambar 4.



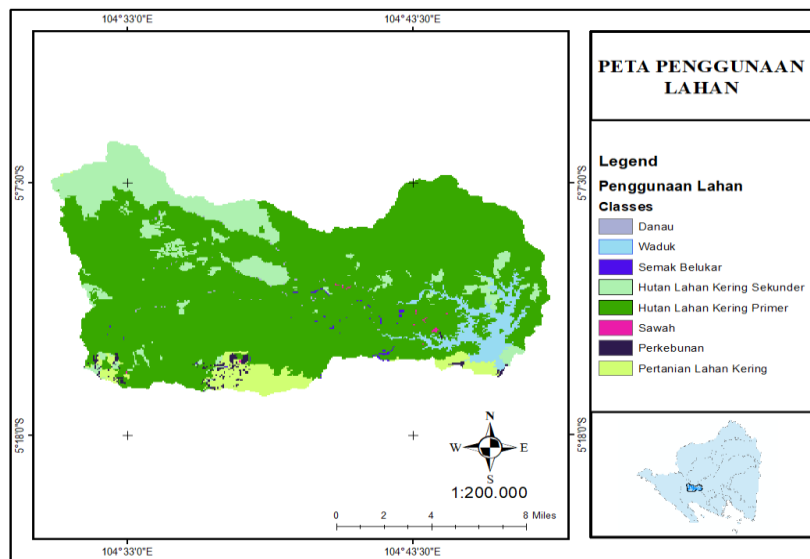
Gambar 4. Peta jenis tanah Hulu Waduk Batutegi

3.4 Kondisi Kemiringan Lahan

Daerah Aliran Sungai (DAS) Way Sekampung memiliki variasi tingkat kemiringan lahan yang cukup beragam, mulai dari 0% hingga lebih dari 25%. Lahan dengan kemiringan 0–3% (kelas I) mencakup area seluas 3.141,50 hektar (8,80%), sementara lahan dengan kemiringan 3–8% (kelas II) meliputi 13.920,02 hektar (39,01%). Kelas III (8–15%) mencakup 12.553,88 hektar (35,18%), diikuti oleh kelas IV (15–25%) seluas 5.540,44 hektar (15,53%). Adapun lahan dengan kemiringan lebih dari 25% mencakup area seluas 526,43 hektar atau sekitar 1,48% dari total wilayah.

3.5 Kondisi Penutupan Lahan

Penggunaan lahan di dalam daerah tangkapan Waduk Batutegi mencakup berbagai bentuk, antara lain kawasan danau, hutan, kebun, permukiman, semak belukar, badan air (sungai), lahan kosong, serta tegalan atau ladang (Gambar 5).

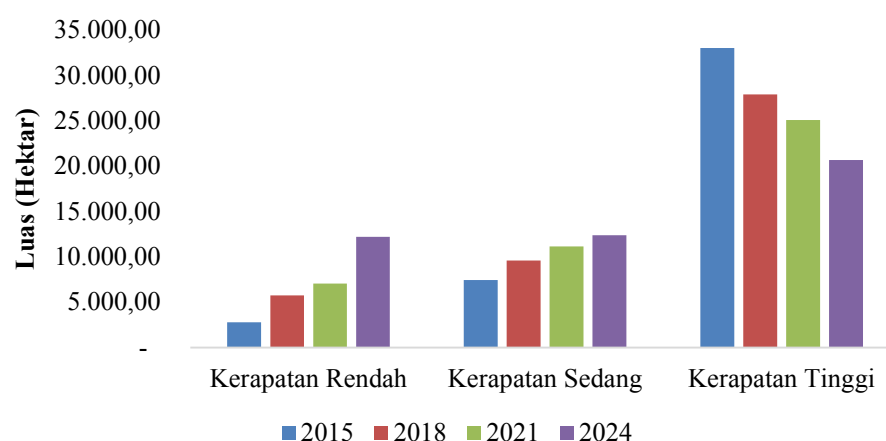


Gambar 5. Peta penggunaan lahan Hulu Waduk Batutegi

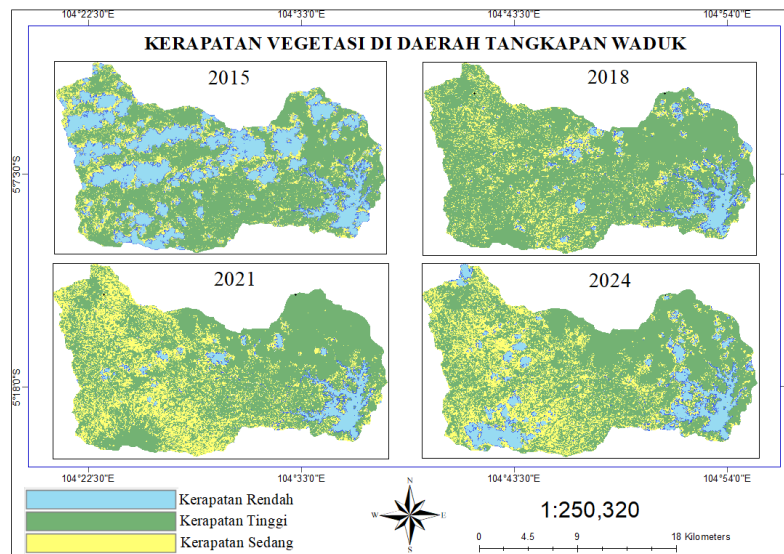
3.6 Tingkat Kerapatan Vegetasi (NDVI)

3.6.1 Tingkat Kerapatan Vegetasi di Hulu Waduk Batutegi

Gambar 6 menunjukkan perubahan luas lahan berdasarkan tingkat kerapatan vegetasi di wilayah DTA Batutegi selama kurun waktu tahun 2015 hingga 2024. Pada lahan dengan kerapatan vegetasi rendah menunjukkan kenaikan yang signifikan dari tahun 2015 ke 2024. Pada tahun 2015, luas kerapatan vegetasi rendah sebesar 2.778,65 Ha naik menjadi sebesar 12.207,13 Ha pada tahun 2024. Pada lahan dengan kerapatan vegetasi sedang menunjukkan pola naik secara stabil. Pada tahun 2015, luas kerapatan vegetasi sedang seluas 7.437,70 Ha, kemudian terus meningkat sampai sebesar 12.357,42 Ha pada tahun 2024. Hal ini dikarenakan kerapatan vegetasi tinggi yang menurun setiap tahunnya, dari luasnya yang sebesar 33.003,24 Ha pada tahun 2015, menjadi sebesar 20.655,04 Ha pada tahun 2024. Berdasarkan nilai luas kerapatan vegetasi ini dapat diketahui bahwa selama 10 tahun di DTA Waduk Batutegi terjadi peralihan lahan, yang sebelumnya hutan menjadi pemukiman dan perkebunan.



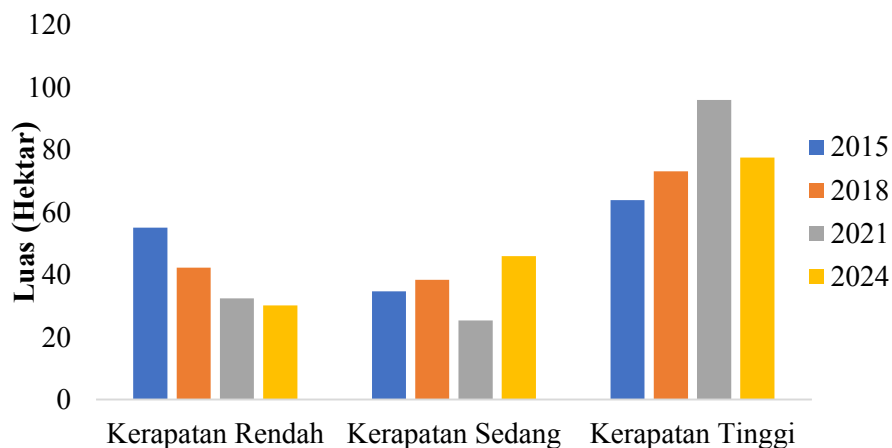
Gambar 6. Diagram luas kerapatan vegetasi Hulu Waduk Batutegi



Gambar 7. Perubahan kerapatan vegetasi di DTA Waduk Batutege

3.6.2 Tingkat Kerapatan Vegetasi di Pulau dan Sempadan Waduk Batutege

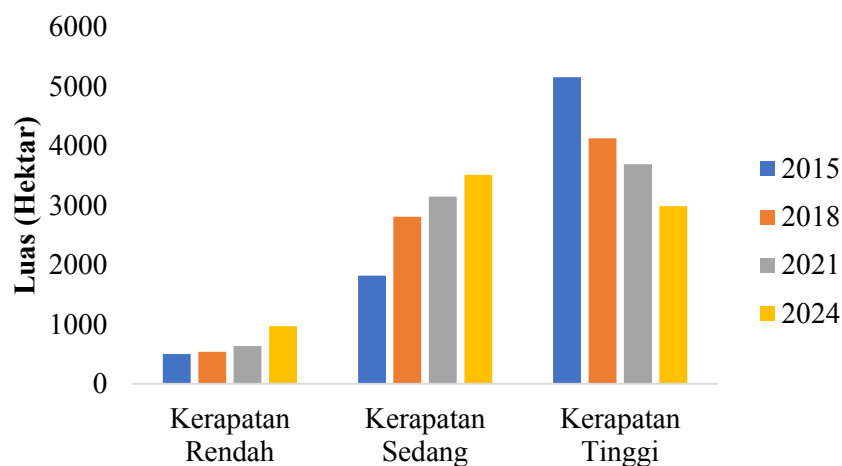
Terdapat pulau-pulau di dalam Waduk Batutege, yang mana pulau-pulau ini sebelumnya merupakan sebuah daratan yang memiliki ketinggian melebihi tinggi batas air maksimum +274 m.dpl, sehingga dengan adanya genangan air dalam waduk maka sebagian daratan yang berada pada level kontur kurang dari +274 m akan tenggelam dan yang lebih besar dari +274 m atas tetap terlihat sehingga menyerupai sebuah pulau.



Gambar 8. Luas Kerapatan Vegetasi di Pulau dalam Waduk Batutege

Pada tahun 2015, area dengan kerapatan vegetasi rendah tercatat seluas 55,07 Ha, dan turun menjadi seluas 30,19 Ha. Penurunan ini menunjukkan adanya pergeseran vegetasi dari kategori kerapatan rendah ke kategori yang lebih tinggi, yang dapat diartikan sebagai peningkatan kondisi vegetasi di wilayah tersebut. Luas vegetasi dengan kerapatan sedang juga mengalami fluktuasi. Pada 2015, luasannya sebesar 34,72 Ha, meningkat menjadi 46,01 Ha pada 2024. Kenaikan tajam di tahun 2024 mengindikasikan adanya proses rehabilitasi atau pertumbuhan vegetasi yang cukup pesat pada periode tersebut. Sementara itu, area dengan kerapatan vegetasi tinggi memperlihatkan tren peningkatan yang cukup jelas. Pada 2015, luasan kategori ini sebesar 63,94 Ha dan meningkat menjadi 77,53 Ha pada 2024.

Adapun sempadan waduk merupakan daratan yang mengelilingi dan berjarak tertentu dari tepi air waduk yang berfungsi sebagai kawasan pelindung waduk. Kawasan ini berfungsi untuk menjaga kelestarian dan keamanan waduk serta mencegah gangguan fungsi waduk akibat aktivitas di sekitarnya. Gambar 9, pada tahun 2015, area dengan kerapatan sedang tercatat sebesar 1.257,61 Ha, kemudian terus mengalami peningkatan sampai pada tahun 2024 menjadi 3.905,71 Ha. Sedangkan tingkat kerapatan tinggi pada tahun 2015 sebesar 5.156,09 Ha terus mengalami penurunan hingga tahun 2024 menjadi sebesar 3.388,47 Ha. Hal ini disebabkan oleh tingkat kerapatan sedang yang mengalami kenaikan setiap tahunnya, yang tadinya pada tahun 2015 seluas 1.817,62 Ha menjadi seluas 3.217,71 Ha pada tahun 2024. Perpindahan penggunaan lahan yang tadinya hutan kering primer dan sekunder menjadi pemukiman dan perkebunan menyebabkan perubahan pada masing-masing kelas tingkat kerapatan vegetasi di Sempadan Waduk Batutege. Kondisi ini dapat mempercepat proses sedimentasi di waduk.



Gambar 9. Luas Kerapatan Vegetasi di Sempadan Waduk Batutege

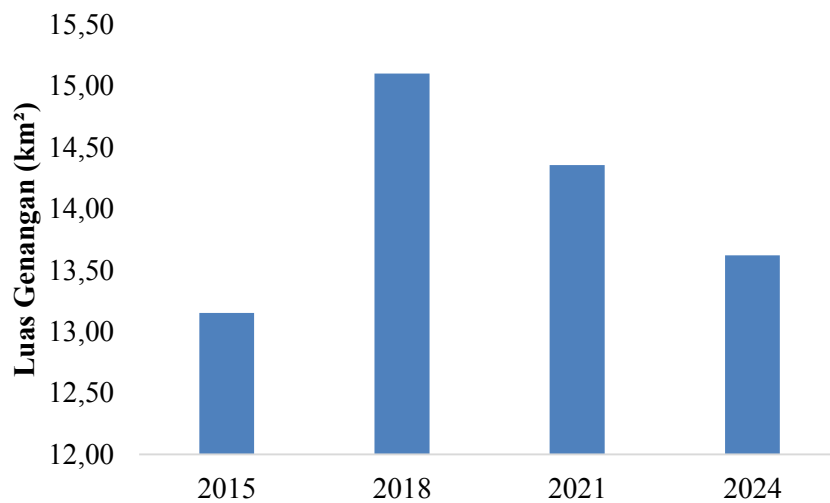
3.7 Luas Genangan Waduk (WRI)

Berdasarkan hasil analisis WRI yang ditampilkan pada Gambar 9, kenaikan luas genangan waduk tertinggi pada tahun 2018 yaitu mencapai 15,1 km². Kenaikan ini dikarenakan adanya peningkatan volume air waduk, yang disebabkan oleh faktor curah hujan tinggi, dimana pada tahun 2015 jumlah curah hujan tahunan sebesar 1.425 mm, naik menjadi sebesar 1,876 mm pada tahun 2018. Volume simpanan waduk dapat diduga dengan cara menggunakan kurva lengkung karakteristik Waduk Batutege atau menggunakan persamaan matematis sebagaimana disampaikan oleh Ridwan (2014), sehingga diperoleh dugaan Tinggi Muka Air (TMA) dan volume waduk sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

$$TMA = \frac{\{116 \times 10^6 + (LUAS \times 10^4)\}}{5 \times 10^5} \quad (4)$$

$$Vol = \frac{(TMA - 170)^{3,19}}{4,125 \times 10^3} + 4,6 \quad (5)$$

diman LUAS adalah luas genangan (Hektar), TMA adalah tinggi/elevasi muka air waduk (m dpl), dan Vol adalah volume simpanan waduk (satuan: Juta m³).



Gambar 10. Luas Genangan Waduk Batutege

Tabel 3. Perkiraan TMA dan volume waduk berdasarkan luas genangan (WRI)

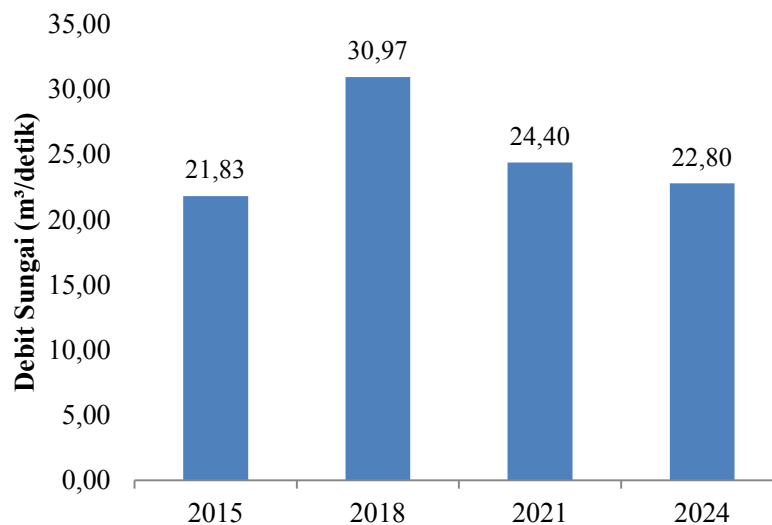
Tahun	Luas WRI		TMA (m)	Vol (Juta m ³)
	(Ha)	(Km ²)		
2015	1.315	13,15	258,30	395,62
2018	1.510	15,10	262,20	453,42
2021	1.436	14,36	260,72	430,83
2024	1.362	13,62	259,24	409,04

3.8 Debit Sungai

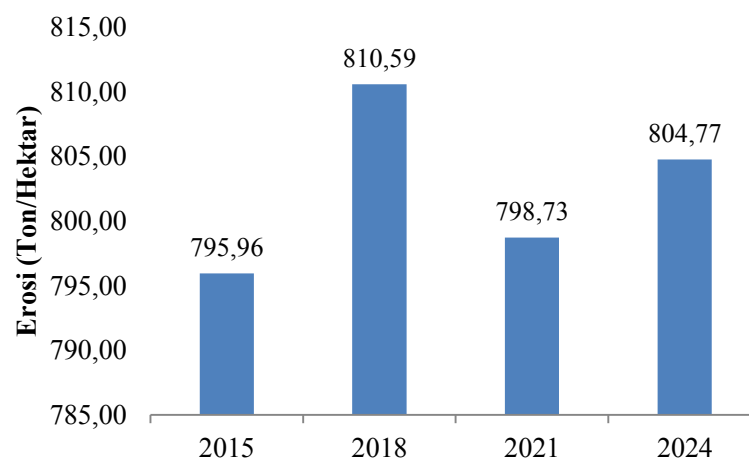
Debit sungai merupakan besaran atau ukuran volume air yang mengalir melalui suatu penampang sungai dalam satuan waktu tertentu (m³/detik). Gambar 11. menampilkan rata-rata debit sungai di hulu waduk Batutege pada empat tahun berbeda, yaitu tahun 2015, 2018, 2021, dan 2024. Angka ini meningkat tajam pada tahun 2018 menjadi 30,97 m³/detik dikarenakan curah hujan yang tinggi pada tahun 2018. Hasil penelitian sejalan dengan studi di DAS Ciliwung Hulu dengan model SWAT yang dilakukan oleh Zuma dkk. (2017), ditemukan bahwa terdapat korelasi positif yang kuat antara curah hujan dan debit sungai. Artinya, semakin tinggi curah hujan, semakin besar pula volume debit sungai. Berdasarkan hasil analisis debit sungai tersebut, debit sungai terbesar terjadi pada Sub DAS 64, yang dimana berdasarkan tutupan lahan merupakan hutan lahan kering primer, dengan kemiringan lahan sebesar 15-25%, dan jenis tanahnya aluvial, andosol, dan regosol.

3.9 Erosi

Proses erosi umumnya terjadi karena kombinasi antara kondisi topografi yang bergelombang hingga bergunung, intensitas curah hujan yang tinggi, serta perubahan tutupan lahan akibat aktivitas manusia, seperti pembukaan lahan untuk pertanian dan pemukiman. Besarnya rata-rata tingkat erosi pada ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 11. Rerata debit sungai di Hulu Waduk Batutegi



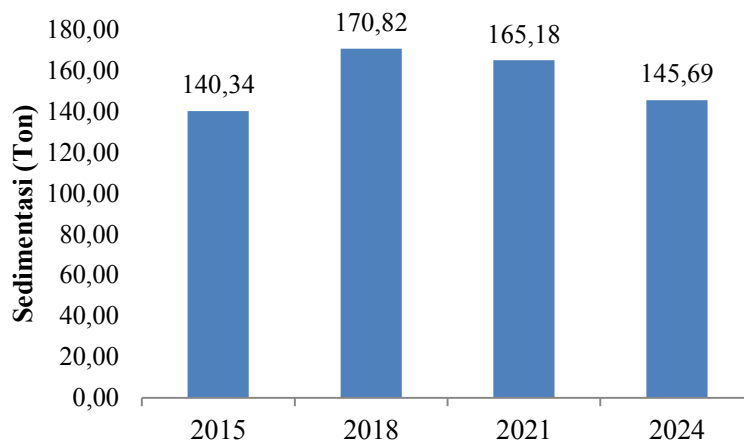
Gambar 12. Tingkat rerata erosi di Hulu Waduk Batutegi

Pada Gambar 12 terlihat nilai erosi tertinggi pada tahun 2018 sebesar 810,6 ton/hektar/tahun. Peningkatan ini terjadi karena peristiwa *la nina* pada tahun 2018 (Cahyono dkk., 2022) yang meningkatkan curah hujan total pada tahun 2018 naik sebesar 451 mm/tahun, yang sebelumnya pada tahun 2015 total curah hujan total pada tahun 2015 sebesar 1.425 mm/tahun menjadi sebesar 1.876 mm/tahun (Tabel 2). Studi oleh Jia dkk (2020), menegaskan adanya hubungan erat antara tingkat tutupan vegetasi dan pengendalian erosi. Berdasarkan hasil analisis erosi tersebut, erosi terbesar terjadi pada Sub DAS 36, yang dimana berdasarkan tutupan lahan merupakan hutan lahan kering primer, dengan kemiringan lahan sebesar 15-25%, dan jenis tanahnya aluvial, andosol, dan regosol.

3.10 Sedimentasi di Sungai

Sedimentasi merupakan hasil erosi tanah yang terbawa oleh aliran permukaan menuju badan sungai. Menurut Ganasri dan Ramesh (2016), sedimentasi yang tidak terkendali dapat menyebabkan pendangkalan sungai, meningkatkan risiko banjir, serta menurunkan umur operasional waduk akibat akumulasi endapan. Pada tahun 2015, rata-rata sedimen sebesar 140,34 ton/Ha, kemudian meningkat menjadi 170,82 ton/Ha di tahun 2018, sedikit menurun pada tahun 2021 menjadi 165,18 ton/Ha, Pada tahun 2024, rerata sedimentasi kembali menurun hingga

mencapai 145,69 ton/Ha. Salah satu penyebab utama tingginya laju sedimen adalah erosi tanah, yang dipicu oleh curah hujan tinggi, kemiringan lereng, serta penurunan tutupan vegetasi. Rerata sedimentasi sungai di hulu Waduk Batutegi bisa dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Rerata sedimentasi sungai di Hulu Waduk Batutegi

Berdasarkan hasil analisis sedimentasi tersebut, sedimentasi terbesar terjadi pada Sub DAS 14, yang dimana berdasarkan tutupan lahan merupakan hutan lahan kering primer, dengan kemiringan lahan sebesar $>25\%$, dan jenis tanahnya aluvial, andosol, dan regosol.

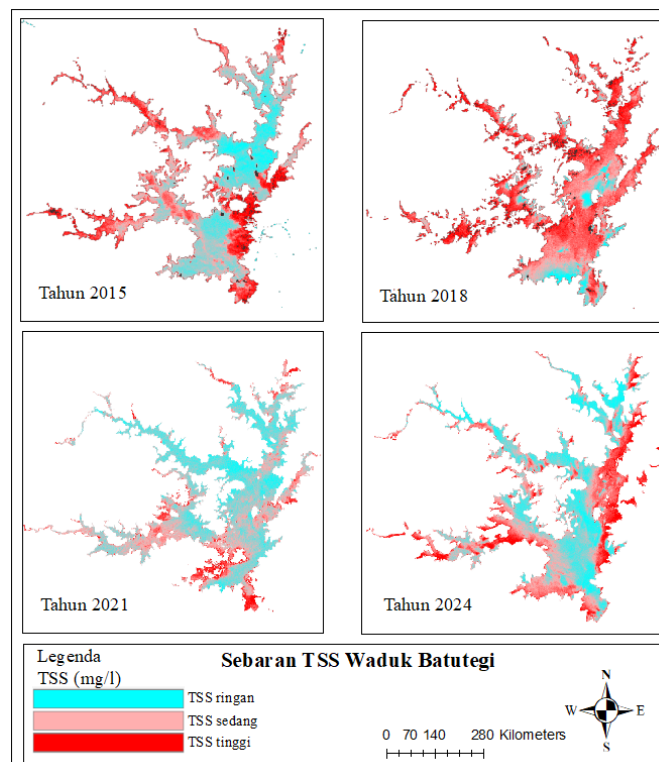
3.11 Kadar TSS dan Prediksi Sedimentasi Waduk Batutegi

3.11.1 TSS dalam Waduk Batutegi

Pada tahun 2015, distribusi TSS didominasi oleh kategori TSS ringan. Namun, kondisi mulai berubah signifikan pada tahun 2018, di mana area dengan TSS sedang hingga tinggi mulai meluas secara mencolok terutama di bagian tengah dan timur laut waduk. Hal ini disebabkan oleh pengaruh fenomena *la nina* pada tahun 2018 (Cahyono dkk., 2022). Sehingga curah hujan, erosi, dan sedimentasi di tahun 2018 tinggi dibanding tahun lainnya. Selengkapnya hasil analisis kadar TSS berdasarkan interpretasi citra disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kadar TSS dalam Waduk Batutegi hasil interpretasi citra

Klasifikasi	TSS dalam Waduk Batutegi (mg/l)			
	2015	2018	2021	2024
Ringan	0,89 - 12,15	9,11 - 12,81	10,03 - 12,45	11,06 - 12,32
Sedang	12,16 - 12,81	12,82 - 13,75	12,46 - 13,03	12,33 - 12,79
Tinggi	12,82 - 13,47	13,76 - 14,51	13,04 - 13,62	12,80 - 13,25



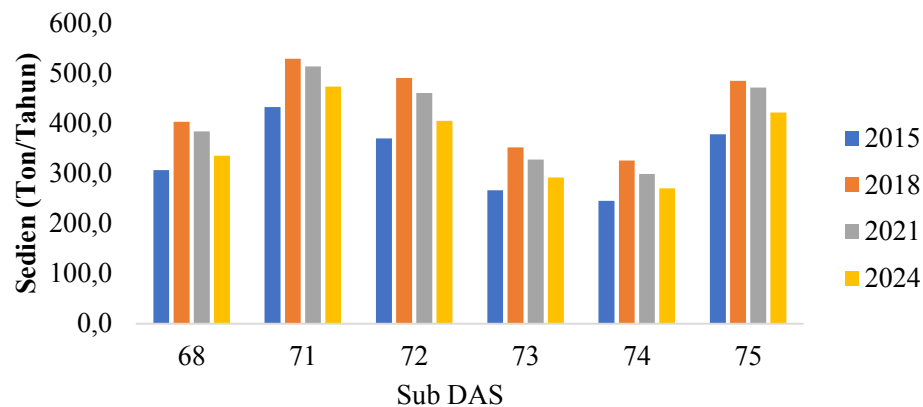
Gambar 14. Sebaran TSS dalam genangan Waduk Batutegi

3.11.2 Sedimentasi dalam Waduk Batutegi

Sumber sedimentasi Waduk Batutegi berdasarkan hasil simulasi model SWAT diketahui merupakan akumulasi sedimentasi dari Sub DAS 68, 71, 72, 73, 74, dan 75. Besaran sedimentasi pada Waduk Batutegi dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 15.

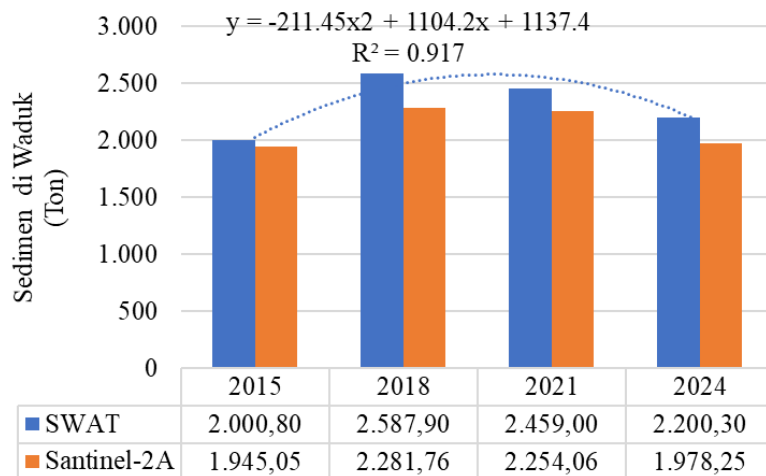
Tabel 5. Besaran Sedimen di dalam Waduk Batutegi Hasil Simulasi SWAT

Sedimen dalam Waduk Batutegi (Ton)				
Sumber (Sub DAS)	2015	2018	2021	2024
68	307,2	403,3	384,5	336,0
71	432,8	529,3	514,0	473,8
72	370,1	491,4	460,9	405,4
73	266,7	352,5	328,0	292,5
74	245,2	326,3	299,5	270,7
75	378,8	485,1	472,1	421,9
Total	2.000,80	2.587,90	2.459,00	2,200,30



Gambar 15. Grafik Besaran Sedimen di dalam Waduk Batutege

Hasil analisa kadar TSS berdasarkan interpretasi citra sebagaimana disajikan pada Tabel 4, jika dikaitkan dengan volume Waduk Batutege berdasarkan hasil analisis dan interpretasi citra sebagaimana disajikan pada Tabel 5, maka dapat diduga besarnya sedimentasi yang terjadi dalam Waduk Batutege pada tahun 2015 rata-rata sebanyak 1.945,05 ton, pada tahun 2018 sebanyak 2.281,76 ton, tahun 2021 sebanyak 2.254,06 ton, dan tahun 2024 sebanyak 1.978,25 ton. Jika dibandingkan terhadap nilai sidementasi hasil simulasi model SWAT nampak bahwa nilai dugaan sedimentasi berdasarkan interpretasi citra cenderung lebih kecil daripada hasil simulasi model SWAT, namun keduanya menunjukkan pola perubahan yang sama dengan nilai koefisien corelasi (r) sebesar 0,96 dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,917 sebagaimana disajikan pada Gambar 16.



Gambar 16. Perbandingan hasil pendugaan sedimentasi Waduk Batutege

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Citra Sentinel-2A dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi kerapatan vegetasi dengan metode NDVI, luas genangan waduk dengan metode WRI, serta kadar TSS dalam Waduk Batutege dengan hasil yang cukup memuaskan. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penurunan kerapatan tinggi telah mencapai 37,41% sejalan dengan peningkatan kerapatan sedang dan rendah masing-masing sebesar 66,16 dan 339,32% dari kondisi tahun 2015 – 2024. Nilai dugaan TSS yang masuk ke dalam Waduk Batutege dapat dikelasifikasikan ke dalam tiga kelas, yaitu TSS rendah, sedang, dan tinggi, dengan nilai TSS tertinggi terjadi di tahun 2018 mencapai 13,76 - 14,51 mg/l. Besarnya beban sedimentasi yang masuk ke dalam Waduk Batutege berdasarkan hasil simulasi model SWAT diketahui merupakan akumulasi sedimen dari Sub DAS

68, 71, 72, 73, 74, dan 75, dengan nilai sedimentasi tertinggi pada tahun 2018 mencapai 170,82 ton/tahun.

4.2 Saran

Untuk memperoleh hasil analisis citra Sentinel 2A dalam memperkirakan tingkat kerapatan vegetasi (NDVI) dan mendeteksi genangan air (WRI) lebih optimal, disarankan untuk terlebih dahulu melakukan proses koreksi dengan menghilangkan area yang tertutup awan dan untuk meningkatkan validitas hasil analisis, sebaiknya dilakukan verifikasi dengan data observasi lapangan, baik untuk nilai NDVI, WRI, maupun pengukuran sedimentasi aktual.

Daftar Pustaka

- Amin, M. 2015. Simulasi Tata Guna Lahan untuk Pengelolaan DAS Garang Jawa Tengah. (Disertasi). Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada.
- Cahyono, B. E., MAS'UDI, A., Dhani, A. K. M., & Mutmainnah, M. 2022. Analisis Perubahan Sedimentasi Total Suspended Solids (TSS) Menggunakan Citra Satelit Sentinel-2A (Studi Kasus: Waduk Wonorejo, Kabupaten Tulungagung).
- Carson, B. 1989. Soil conservation for upland of areas Indonesia. East-West Environment and Policy Institute. Occasional Paper No. 9.
- D. F. Cabezas-Alzate, Y. A. Garcés-Gomez, And V. Henao-Cespedes. 2021. "Landsat-7 Etm+ Based Remote Sensing As A Tool For Assessing Lakes Water Quality Characteristics," *Journal of Southwest Jiaotong University*, Vol. 56, No. 1.
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. 2016. *Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS – A case study of Nethravathi Basin*. Geoscience Frontiers, 7(6), 953–961.
- Hanif, Muhammad. 2015. *Bahan Pelatihan Penginderaan Jauh Tingkat Lanjut*. Padang: Universitas Negeri Padang.
- Heryani, N., N. Sutrisno, Sudrajat, K. Sudarman, dan Sawiyo. 2003. Prediksi Sedimen Sungai dan Aliran Permukaan untuk Menurunkan Laju Sedimentasi Waduk Batuteji Tanggamus. Laporan Hasil Penelitian. Kerjasama Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi dengan Pemerintah Daerah Kabupaten Tanggamus.
- Heryani, Nani, and Nono Sutrisno. 2012. "Perencanaan Penggunaan Lahan Di Daerah Tangkapan Air (DTA) Waduk Batuteji Untuk Mengurangi Sedimentasi." *Jurnal Sumberdaya Lahan*, vol. 6, no. 1.
- Jia, K., Liang, S., Wei, X., Yao, Y., & Su, Y. 2020. Relationship between vegetation coverage and soil erosion in mountainous areas. *Catena*, 195, 104837.
- Ridwan. 2014. Integrasi Pola Operasi Bendungan dan Bendung Berbeda Basis Waktu untuk Kebutuhan Irigasi. *Disertasi*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Setiawan, A. H., Anwar, N., & Margini, N. F. 2017. Optimasi Pola Tanam Menggunakan Program Linier (Waduk Batu Tegi, Das Way Sekampung, Lampung). *Jurnal Hidroteknik*, 2(1), 1-6.
- Shen, L., & Li, C. 2010. Water body extraction from Landsat ETM+ imagery using adaboost algorithm. In *2010 18th International Conference on Geoinformatics* (pp. 1-4). IEEE.
- Zuma, D. S., Murti Laksono, K., & Suharnoto, Y. 2017. Analisis curah hujan dan debit model SWAT dengan metode moving average di DAS Ciliwung hulu. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 7(2), 98-106.