

**ANALISIS PERUBAHAN TINGKAT KERAPATAN VEGETASI
TERHADAP SEDIMENTASI WADUK BATUTEGI**

(Skripsi)

Oleh

**ZULFA HARDA CHAIRUNNISA
2114071005**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRACT

ANALYSIS OF CHANGES IN VEGETATION DENSITY LEVELS ON SEDIMENTATION IN BATUTEGI RESERVOIR

BY:

ZULFA HARDA CHAIRUNNISA

Batutegi Reservoir is a vital water infrastructure located in Lampung Province, Indonesia, serving as a primary source for irrigation, hydropower generation, raw water supply, and flood control for the surrounding areas. However, changes in the vegetation density within its catchment area can affect erosion and sedimentation rates, impacting the reservoir's storage capacity and operational lifespan. This study aims to analyze changes in vegetation density using Sentinel-2A imagery and assess their impact on sedimentation and Total Suspended Solids (TSS) levels in the reservoir from 2015 to 2024. The methodology involved NDVI and WRI image analysis using SNAP and ArcMap software, along with SWAT modeling to simulate erosion and sediment yield. The results indicate a 37.41% decrease in high-density vegetation and a significant 339.32% increase in low-density vegetation over the ten-year period. The highest TSS concentration occurred in 2018, reaching 14.51 mg/l, coinciding with high rainfall due to the La Niña phenomenon. SWAT simulation showed the highest sediment load in 2018 at 2,587.90 tons/year, primarily originating from sub-watersheds 71 and 75. A strong correlation was found between vegetation density and sedimentation, with a coefficient of determination R^2 of 0.917. These findings highlight that declining vegetation density substantially accelerates sedimentation in the reservoir. Land conservation efforts, particularly reforestation in the buffer zones and islands within the reservoir, are essential strategies to preserve the reservoir's functional lifespan and storage capacity.

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

ABSTRAK

ANALISIS PERUBAHAN TINGKAT KERAPATAN VEGETASI TERHADAP SEDIMENTASI WADUK BATUTEGI

Oleh:

ZULFA HARDA CHAIRUNNISA

Waduk Batutege merupakan salah satu infrastruktur vital di Provinsi Lampung yang berfungsi sebagai sumber air irigasi, pembangkit listrik tenaga air, air baku, dan pengendalian banjir bagi daerah sekitarnya. Namun, perubahan tingkat kerapatan vegetasi di daerah tangkapan air dapat mempengaruhi laju erosi dan sedimentasi di dalam waduk, yang berdampak pada berkurangnya kapasitas tampung dan usia guna Waduk Batutege. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan kerapatan vegetasi menggunakan citra Sentinel-2A serta mengkaji dampaknya terhadap sedimentasi dan kadar Total Suspended Solid (TSS) di Waduk Batutege selama periode 2015-2024. Metode yang digunakan meliputi analisis citra NDVI dan WRI dengan pengolahan citra satelit menggunakan perangkat lunak SNAP dan ArcMap, serta simulasi model SWAT untuk memprediksi erosi dan sedimentasi. Hasil penelitian menunjukkan penurunan area vegetasi berkepadatan tinggi sebesar 37,41% dan peningkatan vegetasi berkepadatan rendah hingga 339,32% selama periode pengamatan. Kadar TSS tertinggi tercatat pada tahun 2018 sebesar 14,51 mg/l, sejalan dengan curah hujan tinggi akibat fenomena La Niña. Simulasi SWAT mengindikasikan peningkatan beban sedimentasi tertinggi pada tahun yang sama, yakni mencapai 2.587,90 ton/tahun, dengan kontribusi terbesar berasal dari Sub-DAS 71 dan 75. Korelasi hasil nilai sedimentasi antara SWAT dan Sentinel-2A menunjukkan nilai determinasi R^2 sebesar 0,917. Penelitian ini menegaskan bahwa penurunan kerapatan vegetasi secara signifikan memperparah sedimentasi waduk. Pemantauan berkala terhadap perubahan kerapatan vegetasi dan kualitas air waduk, khususnya nilai TSS, menjadi strategi penting untuk menjaga umur guna dan kapasitas Waduk Batutege.

Kata kunci: NDVI, TSS, SWAT, sedimentasi, vegetasi, Waduk Batutege.

**ANALISIS PERUBAHAN TINGKAT KERAPATAN VEGETASI
TERHADAP SEDIMENTASI WADUK BATUTEGI**

Oleh

Zulfa Harda Chairunnisa

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Lampung



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : ANALISIS TINGKAT KERAPATAN VEGETASI
TERHADAP SEDIMENTASI WADUK BATUTEGI

Nama Mahasiswa : **Zulfa Harda Chairunnisa**

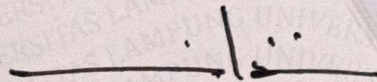
Nomor Pokok Mahasiswa : 2114071005

Jurusan : Teknik Pertanian

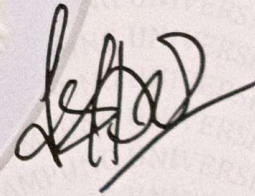
Fakultas : Pertanian

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

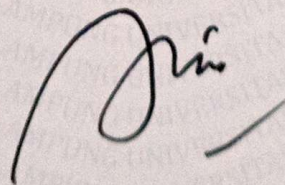


Dr. Ir. Ridwan, M.S.
NIP. 196511141995031001



Elhamida Rezkia Amien, S.T.P., M.Si.
NIP. 231804900214201

2. Ketua Jurusan Teknik Pertanian

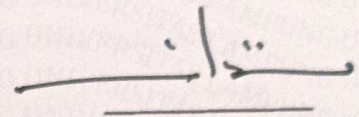


Dr. Ir. Warji, S.T.P., M.Si., IPM.
NIP. 197801022003121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

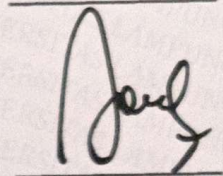
Ketua : **Dr. Ir. Ridwan, M.S.**



Sekretaris : **Elhamida Rezkia Amien, S.T.P., M.Si.**



Penguji : **Dr. Ir. Sandi Asmara, M.Si.**



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. H. Futas Hidayat, M.P.

NIP. 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 30 Juni 2025

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya adalah **Zulfa Harda Chairunnisa** NPM 2114071005. Dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam karya ilmiah ini adalah hasil karya saya yang dibimbing oleh Komisi Pembimbing, 1) **Dr. Ir. Ridwan, M.S.** dan 2) **Elhamida Rezkia Amien, S.T.P., M.Si.** berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah saya dapatkan. Karya ilmiah ini berisi material yang dibuat sendiri dan hasil rujukan beberapa sumber lain (buku, jurnal, dll) yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil dari plagiat karya orang lain.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, 17 Juli 2025.
Yang membuat pernyataan



Zulfa Harda Chairunnisa
NPM. 2114071005

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung pada tanggal 08 Juli 2003, anak kedua dari tiga bersaudara, dari Bapak Tri Budi Santoso dan Ibu Widyastuti. Penulis memulai Pendidikan dari Pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) di TK Dwi Warna Panjang, Sekolah Dasar (SD) di SD Dwi Warna Panjang, Sekolah Menengah Pertama

(SMP) di MTsN 1 Bandar Lampung, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di MAN 2 Bandar Lampung. Pada tahun 2021 penulis diterima sebagai mahasiswa di Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah mewakili Jurusan Teknik Pertanian di ajang PILMAPRES (Pemilihan Mahasiswa Berprestasi) tingkat fakultas pada tahun 2024. Penulis juga pernah menjadi Asisten Dosen dalam mata kuliah Fisika Dasar pada tahun 2024.

Penulis melaksanakan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Periode 1 pada tahun 2024 selama 40 hari terhitung pada bulan Januari sampai Februari tahun 2024 di Desa Bangun Rejo, Kecamatan Meraksa Aji, Kabupaten Tulang Bawang. Penulis melaksanakan Praktik Umum (PU) selama 30 hari kerja terhitung pada bulan Juni sampai Agustus tahun 2024 di CV. Casa Farm, Kecamatan Lembang, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat dengan judul kegiatan yaitu **“Teknik Budidaya Tanaman Stroberi (*Fragaria* sp.) Varietas Mencir Dengan Sistem Irigasi Tetes di Casa Farm Kecamatan Lembang”**

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, saya persembahkan karya ini kepada:

Bapak Tri Budi Santoso dan Ibu Widyastuti

Kedua orang tua tercinta, yang penuh dengan kesabaran dan kasih sayang. Terima kasih atas semangat, dukungan, dan doa tiada henti yang selalu mengiringi setiap langkah perjalanan hidup dan studi saya. Tanpa doa dan restu kalian, pencapaian ini tidak mungkin terwujud.

Terima kasih atas semua perjuangan dalam membesarkan dan mendidik hingga sejauh ini.

Terima kasih atas segalanya.

Muhammad Fauzan Widiyanto

Adikku, yang senantiasa membantu dan memberikan dukungan kepada saya.

SANWACANA

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Analisis Tingkat Kerapatan Vegetasi Terhadap Sedimentasi Waduk Batutegi”** ini dengan baik dan tepat waktu.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Universitas Lampung. Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, serta dukungan baik moral maupun material. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan ucapan terima kasih, penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Warji, S.TP., M.Si., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Ridwan, M.S., selaku Dosen Pembimbing Akademik dan Pembimbing Utama dalam kegiatan penelitian dan penulisan skripsi, yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berarti bagi penulis sehingga skripsi dan perjalanan studi di kampus hijau ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu.
4. Ibu Elhamida Rezkia Amien, S.T.P., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Kedua, yang dengan sabar memberikan arahan, saran, dan motivasi yang sangat membantu dalam penyusunan skripsi ini.

5. Bapak Dr. Ir. Sandi Asmara, M.Si., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan saran, kritik, dan motivasi sebagai perbaikan selama penyusunan skripsi ini.
6. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan di Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan pengalaman bagi penulis selama menempuh studi.
7. Kepala Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Mesuji-Sekampung beserta staf yang telah membantu penulis dalam dukungan data untuk penelitian yang dilakukan.
8. Kepala Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Pesawaran beserta staf yang telah membantu penulis dalam dukungan data untuk penelitian yang dilakukan.
9. Bapakku Tri Budi Santoso dan Ibuku Widyastuti, yang selalu memberikan kasih sayang, semangat, dukungan moral maupun materi, dan doa yang tiada henti sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
10. Adikku Muhammad Fauzan Widiyanto yang telah selalu membantu dan memberikan semangat.
11. Sahabat-sahabatku sejak di bangku Sekolah Menengah Atas Syifa, Qonita, Adinda, Isty, Almira, Martha, Hanifah, Lintang, dan Nada yang selalu memberi tawa, semangat, bantuan, dan dukungan dalam setiap langkah hidup penulis.
12. Sahabat-sahabatku sejak awal perkuliahan Aisyah, Churia, Raissa, Indah, Tias, dan Rechia yang mewarnai masa perkuliahan, memberikan semangat, serta bantuan kepada penulis sejak awal perkuliahan hingga selesainya skripsi ini.
13. Rekan mahasiswa Teknik Pertanian Angkatan 2021 yang telah membantu penulis selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
14. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian hingga terselesaikannya penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang membacanya, serta dapat menjadi kontribusi kecil dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan.

Bandar Lampung, 17 Juli 2025

Penulis,

Zulfa Harda Chairunnisa

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Waduk dan Bendungan Batutegi	5
2.1.1 Waduk Batutegi.....	5
2.1.2 Bendungan Batutegi.....	5
2.2 Erosi dan Sedimentasi	8
2.2.1 Erosi.....	8
2.2.2 Sedimentasi.....	12
2.3 <i>Total Suspended Solid (TSS)</i>	15
2.4 Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis (<i>Geographic Information System</i>).....	16
2.4.1 Penginderaan Jauh	16
2.4.2 Sistem Informasi Geografis (<i>Geographic Information System</i>)	24
2.4.3 Sub Sistem SIG.....	25

2.4 Citra Sentinel 2.....	27
2.6 Model SWAT (<i>Soil Water Assesment Tools</i>).....	28
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Waktu dan Tempat	31
3.2 Alat dan Bahan	31
3.3 Prosedur Penelitian.....	32
3.3.1 Tahap Pengolahan Data.....	33
3.3.2 Analisis dan Interpretasi Data	38
3.3.2.1 Analisis WRI dan TSS.....	38
3.3.2.2 Analisis Kerapatan Vegetasi	40
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1 Karakteristik Area Bendungan	42
4.1.1 Letak Geografis dan Luas Area	42
4.1.2 Bentuk Daerah Aliran Sungai (DAS).....	42
4.2 Kondisi Iklim.....	43
4.3 Karakteristik Jenis Tanah	46
4.4 Kondisi Kemiringan Lahan	49
4.5 Kondisi Penutupan Lahan	49
4.6 Tingkat Kerapatan Vegetasi (NDVI)	50
4.6.1 Tingkat Kerapatan Vegetasi di Hulu Waduk Batutegi	50
4.6.2 Tingkat Kerapatan Vegetasi di Pulau dan Sempadan Waduk Batutegi	54
4.7 Luas Genangan Waduk.....	57
4.8 Debit Sungai	59
4.9 Erosi.....	62
4.10 Sedimentasi di Sungai	65
4.11 Kadar TSS dan Prediksi Sedimentasi Waduk Batutegi	69

4.11.1 TSS dalam Waduk Batutegi	69
4.11.2 Sedimentasi dalam Waduk Batutegi.....	72
V. KESIMPULAN	76
5.1 Kesimpulan.....	76
5.2 Saran.....	76
DAFTAR PUSTAKA.....	76
LAMPIRAN.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jenis Tanah dan Nilai Erodibilitas Tanah (K).....	10
Tabel 2. Nilai Faktor Kemiringan Lereng (LS).....	11
Tabel 3. Nilai Faktor Tutupan dan Konservasi Lahan.....	11
Tabel 4. Jenis Sedimen Berdasarkan Ukuran Partikelnya.....	14
Tabel 5. Karakteristik band citra sentinel.....	28
Tabel 6. Jenis dan Sumber Data Penelitian	32
Tabel 7. Klasifikasi Nilai Kebasahan WRI	39
Tabel 8. Klasifikasi nilai kerapatan vegetasi	41
Tabel 9. Suhu Rata-Rata Bulanan DAS Way Sekampung	44
Tabel 10. Kelembaban udara rata-rata DAS Way Sekampung	45
Tabel 11. Curah hujan rata-rata DAS Way Sekampung	46
Tabel 12. Bentuk Penggunaan Lahan Hulu Waduk Batutegi	50
Tabel 13. Tabel Tingkat Kerapatan Vegetasi di Hulu Waduk Batutegi	51
Tabel 14. Tingkat Kerapatan Vegetasi di Sempadan Waduk Batutegi	56
Tabel 15. Tingkat Perubahan Luas Genangan Waduk Batutegi	58
Tabel 16. Perkiraan TMA dan Volume Waduk berdasarkan Luas Genangan (WRI)	59
Tabel 17. Kadar TSS dalam Waduk Batutegi hasil Interpretasi Citra	72
Tabel 18. Besaran Sedimen di dalam Waduk Batutegi Hasil Simulasi SWAT.....	72

Lampiran

Tabel 19. Data Suhu Udara, Kelembaban Udara, dan Curah Hujan Rata-Rata dari BMKG Pesawaran	84
Tabel 20. Debit Sungai Sub DAS Way Sekampung.....	86
Tabel 21. Nilai Erosi Sub DAS Way Sekampung	88
Tabel 22. Nilai Sedimen di Sub DAS Way Sekampung.....	90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Karakteristik Penampang Zona Tampungan Bendungan Batutege (Sumber: Ditjen SDA).....	6
Gambar 2. Lengkung Karakteristik Waduk Batutege	7
Gambar 3. Lokasi Waduk dan Bendungan Batutege	7
Gambar 4. Proses terjadinya sedimentasi.....	13
Gambar 5. Pola Respon Spectral Obyek	20
Gambar 6. Proses perekaman permukaan bumi oleh satelit penginderaan jauh ..	21
Gambar 7. Karakteristik data citra	22
Gambar 8. Diagram <i>Pre-processing</i> citra.....	23
Gambar 9. Diagram klasifikasi citra.....	23
Gambar 10. Konsep sistem informasi geografis (SIG)	25
Gambar 11. Sub-sistem SIG.....	26
Gambar 12. Satelit Sentinel 2.....	27
Gambar 13. Lokasi objek penelitian	31
Gambar 14. Diagram alir prosedur penelitian	33
Gambar 15. Diagram alir running SWAT dan kalibrasi model.....	37
Gambar 16. Diagram alir analisis sedimentasi waduk Batutege	38
Gambar 17. Diagram alir analisis WRI dan TSS	40
Gambar 18. Peta sub DAS hulu waduk Batutege	43
Gambar 19. Peta jenis tanah hulu waduk Batutege.....	48
Gambar 20. Tingkat kemiringan lahan hulu waduk Batutege.....	49
Gambar 21. Peta penggunaan lahan hulu waduk Batutege.....	50
Gambar 22. Diagram luas kerapatan vegetasi hulu waduk Batutege	51
Gambar 23. Tingkat kerapatan vegetasi tahun 2015	52
Gambar 24. Tingkat kerapatan vegetasi tahun 2018.....	53

Gambar 25. Tingkat Kerapatan Vegetasi Tahun 2021	53
Gambar 26. Tingkat Kerapatan Vegetasi Tahun 2024.....	54
Gambar 27. Luas Kerapatan Vegetasi di Pulau dalam Waduk Batutegi	55
Gambar 28. Luas Kerapatan Vegetasi di Sempadan Waduk Batutegi.....	57
Gambar 29. Diagram Luas Genangan Waduk Batutegi	58
Gambar 30. Rerata Debit Sungai di Hulu Waduk Batutegi.....	60
Gambar 31. Debit Sungai di Hulu Waduk Batutegi	61
Gambar 32. Tingkat Rerata Erosi di Hulu Waduk Batutegi	63
Gambar 33. Tingkat Rerata Erosi dari tiap Sub DAS di Hulu Waduk Batutegi ...	64
Gambar 34. Rerata Sedimentasi Sungai di Hulu Waduk Batutegi.....	66
Gambar 35. Tingkat Sedimentasi di Sungai bagian Hulu Waduk Batutegi	67
Gambar 36. Sebaran TSS dalam Genangan Waduk Batutegi	70
Gambar 37. Grafik Besaran Sedimentasi di dalam Waduk Batutegi	73
Gambar 38. Perbandingan hasil pendugaan sedimentasi Waduk Batutegi	73
Gambar 39. Kerapatan Vegetasi dan Sebaran TSS Tinggi Waduk Batutegi Tahun 2024 dan 2021	74
Gambar 40. Kerapatan Vegetasi dan Sebaran TSS Tinggi Waduk Batutegi Tahun 2018 dan 2015	75

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Waduk Batuteги, yang terletak di Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung Indonesia, merupakan salah satu sumber daya penting dalam mendukung kegiatan pertanian, pembangkit listrik, pariwisata dan pengendalian banjir di kawasan sekitarnya. Menurut Setiawan dkk. (2017), kapasitas tampungan air Waduk Batuteги 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 rendah seluas 46.573 Ha dan musim tanam gadu seluas 41.980 Ha (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 x 14 MW dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Batuteги. 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 terganggu akibat kondisi lingkungan di Daerah Tangkapan Air (DTA) Waduk Batuteги 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 tersebut, 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.

Berdasarkan uraian di atas, hasil penelitian ini nantinya diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna dalam pengelolaan waduk dan kawasan sekitarnya, untuk mengurangi dampak negatif dari sedimentasi dan menjaga keberlanjutan fungsi waduk sebagai sumber daya yang vital. 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.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Seberapa besar pengaruh perubahan tingkat kerapatan vegetasi terhadap laju sedimentasi di Waduk Batutegi?
2. Seberapa luas kebutuhan penutupan lahan vegetasi untuk menjaga fungsi Waduk Batutegi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan data tingkat perubahan kerapatan vegetasi di Daerah Tangkapan Air (DTA) Waduk Batutegi.
2. Mendapatkan nilai dugaan *Total Suspended Solid* (TSS) yang masuk ke dalam Waduk Batutegi.
3. Mendapatkan data besarnya beban sedimentasi yang masuk ke dalam Waduk Batutegi.

1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Luas Daerah Tangkapan Waduk diperoleh berdasarkan proses deliniasi batas hidrologi (*watershed boundaries*) pada aplikasi ArcSWAT.
2. Tingkat kerapatan vegetasi dan kadar TSS diperoleh melalui analisis citra sentinel yang tersedia pada tahun 2015 - 2024.
3. Debit *inflow* Waduk Batutegi diperoleh berdasarkan hasil inventarisasi data sekunder dan pendugaan debit menggunakan model SWAT.
4. Umur guna Waduk Batutegi berdasarkan ketinggian muka air minimum (*dead storage*).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Waduk dan Bendungan Batutegi

2.1.1 Waduk Batutegi

Waduk merupakan sebuah badan air yang terbentuk karena pembendungan aliran air sungai oleh manusia, memiliki karakteristik fisika, kimia, dan biologinya yang berbeda dengan sungai. Selain itu, waduk memiliki bentuk yang tidak beraturan, banyak teluk, dan struktur lainnya. Waduk merupakan perairan yang relatif tenggelam, dengan aliran air yang tidak deras. Ada daerah air masuk (*inlet*) dan air keluar (*outlet*), serta daerah yang dalam dan dangkal. Meski aliran air tidak deras, sering kali terjadi gelombang akibat angin kencang. Pengaturan air menggunakan pintu air di outlet, jika diperlukan untuk pengairan pertanian maka pintu air dibuka, dan jika untuk menyimpan air maka pintu air ditutup. Sehingga waduk memiliki fluktuasi air yang besar, dan kandungan lumpur biasanya banyak terdapat di dekat pintu air.

Tujuan utama pembangunan Waduk Batutegi adalah untuk menyediakan pengairan bagi lahan padi seluas 43.588 hingga 66.573 hektar, sementara manfaat lainnya termasuk sebagai sumber pembangkit listrik dengan kapasitas 2 x 14 MW. Luas area tutupan air Waduk Batutegi mencapai 21 km², dengan level air mencapai 274 m (Aprizal dan Hery, 2013). Waduk Batutegi memiliki tujuan dan manfaat, yaitu: (1) Aspek pemanfaatan dan perekonomian mencakup penyediaan air irigasi, pembangkit listrik tenaga air (PLTA), serta pasokan air baku untuk kebutuhan air minum domestik, (2) Aspek lingkungan dan pengendalian dampak kerusakan akibat air meliputi konservasi air untuk mengatasi fluktuasi signifikan antara debit rata-rata pada musim hujan dan musim kemarau, serta pengendalian

banjir, (3) Aspek pariwisata dan pengembangan perikanan darat (Ramdhana, 2013).

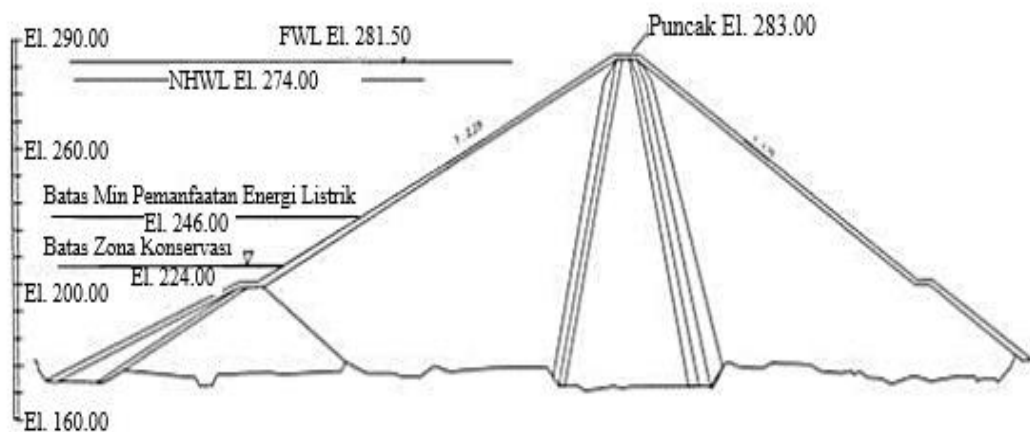
Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 37 Pasal 1 Tahun 2010 tentang Bendungan, Bendungan merupakan bangunan yang dapat berupa urukan tanah, urukan batu, beton, atau pasangan batu. Selain bertujuan untuk menahan dan menampung air, bendungan juga dapat dibuat untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*) atau lumpur, sehingga tercipta waduk.

2.1.2 Bendungan Batutegi

Suatu bendungan berfungsi sebagai penangkap air dan menyimpannya selama musim hujan ketika air sungai mengalir dalam jumlah besar dan melebihi kebutuhan untuk berbagai keperluan, seperti irigasi, air minum, industri, dan lain-lain. Dengan daya tampung yang ada, sejumlah besar air sungai yang melebihi kebutuhan dapat disimpan dalam waduk dan hanya dilepas mengalir ke dalam sungai lagi di hilirnya sesuai dengan kebutuhan pada saat diperlukan.

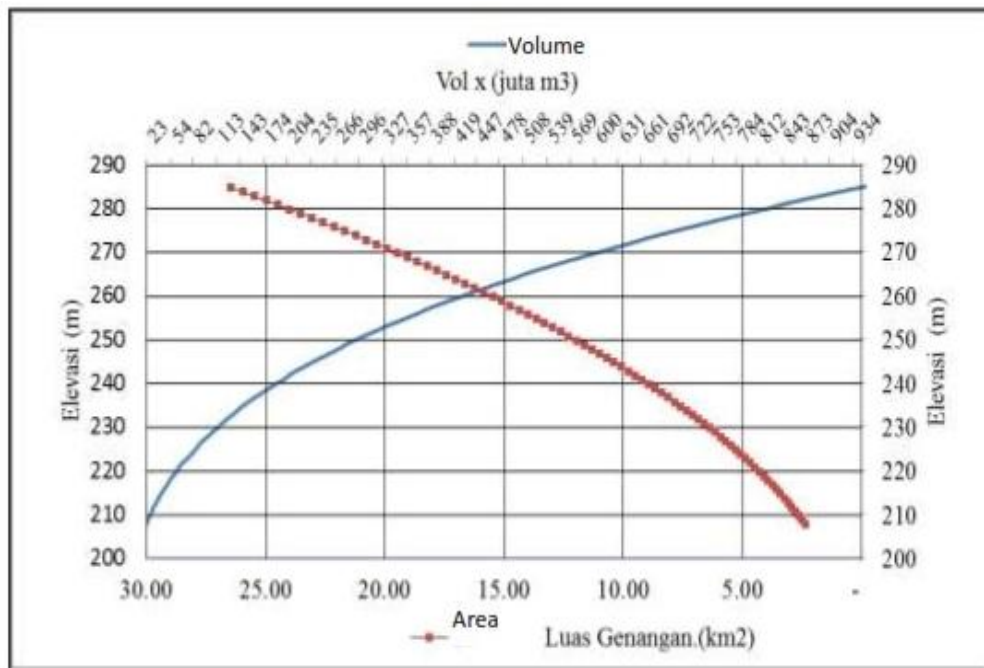
Bendungan Batutegi terletak di Desa Way Harong, Kecamatan Pulau Panggang, Kabupaten Tanggamus, sekitar 90 km sebelah barat daya dari kota Bandar Lampung. Bendungan ini merupakan salah satu aset dari Balai Besar Wilayah Sungai Mesuji Sekampung, yang merupakan salah satu satuan kerja di bawah Kementerian Pekerjaan Umum. Pekerjaan fisik bendungan dimulai pada tahun 1994, meskipun studi kelayakannya telah dilakukan sejak tahun 1978 dan desain detailnya baru selesai pada tahun 1983 dengan bantuan dana pinjaman dari Bank Dunia (*Loan IBRD*), pembangunan bendungan ini diselesaikan pada tahun 2000. Bendungan Batutegi adalah tipe bendungan timbunan batu dengan inti tanah kedap air (*rock fill dam*). Karakteristik bendungan ini meliputi panjang puncak sebesar 701 meter, elevasi puncak +284,50 meter (tengah), lebar puncak 12 meter, tinggi bendungan 122 meter, volume timbunan sebesar 9.641.071 m³, dan panjang akses galeri mencapai 233 meter (Kementrian Keuangan Republik Indonesia, 2009). Rasio kemiringan lereng bagian hulu 1:2,25 sedangkan rasio kemiringan lereng bagian hilir 1:1,75. Dengan tipe konstruksi tersebut maka volume timbunan termasuk *cofferdam* sebanyak 9,62 juta m³.

Waduk Batutege membentuk genangan pada kondisi tinggi muka air maksimum (HWL) seluas 21,0 km². Tinggi muka air banjir (FWL) berada pada posisi ketinggian 281,5 m, sedangkan tinggi muka air normal (NHWL) pada posisi 274,0 m dan tinggi muka air rendah (LWL) sebagai batas *dead storage* pada posisi 208,0 m. Jumlah tampungan efektif dengan sedimen sebanyak 580 juta m³, sedangkan jumlah tampungan efektif untuk keperluan irigasi tanpa sedimen sebanyak 578 juta m³.

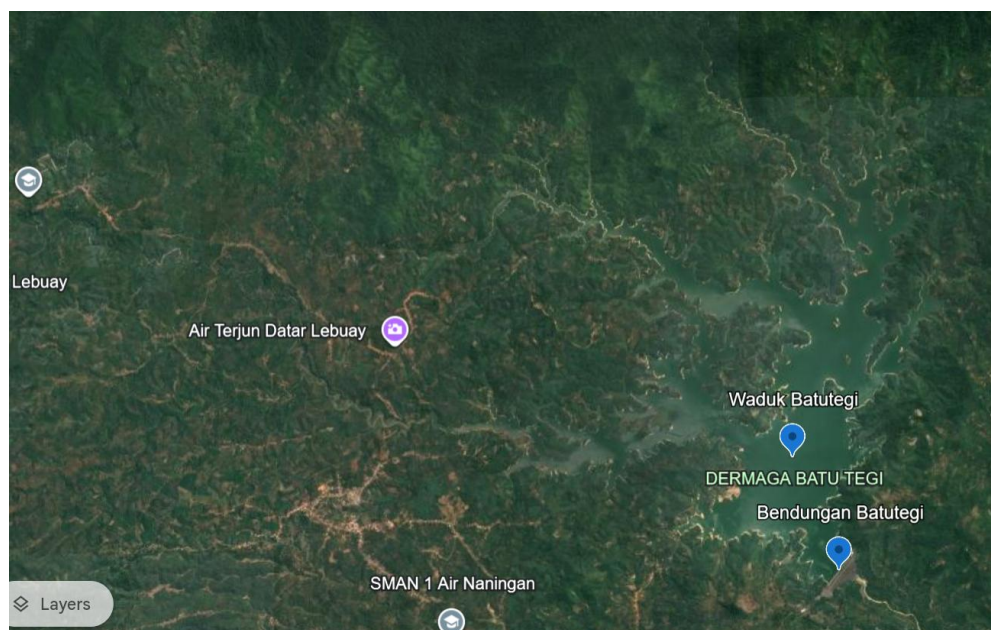


Gambar 1. Karakteristik Penampang Zona Tampungan Bendungan Batutege
(Sumber: Ditjen SDA)

Bangunan pelimpah (*spillway*) dibangun dengan konstruksi berbentuk terowongan (*tunnel*) berdiameter 11,5 m dengan panjang aliran 540 m menuju Sungai Way Sekampung dari titik elevasi 274 m. Berdasarkan data karakteristik Bendungan Batutege tersebut dapat digambarkan kurva lengkung karakteristik Waduk Batutege sebagaimana disajikan pada Gambar 2 (Ridwan, 2014). Analisis proyeksi volume simpanan air waduk dilakukan dengan dua pendekatan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lengkung Karakteristik Waduk Batutege
(Sumber: Ridwan 2014)



Gambar 3. Lokasi Waduk dan Bendungan Batutege
(Sumber: *Google Earth*).

2.2 Erosi dan Sedimentasi

2.2.1 Erosi

Menurut Arsyad (2010), erosi merupakan proses perataan permukaan bumi, di mana terjadi pengikisan di bagian atas dan penimbunan di bagian bawah. Namun, karena proses perataan ini dapat menimbulkan berbagai masalah baik di lokasi (*on-site*) maupun di luar lokasi (*off-site*), maka erosi yang berlebihan perlu dicegah. Di lahan yang tidak datar, terlepas dari persentase atau sudut kemiringan lereng, erosi pasti akan terjadi. Namun, dalam kondisi alami, tingkat erosi yang terjadi sangat rendah dan berada di bawah batas yang diperbolehkan atau ditoleransi. Ini berarti bahwa volume erosi alami jauh lebih kecil dibandingkan dengan volume tanah yang terbentuk akibat proses pelapukan. Erosi yang terjadi dalam kondisi alami ini dikenal sebagai erosi alami, erosi normal, atau erosi geologi. Dengan demikian, erosi alami, erosi normal, atau erosi geologi adalah proses pengangkutan tanah yang berlangsung di bawah vegetasi alami dengan laju yang lambat dan dalam kondisi vegetasi yang normal, tanpa campur tangan manusia.

Prediksi erosi merupakan metode untuk memperkirakan laju erosi yang mungkin terjadi pada tanah yang digunakan untuk berbagai jenis penggunaan lahan dan pengelolaan. Saat ini, model parametrik, khususnya tipe kotak kelabu, adalah metode yang umum digunakan untuk prediksi erosi. Metode ini berfungsi sebagai alat untuk menilai apakah suatu program atau tindakan konservasi tanah berhasil mengurangi erosi pada suatu bidang tanah atau Daerah Aliran Sungai (DAS). Selain itu, prediksi erosi juga berperan sebagai alat bantu dalam pengambilan keputusan terkait perencanaan konservasi tanah di suatu area (Banuwa, 2013). Sebuah model parametrik untuk memprediksi erosi pada suatu bidang tanah telah dikembangkan oleh Wischmeier dan Smith (1978), yang dikenal sebagai *Universal Soil Loss Equation* (USLE). USLE memungkinkan perencanaan untuk memperkirakan laju rata-rata erosi pada tanah tertentu dengan mempertimbangkan kemiringan lereng dan pola hujan yang spesifik, serta berbagai jenis pertanian dan tindakan pengelolaan (tindakan konservasi tanah) yang mungkin diterapkan atau sedang digunakan. Persamaan yang digunakan mengelompokkan berbagai

parameter fisik dan pengelolaan yang mempengaruhi laju erosi ke dalam enam variabel utama, di mana nilai-nilainya dapat dinyatakan secara numerik untuk setiap lokasi. USLE dirancang untuk memprediksi rata-rata erosi jangka panjang dari erosi lembar atau alur dalam kondisi tertentu. Namun, model ini tidak dapat memprediksi pengendapan dan tidak mempertimbangkan hasil sedimen dari erosi pada parit, tebing sungai, dan dasar sungai. Meskipun ada beberapa kelemahan, persamaan USLE tetap relevan dan paling banyak digunakan hingga saat ini, tanpa ada metode lain yang menggantikannya.

Prediksi laju erosi berdasarkan parameter dalam persamaan USLE yang dikemukakan oleh Wischmeier dan Smith (1978), seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 1.

$$Ea = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Keterangan:

- Ea = besarnya kehilangan tanah (ton/ha/tahun)
- R = faktor erosivitas hujan (kJ/ha)
- K = faktor erodibilitas tanah (ton/kJ)
- LS = faktor panjang dan kemiringan lereng
- C = faktor tanaman penutup lahan
- P = faktor tindakan konservasi tanah.

Faktor erosivitas hujan merujuk pada kemampuan air hujan untuk mengikis tanah. Dibutuhkan data curah hujan Waduk Batutege untuk mendapatkan nilai erosivitas hujan wilayah Waduk Batutege berdasarkan Persamaan Abdurachman (1989) sebagaimana diuraikan Persamaan 2 dan 3 berikut.

$$R_m = \frac{(Pm)^{2,263} \times (Max P)^{0,678}}{40,056 \times (Dm)^{0,349}} \quad (2)$$

$$R = \sum_{m=1}^{12} (R_m) \quad (3)$$

Keterangan:

R = erosivitas hujan tahunan (kJ/ha)

Rm = erosivitas hujan bulanan (kJ/ha)

Pm = jumlah curah hujan dalam sebulan (cm)

Dm = jumlah hari hujan dalam sebulan (hari)

Max P = curah hujan harian maksimal per bulan (cm)

Faktor erodibilitas tanah (K) menggambarkan sejauh mana partikel tanah dapat bertahan terhadap erosi yang disebabkan oleh energi kinetik air hujan (Asdak, 1995). Nilai faktor K di daerah tangkapan Waduk Batutegi dapat ditentukan menggunakan peta jenis tanah Kabupaten Tanggamus yang mana nilai faktor K mengacu pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis Tanah dan Nilai Erodibilitas Tanah (K)

No.	Jenis Tanah	Nilai K
1	Podsolik	0,16
2	Grumusol	0,21
3	Mediterran	0,23
4	Litosol	0,29
5	Latosol	0,31
6	Regosol	0,4
7	Alluvial	0,47

Sumber: Kironoto (2003).

Dalam penelitian Cahyono dkk. (2017), faktor tingkat dan kemiringan lereng (LS) mempengaruhi tingkat erosi. Panjang lereng berperan dalam menentukan volume air yang mengalir, sehingga meningkatkan potensi air untuk mengikis tanah. Sementara itu, kemiringan lereng mempengaruhi kecepatan pengikisan tanah, yang menyebabkan aliran permukaan membawa tanah dengan lebih cepat.

Nilai faktor LS di tangkapan Waduk Batutegi dapat ditentukan dengan menggunakan peta kemiringan lereng yang merupakan turunan dari peta kontur Kabupaten Tanggamus, untuk mengetahui persentase kemiringan lereng di bukit-

bukit dalam daerah tangkapan Waduk Batutege dan mendefinisikan nilai LS dengan tepat, sehingga nilai LS dapat didefinisikan sesuai pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Faktor Kemiringan Lereng (LS)

No.	Kemiringan Lereng	Kelas Lereng	Nilai LS
1	0-8 %	I	0,4
2	8-15 %	II	1,4
3	15-25 %	III	3,1
4	25-40 %	IV	6,8
5	>40 %	V	9,5

Sumber: Departemen Kehutanan (2009).

Faktor tutupan dan konservasi lahan (CP) merupakan gabungan dari faktor C dan faktor P. Kedua faktor ini digabungkan jika data penilaian untuk masing-masing faktor tersebut identik. Faktor CP menunjukkan tingkat erosi yang dipengaruhi oleh jenis tanaman serta tindakan teknik konservasi tanah yang diterapkan (Cahyono dkk., 2017). Peta tata guna lahan Kabupaten Tanggamus menjadi sumber data untuk memperoleh nilai faktor CP di daerah tangkapan Waduk Batutege yang mengacu pada Tabel 3.

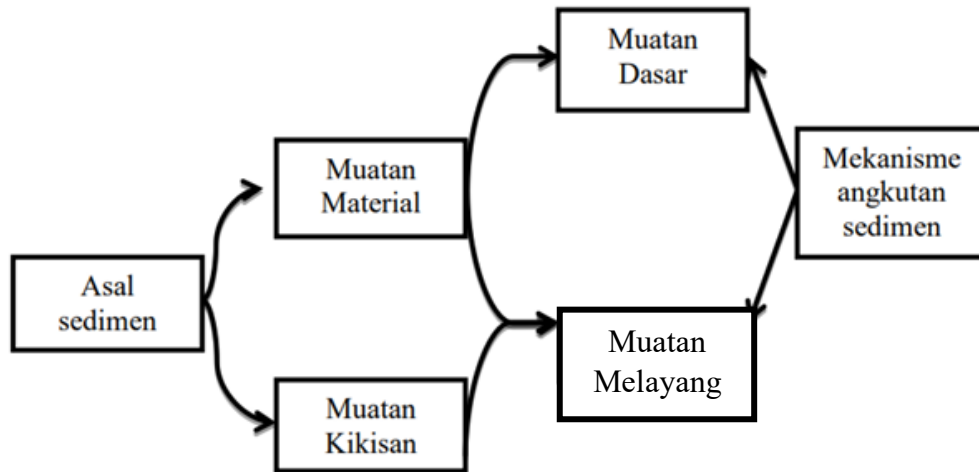
Tabel 3. Nilai Faktor Tutupan dan Konservasi Lahan

No.	Tindakan konservasi tanah	Faktor CP
1	Pertanian dengan mulsa	0,14
2	Pertanian dengan teras bangku	0,04
3	Pertanian contour cropping	0,14
4	Kebun campuran	0,2
5	Tanaman pertanian padi irigasi	0,01
6	Hutan tak terganggu	0,1
7	Semak belukar	0,3
8	Perladangan/tegalan	0,28

Sumber: Kironoto (2003).

2.2.2 Sedimentasi

Sedimen merupakan potongan atau kepingan yang terbentuk melalui proses fisik dan kimia dari batuan atau tanah. Material ini memiliki berbagai bentuk, mulai dari bulat hingga tajam, serta bervariasi dalam kerapatan dan komposisi, dengan kuarsa sebagai komponen dominan. Sedimen ini dapat terbawa oleh aliran air dan dibedakan menjadi dua jenis: endapan dasar (*bed load*) dan muatan melayang (*suspended load*). Muatan dasar bergerak di dalam aliran sungai dengan cara bergulir, meluncur, dan melompat di atas permukaan dasar sungai. Sementara itu, muatan melayang terdiri dari butir-butir halus yang berukuran lebih kecil dari 0,1 mm, yang selalu melayang dalam aliran air; bahkan butiran yang sangat halus tetap tidak mengendap meskipun air tidak mengalir, sehingga air tetap jernih. Sedimen semacam ini dikenal sebagai muatan kikisan (*wash load*). Sedimen yang diangkut oleh air berasal dari penggerusan di bagian hulu sungai, dasar sungai, serta tepi sungai, dan merupakan hasil penggerusan di daerah tangkapan air (*catchment area*). Dengan kondisi lahan yang demikian dan curah hujan yang tinggi, banyak sedimen terbawa ke sungai, sehingga menjadi sumber sedimentasi di waduk. Bagi waduk yang sedang beroperasi, bahaya sedimentasi dapat mempengaruhi umur waduk tersebut. Sedimen di sungai, baik yang terlarut maupun tidak terlarut, merupakan produk pelapukan batuan yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama perubahan iklim. Hasil pelapukan batuan ini disebut partikel-partikel tanah. Melalui pengaruh tenaga kinetis dari air hujan dan aliran permukaan (terutama di daerah tropis), partikel-partikel tanah tersebut dapat terkelupas dan terangkut ke tempat yang lebih rendah sebelum akhirnya masuk ke sungai sebagai sedimen (Tatipata dkk., 2015). Proses terjadinya sedimentasi bisa dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Proses terjadinya sedimentasi
(Sumber: Mohammad, 2009).

Menurut Tatipita dkk. (2015), pengangkutan sedimen dari daerah yang lebih tinggi ke hilir dapat menyebabkan pendangkalan pada waduk, sungai, dan saluran irigasi, serta pembentukan tanah baru di tepi-tepi dan delta sungai. Proses sedimentasi dapat memberikan dampak positif dan negatif. Dampak positifnya adalah aliran sedimen ke hilir dapat meningkatkan kesuburan tanah dan menciptakan lahan pertanian baru di daerah hilir. Namun, di sisi lain, aliran sedimen juga dapat menurunkan kualitas perairan dan menyebabkan pendangkalan badan air seperti waduk dan sungai.

Hasil sedimen ini dinyatakan dalam satuan berat (ton) atau satuan volume (mpk atau *acre-feet*) dan bergantung pada luas daerah pengaliran. Perbandingan data hasil sedimentasi umumnya didasarkan pada hasil per satuan luas daerah pengaliran, yang dikenal sebagai laju produksi sedimen (*sediment production rate*), yang dinyatakan dalam ton/ha, ton/km², atau *acre-feet/sq* (Tatipita dkk., 2015). Jenis-jenis sedimentasi dapat dilihat dari besarnya ukuran partikel seperti yang terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Jenis Sedimen Berdasarkan Ukuran Partikelnya

Jenis Sedimen	Ukuran Partikel (mm)
Liat	< 0,0039
Debu	0,0039 – 0,0625
Pasir	0,0625 – 2,0
Pasir Besar	2,0 – 64,0

Sumber: Asdak (2004).

Produksi sedimen dipengaruhi oleh rasio antara jumlah tanah yang terbawa oleh aliran sungai menuju waduk, yang dikenal sebagai *Sediment Delivery Ratio* (SDR). Persamaan SDR diperkenalkan oleh USDA (*United States Department of Agriculture*) pada tahun 1979 dan dijelaskan dalam Persamaan 4.

$$SDR = 0,5656 \times A^{-0,11} \quad (4)$$

Keterangan:

SDR = *Sediment Delivery Ratio*

A = luas daerah tangkapan waduk (km²).

Persamaan untuk menghitung produksi sedimen dinyatakan dalam Persamaan 5.

$$SYLD = SDR \times Ea \quad (5)$$

Keterangan:

SYLD = produksi sedimen (*sediment yield*) (ton/ha)

SDR = *Sediment Delivery Ratio*

Ea = laju erosi (ton/ha)

Selain menggunakan pendekatan USLE, pendugaan laju sedimentasi di Waduk Batutegi juga dapat ditentukan melalui pengukuran kandungan tanah dengan Metode Angkutan Sedimen. Data yang digunakan mencakup data *Total Suspended*

Solid (TSS), serta data debit dari Waduk Batutege. Persamaan untuk angkutan sedimen dinyatakan dalam Persamaan 6.

$$Q_s = k \times C_s \times Q \quad (6)$$

Keterangan:

Q_s = debit angkutan sedimen (ton/hari)

K = konstanta ($24 \times 60 \times 60 = 86400$ detik)

C_s = sedimen (gr/liter) berbanding lurus dengan TSS

Q = debit air (m^3 /detik)

2.3 Total Suspended Solid (TSS)

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. Kadar TSS dipengaruhi oleh erosi tanah, limpasan permukaan, dan aktivitas manusia, yang dapat mengurangi penetrasi sinar matahari, menghambat fotosintesis, dan menurunkan kadar oksigen terlarut yang penting bagi kehidupan akuatik (Dhani, 2023).

TSS dapat memengaruhi penetrasi sinar matahari ke dalam air, yang pada gilirannya dapat menghambat proses fotosintesis dan meningkatkan tingkat kekeruhan. Beberapa faktor yang menyebabkan konsentrasi TSS tinggi meliputi zooplankton, limbah hewan, fitoplankton, limbah manusia, sisa tanaman, limbah lumpur, limbah industri, dan sisa hewan (Andini dkk., 2015). TSS juga berkontribusi terhadap perubahan dalam redaman cahaya dan produksi primer, saturasi oksigen, fungsi pembibitan ikan, siklus biogeokimia, transportasi polutan yang melekat, serta perubahan jalur nutrisi (Bioresita dkk., 2018). Terdapat hubungan antara padatan tersuspensi dan kekeruhan, semakin tinggi nilai padatan tersuspensi, semakin tinggi pula nilai kekeruhan. Namun, peningkatan padatan tersuspensi tidak selalu diikuti oleh peningkatan kekeruhan (Nurgiantoro, 2016). Pengukuran TSS tradisional dilakukan dengan menggunakan metode gravimetri, namun kini teknik penginderaan jauh seperti citra satelit Sentinel-2A banyak

digunakan untuk pemantauan TSS yang komprehensif dan efisien, seperti dilaporkan oleh Octaviana (2020), bahwa estimasi TSS dapat dilakukan dengan akurasi tinggi dengan cara menggabungkan penginderaan jauh dan pengukuran *in situ*, dan hasil penelitian memberikan wawasan penting untuk pengelolaan kualitas air dan pemantauan status ekosistem sungai secara *real-time*.

2.4 Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis (*Geographic Information System*)

2.4.1 Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh (*remote sensing*) merupakan seni dan ilmu untuk mendapatkan informasi tentang obyek, area atau fenomena melalui analisa terhadap data yang diperoleh dengan menggunakan alat tanpa kontak langsung dengan obyek, daerah ataupun fenomena yang dikaji (Lillesand dan Kiefer, 1979).

Alat yang dimaksud dalam pengertian diatas adalah alat pengindra atau sensor. Pada umumnya sensor dibawa oleh wahana baik berupa pesawat, balon udara, satelit maupun jenis wahana yang lainnya (Sutanto, 1987). Hasil perekaman oleh alat yang dibawa oleh suatu wahana ini selanjutnya disebut sebagai data penginderaan jauh.

Lindgren (1985) dalam Sutanto (1987) mengungkapkan bahwa penginderaan jauh adalah berbagai teknik yang dikembangkan untuk perolehan dan analisis informasi tentang bumi, informasi ini khusus berbentuk radiasi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan dari permukaan bumi. Penginderaan jauh merupakan metode yang dirancang untuk mengumpulkan dan menganalisis informasi mengenai bumi, yang berupa radiasi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh permukaan bumi. Teknik ini mencakup pengukuran dan perekaman energi elektromagnetik yang berasal dari permukaan bumi dan atmosfer di lokasi tertentu. Dari penjelasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa penginderaan jauh adalah teknik yang digunakan untuk mendapatkan data tentang permukaan bumi melalui satelit (Julianto, 2021).

Perkembangan penginderaan jauh ini semakin cepat seiring dengan kemajuan teknologi dirgantara. Sebelumnya penginderaan jauh lebih banyak menggunakan pesawat udara dan balon udara dalam perekaman data permukaan bumi, tetapi seiring dengan perkembangan penerbangan antariksa dan penggunaan satelit untuk berbagai kepentingan termasuk didalamnya perekaman permukaan bumi, maka penginderaan jauh tumbuh berkembang semakin cepat. Demikian pula halnya dengan penggunaan sensor yang di bawa oleh berbagai wahana juga mengalami peningkatan baik dalam jenis sensor yang digunakan maupun tingkat kedetailan hasil penginderaan.

Satelit pertama yang berhasil diluncurkan dalam rangka monitoring sumber daya bumi adalah satelit ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) yang diluncurkan pada tahun 1972. Hingga saat ini telah ratusan jenis satelit dengan berbagai tingkat ketelitian dan berbagai panjang gelombang digunakan untuk berbagai kajian permukaan bumi.

Beberapa contoh manfaat dalam aplikasi penginderaan jauh adalah:

1. Identifikasi penutupan lahan (*landcover*)
2. Identifikasi dan monitoring pola perubahan lahan
3. Manajemen dan perencanaan wilayah
4. Manajemen sumber daya hutan
5. Eksplorasi mineral
6. Pertanian dan perkebunan
7. Manajemen sumber daya air
8. Manajemen sumber daya laut

Secara umum dapat dikatakan bahwa penginderaan jauh dapat berperan dalam mengurangi secara signifikan kegiatan survey terestrial dalam inventarisasi dan *monitoring* sumberdaya alam. Kegiatan survey terestris dengan adanya teknologi ini hanya dilakukan untuk membuktikan suatu jenis obyek atau fenomena yang ada dilapangan untuk disesuaikan dengan hasil analisa data.

Penginderaan jauh memantau objek yang terletak di permukaan bumi tanpa perlu mendekatinya. Untuk ini, digunakanlah alat perekam berupa kamera yang dipasang pada wahana. Wahana tersebut dapat berupa balon udara atau pesawat. Dengan kemajuan teknologi yang pesat, wahana modern seperti satelit yang diluncurkan ke ruang angkasa mulai digunakan. Satelit yang diluncurkan ke luar angkasa disebut satelit buatan. Satelit buatan memiliki berbagai kegunaan, seperti mengamati perubahan cuaca dan berfungsi sebagai alat telekomunikasi. Namun, satelit buatan memiliki batas waktu operasional yang ditentukan oleh ukuran, bahan bakar, dan jarak orbitnya (Arifin, 2023).

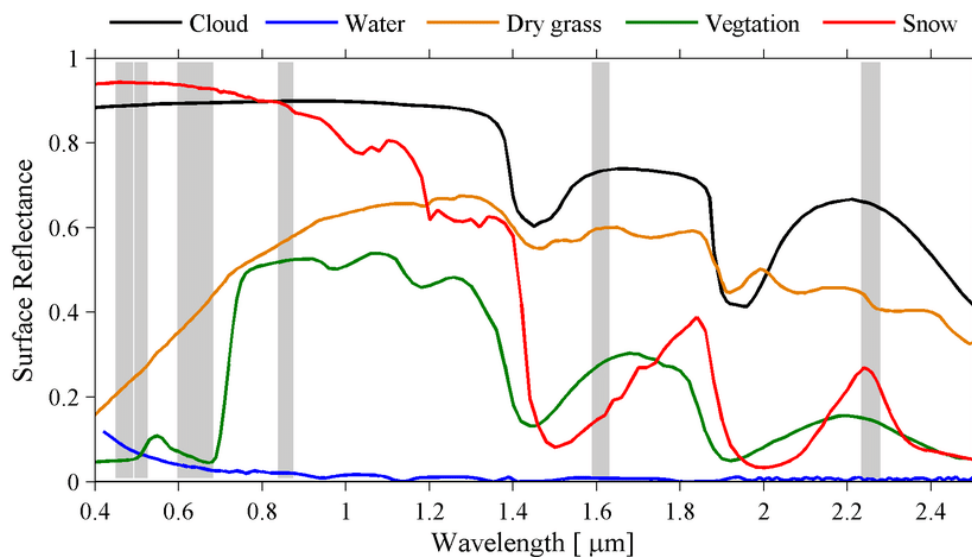
Insyani (2010), menyatakan bahwa suatu wilayah dapat dianalisis keadaannya, tetapi sebelum melakukan penelitian, hal pertama yang perlu dilakukan adalah pengumpulan data. Pengumpulan data adalah proses merekam dan menyimpan semua jenis pancaran dan pantulan energi elektromagnetik dari permukaan bumi menggunakan pengindra atau sensor. Hasil pantulan tersebut membentuk citra bumi yang diteliti.

Secara umum, objek di permukaan bumi dapat dibagi menjadi tiga kategori besar, yaitu tanah, air, dan vegetasi. Ketiga objek tersebut secara alami memiliki sifat dan bentuk yang berbeda-beda. Oleh karena itu, jika dipotret menggunakan panjang gelombang tertentu, akan menghasilkan karakteristik reflektan yang berbeda-beda. Karakteristik reflektan dari objek permukaan bumi (tanah, air, vegetasi) dapat digunakan sebagai acuan dalam memilih citra penginderaan jauh dan dalam interpretasi objek. Komponen-komponen dalam sistem penginderaan jauh meliputi sumber tenaga, atmosfer, objek, sensor dengan wahana, pengolahan data, interpretasi/analisis, dan pengguna atau *user* (Deri, 2023).

Sistem penginderaan jauh mencakup domain elektromagnetik dan domain ruang. Setiap objek pada dasarnya memiliki dan memancarkan gelombang elektromagnetik. Keberadaan suatu objek dapat dideteksi melalui pantulan atau pancaran elektromagnetik yang dihasilkan, asalkan karakteristik pantulan atau pancarannya diketahui. Cara objek merespons gelombang elektromagnetik yang

mengenaunya bervariasi. Meskipun demikian, setiap objek cenderung memberikan respons yang relatif serupa pada setiap spektrum, sehingga respons elektromagnetik objek sering disebut sebagai respons spektral. Penggunaan beberapa spektrum sangat membantu dalam proses pengenalan objek melalui perbandingan penampakan antar saluran (Hadi dkk., 2019). Pemahaman dan distribusi nilai spektral setiap objek terhadap panjang gelombang tertentu disajikan pada Gambar 5.

Menurut Jensen (2016), reflektansi spektral merujuk pada perbandingan antara energi yang dipantulkan oleh suatu permukaan dengan energi yang mengenainya, yang dinyatakan sebagai fungsi dari panjang gelombang atau frekuensi. Kurva reflektansi spektral merupakan gambaran grafis dari perbandingan ini terhadap panjang gelombang atau frekuensi tertentu. Kurva tersebut dapat menggambarkan perubahan nilai reflektansi di berbagai bagian spektrum elektromagnetik, mulai dari wilayah ultraviolet hingga ke inframerah termal. Reflektansi spektral dipengaruhi oleh sejumlah faktor, seperti komposisi material, tekstur dan bentuk permukaan, serta sudut datang dan polarisasi cahaya. Setiap jenis material memiliki karakteristik kurva reflektansi spektral yang unik, sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk mengenali dan membedakannya. Sebagai contoh, vegetasi umumnya menunjukkan tingkat reflektansi yang tinggi pada spektrum inframerah dekat, namun rendah pada wilayah tampak dan inframerah gelombang pendek. Sebaliknya, air memperlihatkan reflektansi rendah pada wilayah tampak dan inframerah dekat, tetapi tinggi pada spektrum inframerah termal.

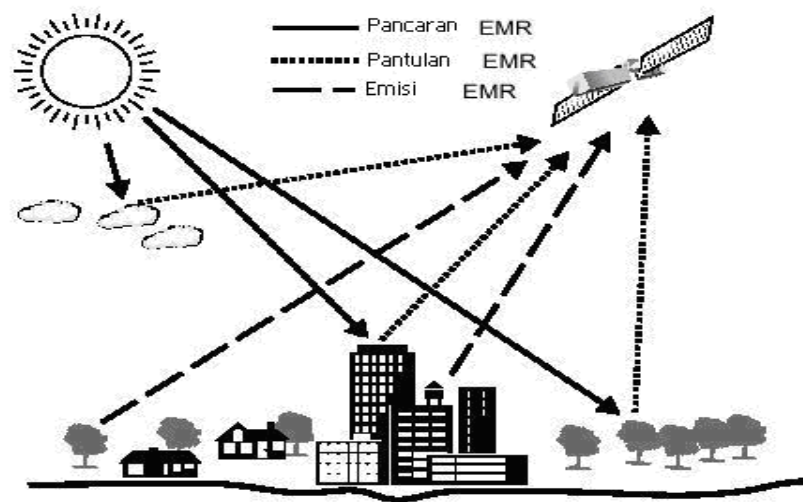


Gambar 5. Pola Respon Spectral Obyek

(Sumber: Zhuge, 2017)

Prinsip perekaman oleh sensor dalam pengambilan data melalui metode penginderaan jauh dilakukan berdasarkan perbedaan daya reflektansi energi elektromagnetik masing-masing objek di permukaan bumi. Daya reflektansi yang berbeda-beda oleh sensor akan direkam dan didefinisikan sebagai objek yang berbeda yang dipresentasikan dalam sebuah citra.

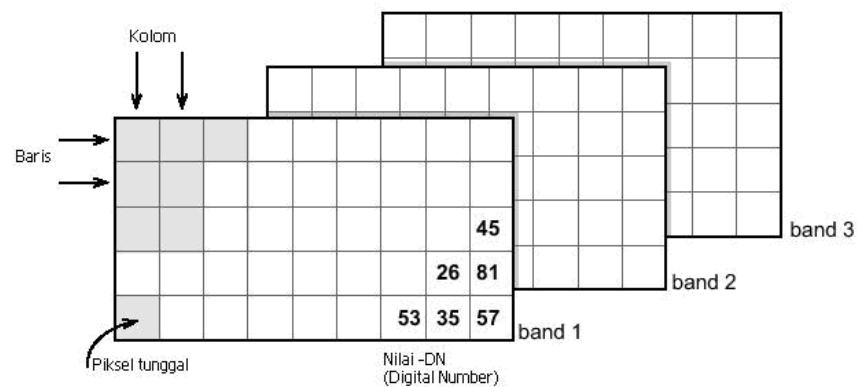
Gelombang elektromagnetik yang dipantulkan permukaan bumi akan melewati atmosfer sebelum direkam oleh sensor. Awan, debu, atau partikel-partikel lain yang berada di atmosfer akan membiaskan pantulan gelombang ini. Atas dasar pembiasan yang terjadi, sebelum dilakukan analisa terhadap citra diperlukan kegiatan koreksi radiometrik



Gambar 6. Proses Perekaman Permukaan Bumi oleh Satelit Penginderaan Jauh
(Sumber: Tempfli, 2009)

Data Citra satelit sebagai hasil dari perekaman satelit memiliki beberapa karakter yaitu:

1. Karakter spasial atau yang lebih dikenal sebagai resolusi spasial, bahwa data citra penginderaan jauh memiliki luasan terkecil yang dapat direkam oleh sensor. Sebagai contoh untuk Landsat TM memiliki luasan terkecil yang mampu direkam adalah 30×30 m dan mampu merekam daerah selebar 185 km^2 . 1 *scene* citra landsat memiliki luas $185 \text{ km} \times 185 \text{ km}$.
2. Karakteristik spektral atau lebih sering disebut sebagai resolusi spektral, Data penginderaan jauh direkam pada julat panjang gelombang tertentu. Masing-masing satelit biasanya membawa lebih dari satu jenis sensor dimana tiap sensor akan memiliki kemampuan untuk merekam julat panjang gelombang tertentu.
3. Karakteristik Temporal, Bahwa citra satelit dapat merekam suatu wilayah secara berulang dalam waktu tertentu, sebagai contoh satelit Landsat 3 dapat melakukan perekaman ulang terhadap satu wilayah setelah selang 18 hari.



Gambar 7. Karakteristik Data Citra

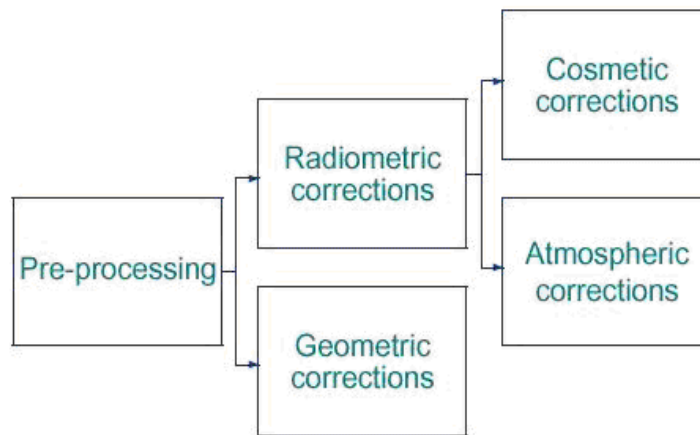
(Sumber: Tempfli, 2009)

Sedangkan data penginderaan jauh berdasarkan jenis produk datanya dapat dibagi menjadi dua yaitu:

1. Citra Foto, dihasilkan oleh alat perekam kamera dengan detektor berupa film, dengan mekanisme perekaman serentak, biasanya direkam dalam spektrum tampak atau perluasnya, dewasa ini berkembang teknologi digital yang dapat menggantikan peran film sebagai media penyimpanan obyek.
2. Citra non Foto, dihasilkan oleh sensor non kamera berdasarkan pada penyiaran atau kamera yang detektornya bukan film, proses perekamannya parsial dan direkam secara elektronik.

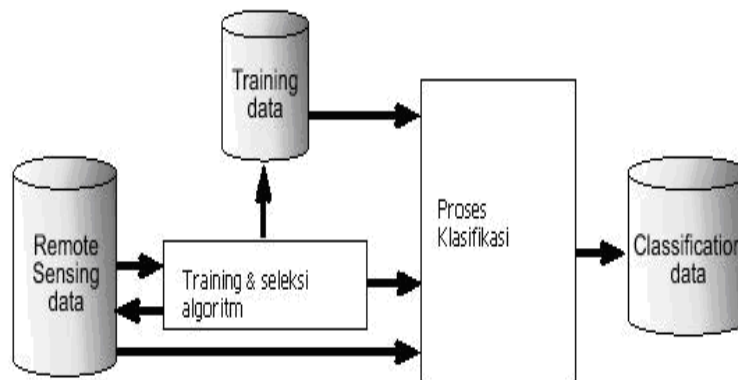
Secara umum pengolahan citra terbagi kedalam:

1. *Pre-processing* citra, merupakan pengolahan awal sebelum proses pengklasifikasian. Dalam kegiatan ini, koreksi citra (geometrik dan radiometrik) dilakukan.



Gambar 8. Diagram *Pre-processing* Citra

2. Klasifikasi citra, merupakan tahap intepretasi informasi pada citra yang dibuat berdasarkan klas katagori tertentu.



Gambar 9. Diagram Klasifikasi Citra

Metode klasifikasi secara umum terbagi menjadi dua:

1. Klasifikasi Tidak Terbimbing (*un-supervised classification*), merupakan metode klasifikasi yang memberikan keleluasaan bagi komputer untuk mengklasifikasikan citra secara mandiri.
2. Klasifikasi Terbimbing (*supervised classification*), merupakan metode klasifikasi yang memberikan bimbingan kepada komputer dalam proses klasifikasinya.

2.4.2 Sistem Informasi Geografis (*Geographic Information System*)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan analisis kuantitatif dan spasial terhadap berbagai peta tematik (Wuryanta, 2014). Dalam analisis spasial, SIG memiliki beberapa keunggulan, yaitu: (1) efektif dalam mendukung proses pembentukan, pengembangan, atau perbaikan peta; (2) dapat berfungsi sebagai alat bantu utama yang interaktif, menarik, dan menantang dalam upaya meningkatkan pemahaman, pengertian, pembelajaran, dan pendidikan mengenai konsep-konsep lokasi, ruang (spatial), kependudukan, serta unsur-unsur geografis yang ada di permukaan bumi beserta data atributnya; (3) mengintegrasikan data spasial dan atribut (non-spasial); (4) mampu menguraikan unsur-unsur di permukaan bumi menjadi beberapa lapisan atau coverage data spasial; dan (5) memiliki kemampuan untuk memvisualisasikan data spasial beserta atributnya (Prahasta, 2019).

SIG memudahkan proses visualisasi dan eksplorasi geografis dari data sekunder yang diperoleh, terutama dalam mengidentifikasi tingkat bahaya erosi. Dengan menggunakan SIG, fenomena kebumihan dapat dilihat dengan perspektif yang lebih baik. SIG memiliki kemampuan untuk menyimpan, memproses, dan menampilkan data spasial digital, serta mengintegrasikan berbagai jenis data, mulai dari citra satelit, foto udara, peta, hingga data statistik. Dengan adanya komputer yang memiliki kecepatan dan kapasitas penyimpanan besar seperti saat ini, SIG dapat memproses data dengan cepat dan akurat serta menampilkannya. Selain itu, SIG juga mendukung dinamika data dan memudahkan pemutakhiran informasi (Wibowo, 2015).

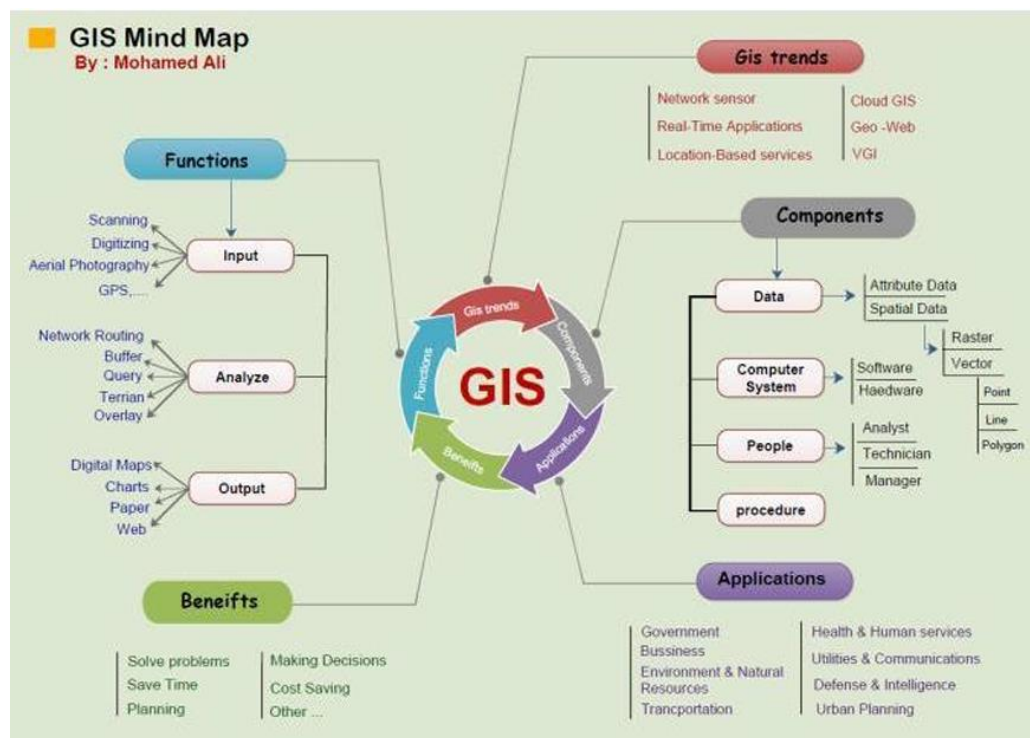
Sistem informasi geografis (SIG) berfungsi untuk memetakan dan menganalisis fenomena yang terjadi di permukaan bumi dengan dukungan teknologi komputer. SIG melakukan berbagai operasi, termasuk pengintegrasian fungsi basis data umum seperti query dan analisis statistik, yang dipadukan dengan visualisasi yang khas. Sistem ini memberikan informasi dan analisis terkait ilmu geografi yang dapat diperoleh melalui peta. Kapasitas unik yang ditawarkan oleh SIG menjadikannya berbeda dari sistem lainnya, sehingga sangat bermanfaat bagi

perusahaan swasta dan lembaga pemerintah dalam mendeskripsikan peristiwa, memprediksi hasil, dan merencanakan strategi (Suryanti, 2015).

Menurut Karina (2022), SIG dioperasikan melalui perangkat lunak yang terdiri dari berbagai modul program (*.exe) yang dapat dijalankan secara mandiri. Salah satu perangkat lunak SIG yang terkenal adalah ArcGIS, yang dikembangkan oleh ESRI (*Environmental Science & Research Institute*). ArcGIS berfungsi sebagai platform teknologi yang membantu pengguna dalam menciptakan, berbagi, dan mengakses peta, aplikasi, serta data. Perangkat lunak ini menawarkan alat kontekstual untuk pemetaan dan analisis spasial, memungkinkan pengguna untuk mengeksplorasi data berbasis lokasi. Produk utama dari ArcGIS adalah ArcGIS Desktop, yang mencakup empat aplikasi dasar: ArcMap, ArcCatalog, ArcGlobe, ArcScene, serta ArcToolbox.

2.4.3 Sub Sistem SIG

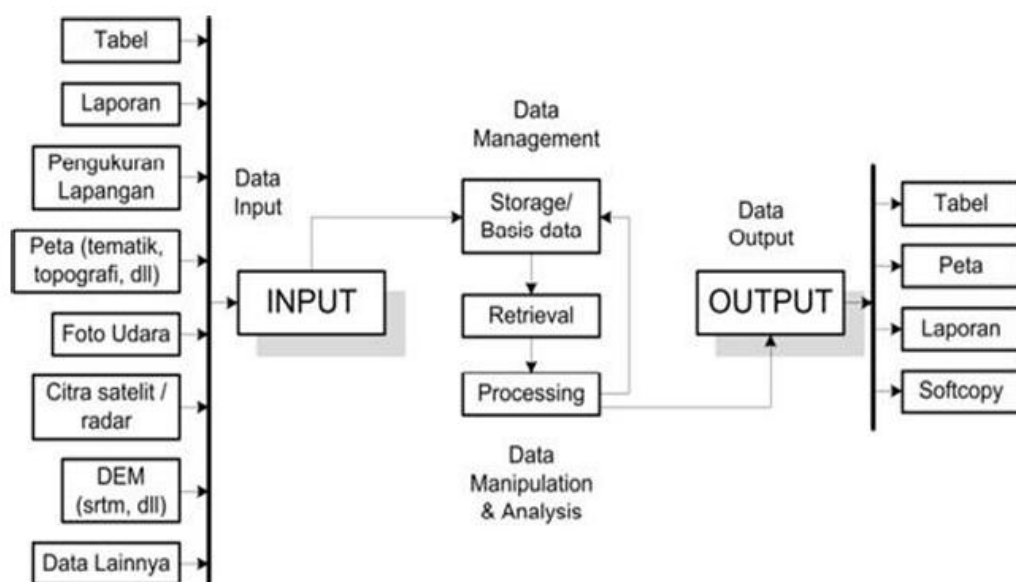
Sistem Informasi Geografis (SIG) terdiri dari beberapa sub-sistem sebagai berikut:



Gambar 10. Konsep Sistem Informasi Geografis (SIG)

(Sumber: Ali, 2016)

1. **Data Input**, sub-sistem ini bertugas untuk mengumpulkan, menyiapkan, dan menyimpan data spasial beserta atributnya dari berbagai sumber. Selain itu, data input juga bertanggung jawab untuk mengonversi format data asli ke format yang dapat digunakan dalam perangkat SIG.
2. **Data Management**, sub-sistem ini berfungsi untuk mengorganisir data spasial dan tabel atribut terkait ke dalam sistem basis data, sehingga memudahkan akses kembali.
3. **Data Manipulation dan Analysis**, sub-sistem ini memiliki tanggung jawab untuk menghasilkan informasi dari SIG. Selain itu, sub-sistem ini juga melakukan evaluasi terhadap fungsi-fungsi serta operator matematis dan logika, serta melakukan pemodelan data untuk menghasilkan informasi yang diinginkan.
4. **Data Output**, sub-sistem ini bertugas untuk menampilkan hasil keluaran, termasuk proses ekspor ke format yang diinginkan, baik dalam bentuk *softcopy* maupun *hardcopy*, seperti tabel, grafik, peta, dan lainnya (Prahasta, 2014).



Gambar 11. Sub-sistem SIG
(Sumber: Prahasta, 2014)

2.4 Citra Sentinel 2

Sentinel-2 merupakan salah satu citra satelit penginderaan jauh yang dikembangkan melalui kerja sama antara Komisi Eropa dan Agensi Angkasa Eropa dalam program *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES). Penggunaan citra satelit Sentinel-2 untuk memantau kondisi permukaan Bumi memberikan informasi tentang kondisi Bumi dan digunakan untuk keamanan dan pemantauan lingkungan. Program GMES merupakan inisiatif dari Komisi Eropa yang bertujuan untuk menunjukkan kemampuan dan kapasitas Eropa dalam menyediakan dan menggunakan informasi pemantauan operasional untuk aplikasi lingkungan dan keamanan (Drusch dkk., 2012).



Gambar 12. Satelit Sentinel 2
(Sumber: ESA)

Sentinel-2 terdiri dari dua satelit yang bertujuan untuk mendukung pemantauan vegetasi, tutupan lahan, dan lingkungan. Sentinel-2A merupakan satelit pencitraan optik pertama yang diluncurkan sebagai bagian dari program *European Space Agency* (ESA) pada tahun 2015. Satelit identik kedua, Sentinel-2B, diluncurkan pada tahun 2017. Secara umum, keduanya tidak memiliki banyak perbedaan, tetapi saat merekam lokasi yang sama, mereka memiliki interval waktu lima hari secara bergantian. Sentinel-2 dilengkapi dengan resolusi tinggi dan 13 *band spectral* (ESA, 2015).

Sentinel-2A merupakan satelit dengan resolusi spasial menengah yang memiliki lebar *swath* yang signifikan, memungkinkan pengamatan lokasi yang sama setiap lima hari, berbeda dengan Landsat yang memerlukan waktu 16 hari untuk melakukan hal yang sama. Satelit ini berguna untuk berbagai penelitian terkait pemantauan tutupan lahan, termasuk analisis vegetasi, tanah, dan air, serta pemantauan jaringan air dan kawasan pesisir. Sentinel-2A berfungsi sebagai penyelesaian Landsat 7 dan 8. Data dari Sentinel dapat disesuaikan dan digunakan untuk topik-topik seperti perencanaan ruang, pemantauan agro atau lingkungan, air, hutan dan vegetasi, karbon dan sumber daya alam, serta hasil pertanian secara global. Berikut karakteristik *band* citra Sentinel-2.

Tabel 5. Karakteristik *band* citra sentinel

Saluran	Kanal	Panjang gelombang (μ)	Resolusi spasial (m)
<i>Band 1</i>	<i>Coastal aerosol</i>	443-463	60
<i>Band 2</i>	<i>Blue</i>	490-555	10
<i>Band 3</i>	<i>Green</i>	560-595	10
<i>Band 4</i>	<i>Red</i>	665-695	10
<i>Band 5</i>	<i>Red Edge 1</i>	705-720	20
<i>Band 6</i>	<i>Red Edge 2</i>	740-755	20
<i>Band 7</i>	<i>Red Edge 3</i>	783-803	20
<i>Band 8</i>	<i>Near infrared (NIR)</i>	842-957	10
<i>Band 8A</i>	<i>NIR Narrow</i>	865-885	20
<i>Band 9</i>	<i>Water vapour</i>	945-965	60
<i>Band 10</i>	<i>Cirrus</i>	1375-1405	60
<i>Band 11</i>	<i>SWIR 1</i>	1610-1700	20
<i>Band 12</i>	<i>SWIR 2</i>	2190-2370	20

Sumber: ESA (2015).

2.6 Model SWAT (*Soil Water Assesment Tools*)

SWAT merupakan model yang dikembangkan pada tahun 1990-an oleh Dr. Jeff Arnold sebagai bagian dari pengembangan *Agricultural Research Service (ARS)* di *United State Departemen of Agricultural (USDA)*. Model ini dirancang untuk

memprediksi dampak manajemen lahan pertanian terhadap air, sedimentasi, dan jumlah bahan kimia di suatu daerah aliran sungai (DAS) yang kompleks, dengan mempertimbangkan variasi jenis tanah, penggunaan lahan, serta kondisi pengelolaan DAS setelah periode waktu yang Panjang (Nugroho, 2015).

Pemodelan SWAT ini menggabungkan model *Chemicals Run off and Erosion from Agricultural Management Systems* (CREAMS) yang dikembangkan oleh Knisel pada tahun 1980, model *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management System* (GLEAMS) yang dikembangkan oleh Leonard dkk. pada tahun 1987, gabungan model *Environmental Impact Policy Climate* (EPIC) oleh Izaurrealde dkk. pada tahun 2006 dan model *Simulation for Water Resouces in Rural Basins* (SWRB) yang dikembangkan oleh Arnold dan Wiliams pada tahun 1987.

Menurut Gassman dkk. (2007, dalam Mulyana 2012), model SWAT melakukan pemodelan pada berbagai jenis penutupan lahan, tanah, topografi, dan bentuk daerah aliran sungai (DAS). Dalam studi DAS, biasanya dilakukan klasifikasi berdasarkan tipe penutupan lahan yang dominan dan jenis tanah yang dominan. Perhitungan limpasan dilakukan dengan menggunakan metode *Soil Conservation Services* (SCS) dan modifikasi nilai *curve number* (CN), yang telah terbukti efektif pada berbagai tipe grup hidrologi. Model SWAT berbasis DAS ini bersifat kontinyu dengan langkah waktu harian, dirancang untuk mengelola sumber daya air, sedimentasi, dan limbah kimia dari pertanian dalam suatu DAS. Pemodelan SWAT dapat mensimulasikan dalam jangka waktu panjang secara efisien, dengan komponen model yang mencakup parameter cuaca, hidrologi, tanah, nutrisi, pestisida, bakteri patogen, dan sistem pengolahan tanah.

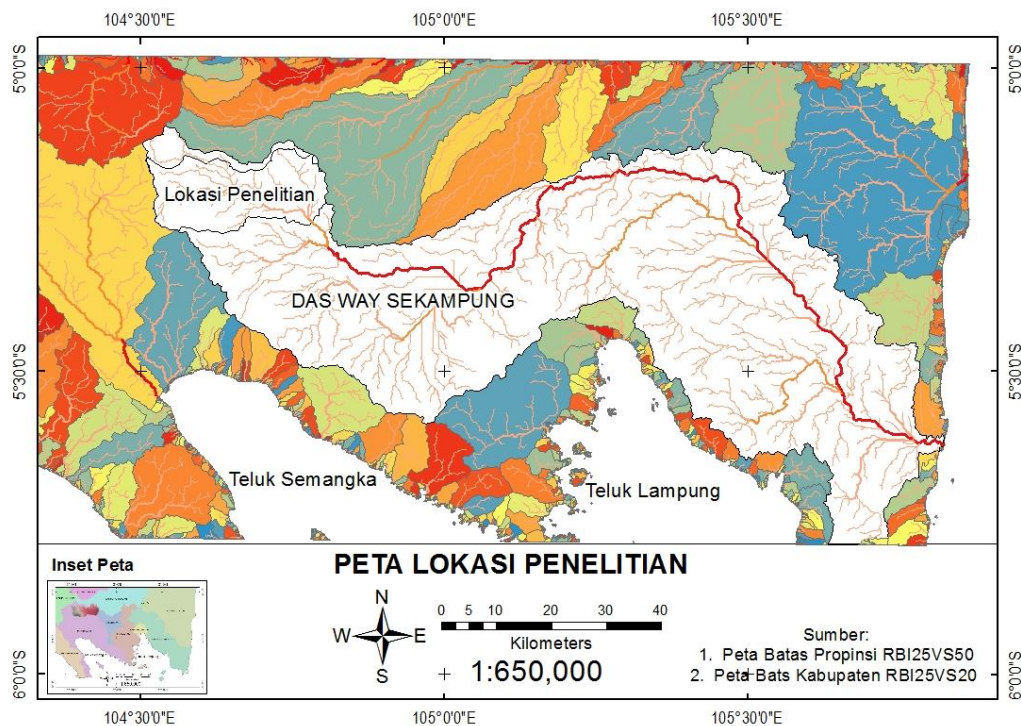
Luaran utama dari model SWAT mencakup kondisi hidrologi, yang terdiri dari nilai debit, erosi, dan sedimentasi yang terangkut. Nilai-nilai ini mencerminkan kondisi hidrologi yang berkaitan dengan kinerja daerah aliran sungai (DAS), seperti Koefisien Regim Sungai (KRS), *Sediment Delivery Ratio* (SDR), dan nilai *coefficient runoff* (C). Kinerja model dievaluasi melalui proses validasi, yang

meliputi kalibrasi dan verifikasi menggunakan kriteria statistik seperti R^2 (*Coefficient of Determination*), E_f atau NSE (*Nash-Sutcliffe model Efficiency*), serta PBIAS (*percent bias*) (Hidayat dkk., 2016).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari 2025 - 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 13).



Gambar 13. Lokasi Objek Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

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.

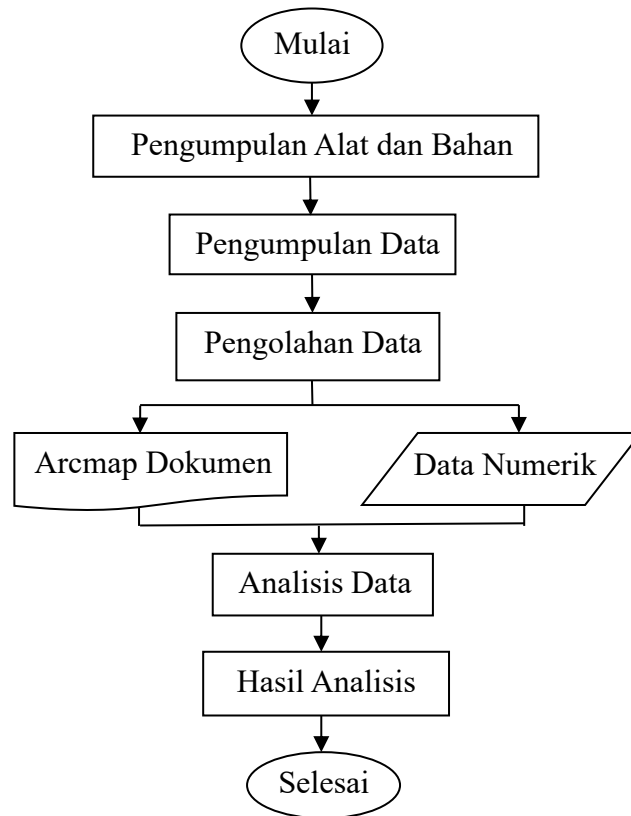
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder, yaitu data spasial yang dijelaskan pada Tabel 6.

Tabel 6. 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/portal-web/

3.3 Prosedur Penelitian

Kegiatan penelitian dilakukan mengikuti diagram alir sebagaimana disajikan pada Gambar 14.



Gambar 14. Diagram Alir Prosedur Penelitian

3.3.1 Tahap Pengolahan Data

Seluruh data yang sudah didapat kemudian diproses menjadi peta digital menggunakan *software* SNAP dan ArcMap.

1. Pembuatan Peta Tematik

Peta yang dibuat adalah sebagai berikut:

- 1). Peta Administrasi Kabupaten Tanggamus. Peta administrasi Kabupaten Tanggamus dibuat dengan cara mengekstrak batas wilayah Kabupaten Tanggamus dari peta digital administrasi Indonesia yang diperoleh dari laman https://gadm.org/download_country.html dengan nama file GADM41_IDN.shp menggunakan perangkat lunak ArcMap.
- 2). Peta Sebaran TSS (*Total Suspended Solid*), Peta sebaran TSS dihasilkan melalui pengolahan Citra Sentinel 2A dengan menggunakan metode NDWI

(*Normalized Difference Water Index*) dan algoritma untuk mengukur TSS menggunakan *software* SNAP.

- 3). Peta Kerapatan Vegetasi, Peta kerapatan vegetasi secara langsung diunduh melalui *website* Copernicus atau bisa juga dihasilkan melalui pengolahan Citra Sentinel 2A dengan menggunakan metode NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).
- 4). Peta Keterdapatan Air, peta keterdapatan air dihasilkan melalui pengolahan Citra Sentinel 2A dengan menggunakan metode NDWI (*Normalized Difference Water Index*).
- 5). Peta Batas dan karakteristik fisik DAS, merupakan output dari proses simulasi kondisi hidrologis daerah tangkapan waduk menggunakan perangkat lunak SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) yang terdapat di dalam ArcMap.

2. Simulasi Model SWAT

Analisis debit sungai, laju erosi, dan produksi sedimentasi dari sebuah DAS dilakukan menggunakan perangkat lunak SWAT berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai ekstensi tambahan dari perangkat lunak ArcGIS 10.2. Diagram tahapan pekerjaan disajikan pada Gambar 15, dan langkah-langkah yang dilakukan meliputi:

- 1) Analisis debit sungai
Tahap awal adalah menyiapkan database, yang mencakup data curah hujan dalam format (.txt) atau *text delimited* dan (.dbf) ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) dbase file, data penutup lahan (peta tata guna lahan), data jenis tanah dalam format (shp) atau ESRI *shape file* dan ESRI *Grid*; serta data kemiringan lahan dalam bentuk ESRI *Grid*.
- 2) Pembuatan batas DAS
Pada tahap ini, dilakukan pengaturan DEM, mendefinisikan sungai (*stream*), *outlet*, dan *inlet*.
- 3) *Overlay* terhadap jenis tata guna lahan, jenis tanah, dan batas DAS
- 4) Penentuan Distribusi HRU (*Hydrologic Response Unit*)

Pada tahap ini, distribusi HRU ditentukan dengan dua metode, yaitu penggunaan lahan dan jenis tanah yang dominan atau unit respons hidrologi ganda. Jika memilih model unit respons hidrologi ganda, perlu ditentukan batas ukuran minimum (*threshold*) untuk tata guna lahan dan jenis tanah.

5) Impor Data Iklim

Pada tahap ini, dilakukan impor data curah hujan. Data pengukuran ini dimasukkan ke dalam perangkat lunak ArcSWAT, yang bersifat opsional dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna (*custom database*). Tipe data yang digunakan adalah data tahunan.

6) Pengeditan ArcSWAT *input data*

Pada tahap ini, dilakukan pengeditan data, yaitu perbaikan parameter-parameter daerah tangkapan waduk sebelum proses simulasi ArcSWAT dilaksanakan. Beberapa data yang dapat diperbaiki meliputi: *input* sumber titik, debit inlet, reservoir, sub-basin, parameter tanah, serta input data untuk: pembangkit cuaca, sub-basin *general*, HRU *general*, pengeditan saluran utama, pengeditan air tanah, pengeditan penggunaan air, pengeditan manajemen, pengeditan kimia tanah, pengeditan kolam atau lahan basah, dan pengeditan kualitas aliran.

7) Pembacaan ulang parameter input

Dilakukan untuk memeriksa kembali parameter yang diperlukan. Pengguna software ArcSWAT dapat memilih data yang dibutuhkan untuk simulasi ArcSWAT.

8) Simulasi ArcSWAT

Pada tahap ini memungkinkan pengaturan beberapa langkah dalam proses *running*, yaitu:

- a. Periode Simulasi, menetapkan tanggal mulai dan akhir simulasi.
- b. *Rainfall*, *Runoff*, atau *Routing*, memilih apakah akan menggunakan interval waktu curah hujan, metode perhitungan *run off*, dan interval waktu routing.
- c. *Rainfall Distribution*, memilih distribusi yang akan digunakan untuk menghasilkan data hujan.

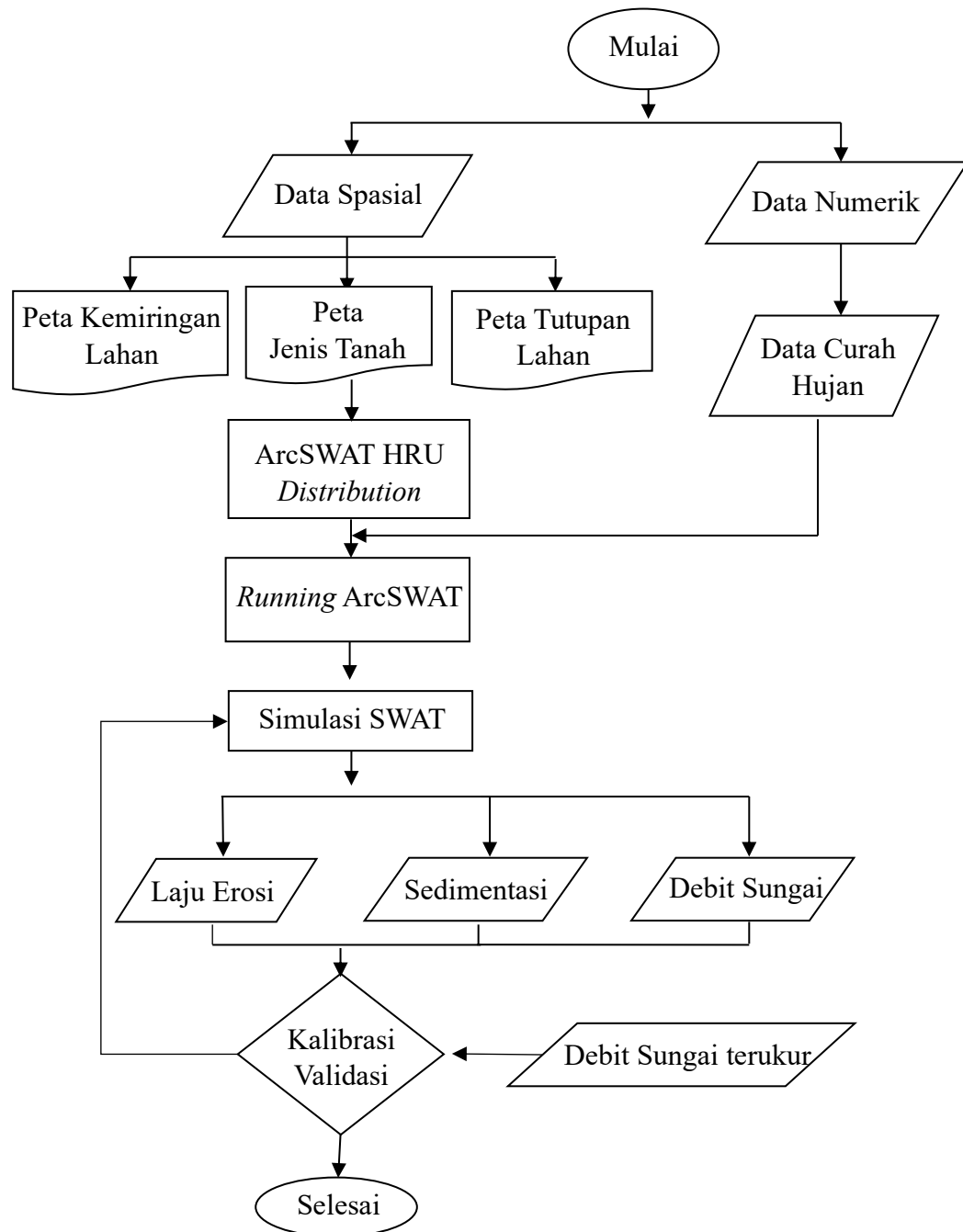
- d. *Potential ET Method*, memilih metode yang digunakan untuk menentukan *evapotranspiration potential* (PET).
 - e. *Channel Water Routing Method*, memilih metode yang digunakan untuk merutekan air dalam jaringan saluran daerah tangkapan waduk.
 - f. *Channel Dimension*, menunjukkan apakah dimensi saluran dapat berubah selama simulasi terkait dengan degradasi saluran.
 - g. *Print Out Frequency*, mengatur frekuensi output data yang dihasilkan, yaitu harian, bulanan, dan tahunan.
- 9) *Output* dari ArcSWAT mencakup hasil sebagai berikut:
- a. *Sub Basin Output File* (.bsb), menyediakan informasi mengenai setiap Sub-DAS atau ringkasan HRU untuk masing-masing Sub-DAS.
 - b. *Main Channel Output File* (.rch), berisi ringkasan informasi tentang muatan komponen-komponen DAS yang masuk dan keluar dari saluran.
 - c. *HRU Output File* (.hru), menyajikan ringkasan informasi mengenai HRU di dalam DAS.
- 10) Kalibrasi dan validasi data dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi model ArcSWAT dengan data hasil observasi menggunakan perangkat lunak SWAT-CUP.

Pendekatan *Universal Soil Lost Equation* (USLE)

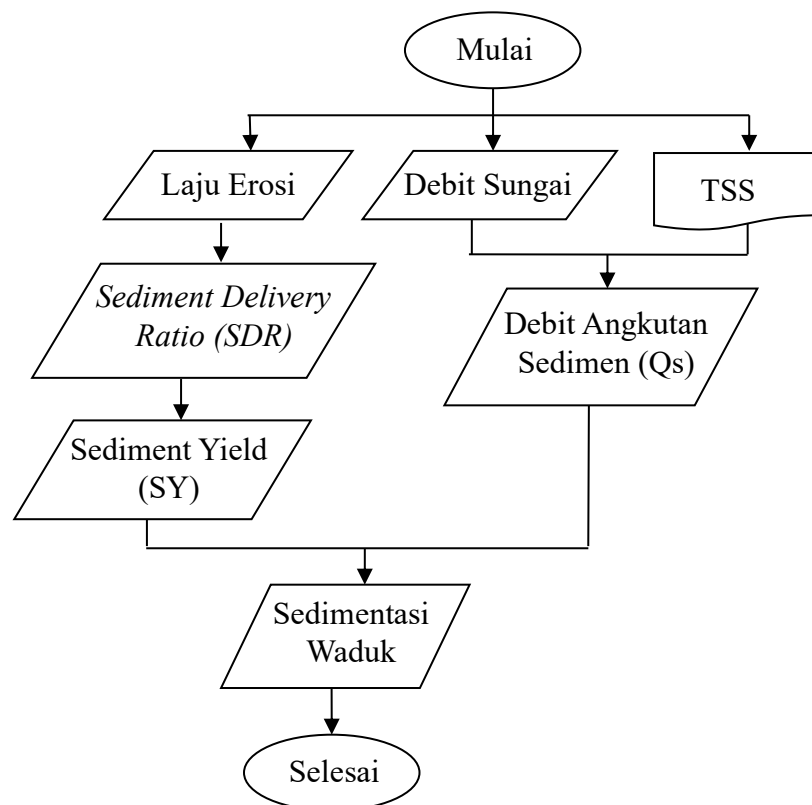
Langkah utama dalam menentukan kecepatan sedimentasi dengan pendekatan USLE adalah dengan melakukan delineasi daerah tangkapan Waduk Batutege, yang berfungsi sebagai batas area untuk menghitung laju sedimentasi di Waduk Batutege. Proses delineasi ini memanfaatkan data peta kontur yang terdiri dari garis kontur dan titik elevasi.

Delineasi daerah aliran sungai dimulai dengan pembuatan *Digital Elevation Model* (DEM) yang menggambarkan ketinggian permukaan bumi secara digital. Setelah DEM terbentuk, langkah selanjutnya adalah membuat raster arah aliran (*flow direction*) dan akumulasi aliran (*flow accumulation*). *Raster flow direction* menunjukkan arah aliran air berdasarkan perbedaan nilai elevasi antar piksel pada DEM, sementara *flow accumulation* menggambarkan akumulasi aliran air yang

berasal dari piksel raster *flow direction*. Daerah aliran sungai yang terbentuk didasarkan pada data *flow direction* dan titik *pour points*, yang merupakan titik-titik di mana aliran air mengalir, ditentukan di hulu serta pada pertemuan cabang sungai. Sungai yang terbentuk berasal dari *raster flow accumulation* (Cahyono dkk., 2017). Pembentukan *watershed* ini digunakan untuk menentukan nilai prediksi laju erosi berdasarkan parameter dalam persamaan USLE.



Gambar 15. Diagram Alir Running SWAT dan Kalibrasi Model



Gambar 16. Diagram Alir Analisis Sedimentasi Waduk Batutege

3.3.2 Analisis dan Interpretasi Data

Analisis dilakukan pada area Waduk Batutege. Analisis dan interpretasi data ini menggunakan *software* ArcMap dan SNAP (*sentinel application system*). Terdapat beberapa tahapan analisis pada penelitian ini, antara lain sebagai berikut:

3.3.2.1 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. Shen dan Li (2010), memperkenalkan WRI sebagai metode untuk mengidentifikasi badan air menggunakan citra satelit. Indeks ini memanfaatkan empat pita spektral, yaitu dengan membandingkan jumlah reflektansi dari dua pita

tampak (*Green* dan *Red*) terhadap jumlah reflektansi dari pita inframerah dekat (NIR) dan inframerah gelombang menengah (SWIR). Teknik ini hanya dapat diterapkan pada citra satelit yang menyertakan pita inframerah gelombang menengah (Shen dan Li, 2010).

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

Keterangan:

Band Green = reflektansi panjang gelombang hijau (*Band 3*)

Band Red = reflektansi panjang gelombang merah (*Band 4*)

Band NIR = reflektansi panjang gelombang *Near Infrared* (NIR) (*Band 8*)

Band SWIR = reflektansi inframerah gelombang menengah (SWIR) (*Band 11*)

Tabel 7. Klasifikasi Nilai Kebasahan WRI

Klasifikasi WRI	Keterangan
$-1 < WRI < 0$	Non Badan Air
$0 < WRI < 0,33$	Kebasahan Sedang
$0,33 < WRI < 1$	Kebasahan Tinggi

Sumber: Febrianti (2019).

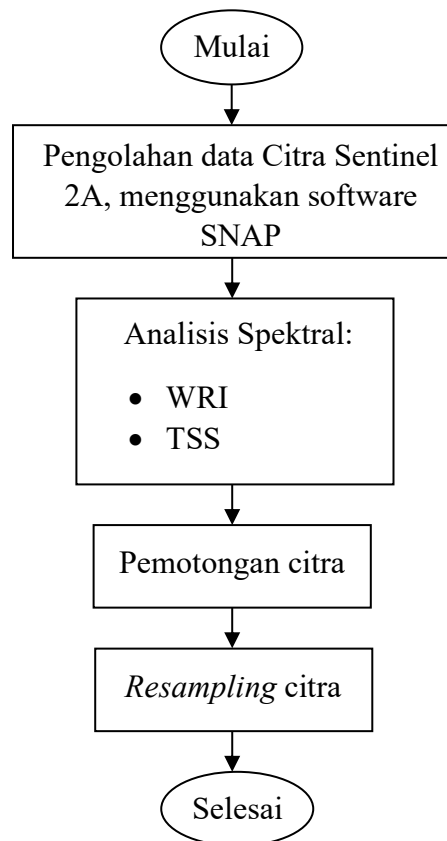
Total Suspended Solid (TSS) merupakan indikator penting untuk menilai kualitas air sungai, yang mencakup partikel padat seperti lumpur, pasir, dan bahan organik yang tersuspensi dalam air. Kadar TSS dipengaruhi oleh erosi tanah, limpasan permukaan, dan aktivitas manusia, yang dapat mengurangi penetrasi sinar matahari, menghambat fotosintesis, dan menurunkan kadar oksigen terlarut yang penting bagi kehidupan akuatik (Dhani, 2023). Algoritma yang diterapkan untuk mengukur nilai TSS menggunakan Persamaan 2 (Cabezas dkk., 2021)

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

Keterangan:

Band Green = reflektansi panjang gelombang hijau (*Band 3*)

Band Red = reflektansi panjang gelombang merah (*Band 4*)



Gambar 17. Diagram alir Analisis WRI dan TSS

3.3.2.2 Analisis Kerapatan Vegetasi

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) merupakan indeks vegetasi yang paling sering digunakan untuk pemantauan vegetasi. Algoritma NDVI diperoleh dari rasio pengurangan antara *Band Red* dan *Band Near Infrared* (NIR) pada citra penginderaan jauh, sehingga memungkinkan penentuan indeks "kehijauan" vegetasi. Indeks vegetasi NDVI dihitung berdasarkan nilai per-pixel dari selisih normalisasi antara pita merah dan inframerah dekat dalam citra tersebut. Dengan menggunakan Citra Sentinel 2A, tingkat kerapatan vegetasi Kabupaten Tanggamus dapat diunduh di *website* Copernicus atau dengan menggunakan

algoritma yang diterapkan untuk mengukur kehijauan suatu wilayah menggunakan Persamaan 3 (Hanif, 2015).

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

Keterangan:

Band NIR = reflektansi panjang gelombang *Near Infrared* (NIR) (*Band 8*)

Band Red = reflektansi panjang gelombang merah (*Band 4*)

Tabel 8. Klasifikasi nilai kerapatan vegetasi

Klasifikasi NDVI	Keterangan
$-1 < NDVI < -0,03$	Lahan tidak bervegetasi
$0,5 < NDVI < 0,25$	Kehijauan rendah
$0,35 < NDVI < 1$	Kehijauan tinggi

Sumber: Peraturan menteri kehutanan Republik Indonesia (2012).

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tingkat kerapatan vegetasi pada Daerah Aliran Sungai (DAS), pulau-pulau, dan sendapan Waduk Batutegi berdasarkan hasil analisis citra sentinel 2A, dapat diklasifikasikan ke dalam 3 (tiga) kelas, yaitu kelas 1 (kerapatan vegetasi rendah), kelas 2 (kerapatan vegetasi sedang), dan kelas 3 (kerapatan vegetasi tinggi). Hingga saat ini penurunan Kerapatan Tinggi mencapai 37,41% sejalan dengan peningkatan Kerapatan Sedang dan Rendah masing-masing sebesar 66,16 dan 339,32% dari kondisi tahun 2015 – 2024.
2. Nilai dugaan *Total Suspended Solid* (TSS) yang masuk ke dalam Waduk Batutegi, dapat diklasifikasikan ke dalam 3 (tiga) kelas, yaitu kelas 1 (TSS ringan), kelas 2 (TSS sedang), dan kelas 3 (TSS tinggi). Dengan nilai TSS tertinggi di tahun 2018 mencapai 13,76 - 14,51 mg/l.
3. Besarnya beban sedimentasi yang masuk ke dalam Waduk Batutegi berdasarkan hasil simulasi model SWAT diketahui merupakan akumulasi sedimentasi dari Sub DAS 68, 71, 72, 73, 74, dan 75. Sedimentasi terbesar terjadi pada Sub DAS 71, yang dimana berdasarkan tutupan lahan merupakan pertanian lahan kering, dengan kemiringan lahan sebesar >25%, dan jenis tanahnya aluvial, andosol, dan regosol. Dengan nilai sedimentasi tertinggi pada tahun 2018 mencapai 170,82 ton/tahun.

5.2 Saran

Untuk peneliti selanjutnya agar 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 awan di area yang tertutup awan di daerah penelitian dan untuk meningkatkan validitas hasil analisis, sebaiknya dilakukan verifikasi dengan data observasi lapangan, baik untuk nilai NDVI, WRI, maupun pengukuran sedimentasi aktual.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurachman, A. 1989. *Rainfall Erosivity and Soil Erodibility in Indonesia: Estimation and Variation with Time*. University of Ghent, Belgium.
- Ali, M. 2017. Kualitas fisika dan kimia air waduk Batutegi Lampung. *Kinetika*, 8(2), 25-32.
- Amin, M. 2015. Simulasi Tata Guna Lahan untuk Pengelolaan DAS Garang Jawa Tengah. (Disertasi). Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada.
- Andini, V. M., Ira, M. A., & Yunia, W. 2015. Studi Persebaran Total Suspended Solid (TSS) Menggunakan Citra Aqua Modis di Laut Senunu, Nusa Tenggara Barat. *Geoid*, 204-213.
- Aprizal, A., & Fitriyansyah, H. 2013. Optimization Utilization of Water Resourcesdam Batutegi Usingmethod of Linear Program. In *International Conference on Engineering and Technology Development (ICETD)*.
- Arifin, D. R. F. 2023. Analisis Citra Sentinel 2 Dengan Metode Normalized Difference Vegetation Index Untuk Mengetahui Ketersediaan Ruang Terbuka Hijau di Kota Bandar Lampung Tahun 2022.
- Arsyad, S. 2010. *Konservasi Tanah dan Air*. Institut Pertanian Bogor, Bogor: IPB Press.
- Asdak, S. 1995. Hidrologi & Pengelolaan Daerah Aliran Sungai
- Asdak, C., 2004, Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Banuwa, I.S. 2008. Pengembangan Alternatif Usahatani Berbasis Kopi untuk Pembangunan Pertanian Lahan Kering Berkelanjutan di DAS Sekampung Hulu. *Disertasi*. Sekolah Pasca Sarjana. Institut Pertanian Bogor.
- Banuwa, I. S. 2013. *Erosi*. Prenadamedia Group. Jakarta.
- Bewket, W., & Stroosnijder, L. 2003. *Effect of agroecological land use succession on soil properties in Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia*. *Geoderma*, 111(1-2), 85–98.

- Bioresita, F., Cherie, B. P., Hana, S. F., Teguh, H., & Anne, P. 2018. The Use of Sentinel-2 Imagery For Total Suspended Solids (TSS) Estimation in Porong River, Sidoarjo. *Elipsoida*, 1-6.
- Cahyono, B. K., Hakim, L., Waljiyanto, W., & Adhi, A. D. 2017. Perhitungan Kecepatan Sedimentasi Melalui Pendekatan Usle dan Pengukuran Kandungan Tanah dalam Air Sungai yang Masuk ke dalam Waduk Sermo. *Jurnal Nasional Teknologi Terapan*, 1(1), 8-23.
- 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,.
- Departemen Kehutanan. 2009. *Pedoman Monitoring dan Evaluasi Daerah Aliran Sungai*. Direktorat Jenderal Rehabilitasi Lahan, Jakarta.
- Deri, R. K. 2023. Monitoring Kondisi Pertumbuhan Mangrove Kecamatan Labuhan Maringgai Kabupaten Lampung Timur. *Digilib Unila*.
- Dhani, P. R. R., Hendrayana, H., Hidayati, N. V., & Haryati, A. 2023. Konsentrasi Limbah Pencemar MBAS (Methylen Blue Active Substance) pada Perairan Muara Kali Ijo, Kabupaten Kebumen. *MAIYAH*, 2(3), 181-190.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., & Bargellini, P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36.
- ESA (European Space Agency). 2015. *Sentinel-2 User Handbook*. Europe: European Space Agency. 1.
- Febrianti, N., Murtlaksono, K. & Barus, B., 2019. *Pengaruh Tinggi Muka Air Gambut Sebagai Indikator Peringatan Dini Bahaya Kebakaran Di Sungai Jangkang - Sungai Liong*. Penginderaan Jauh dan Pengolahan Data Citra Digital, 1 Juni, Volume 16, pp. 9- 19.
- 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.
- Gunawardana, C., & McDonald, W. 2024. Impacts of land use changes on discharge and water quality in rivers and streams: Case study of the

- continental United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 60(3), 725-740.
- Hadi RMP, T Sutikto dan C Bowo. 2019. Indeks Produktivitas Dasar Berbasis Soil Taxonomy dan Korelasinya dengan Produktivitas Kopi pada Beberapa Ordo Tanah. *Jurnal Ilmu Tanah Lingkungan* 21(1): 7-12.
- 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 Batutegei 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 Batutegei Untuk Mengurangi Sedimentasi." *Jurnal Sumberdaya Lahan*, vol. 6, no. 1.
- Hidayat, L., P., Sudira, S., Susanto, R., Jayadi. 2016. Validasi Model Hidrologi SWAT di Daerah Tangkapan Air Waduk Mrica. *Jurnal AGRITECH*. 36:467-474.
- Insyani, R. S. 2010. *Dasar-dasar Penginderaan jauh*. Semarang: Alprin.
- Jia, K., Liang, S., Wei, X., Yao, Y., & Su, Y. 2020. Relationship between vegetation coverage and soil erosion in mountainous areas. *Catena*, 195, 104837.
- Julianto, F. D. 2021. Analisis sebaran potensi kekeringan dengan cloud computing platform di Kabupaten Grobogan. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 1(1).
- Karina, S. 2022. Pengembangan Geographic Information System (GIS) Guna Pengelolaan Komoditas Tanaman Cabai. *Jurnal Informatika Terpadu* 8(1) : 78-84.
- Kementrian Keungan Indonesia. 2010, 10 Juli. Bendungan Batutegei. Diakses pada 23 November 2024, melalui <https://www.djkn.kemenkeu.go.id/berita/baca/2138/Bendungan-Batutegei.html>
- Kironoto, B. A. 2003. Transpor Sedimen. PPS-Teknik Sipil, Yogyakarta.
- Miller, J. D., & Hutchins, M. 2017. The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 345-362.
- Mohammad, B., 2009, Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Malang: Penerbit Percetakan CV. Asrori.

- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation* (3rd ed.). Oxford: Blackwell Publishing.
- Mulyana, N. 2012. Analisis Luas Tutupan Hutan Terhadap Ketersediaan Green Water dan Blue Water di Sub DAS Gumbasa dan Sub DAS Cisadane Hulu Dengan Aplikasi Model SWAT. (Disertasi). Sekolah Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Nugroho, P. 2015. Model Soil Water Assesment Tool (SWAT) Untuk Prediksi Laju Erosi dan Sedimentasi Di Sub DAS Keduang Kabupaten Wonogiri. (Skripsi). Fakultas Geografi, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Nurgiantoro. 2016. Monitoring Kawasan Perairan Pesisir Akibat Penambangan Emas Rakyat Menggunakan Data Citra Satelit Multi Temporal. *Tesis*.
- Octaviana, A., Prasetyo, Y., & Amarrohman, F. J. 2020. Analisis Perubahan Nilai Total Suspended Solid Tahun 2016 Dan 2019 Menggunakan Citra Sentinel 2a (Studi Kasus: Banjir Kanal Timur, Semarang). *Jurnal Geodesi Undip*, 9(2), 167-176.
- Peraturan Pemerintah Nomor 37 Pasal 1 Tahun 2010. Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 37 Tahun 2010 tentang Bendungan. Diakses pada 23 November 2024, melalui <https://peraturan.bpk.go.id/Details/5049>
- Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor : P.31/Menhut-II/2012 tentang Lembaga Konservasi. Diakses pada 20 November 2024, melalui [P.31_menhut_II_2012_Lembaga_Konservasi .pdf](#)
- Prahasta E. 2009. Sistem Informasi Geografis. Konsep – Konsep Dasar (Perspektif Geodesi dan Geomatika). *Informatika*. Bandung.
- Prahasta, E. 2014. Sistem Informasi Geografis: Konsep Dasar Perspektif Geodesi & Geomatika. *Informatika, Bandung*.
- Rahmadana, A. 2013. Studi Pengaturan Air Untuk Meningkatkan Kinerja Waduk Batuteji. *Universitas Gadjah Mada*, Yogyakarta.
- Ridwan. 2014. Integrasi Pola Operasi Bendungan dan Bendung Berbeda Basis Waktu untuk Kebutuhan Irigasi. *Disertasi*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta
- S. K. Mcfeeters. 1996. “The Use Of The Normalized Difference Water Index (Ndwi) In The Delineation Of Open Water Features,” *Int J Remote Sens*, Vol. 17, No. 7, Pp. 1425–1432, 1996.
- 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.

- Setyawan, R. H., & Irawan, D. E. 2022. Analisis Hubungan Total Suspended Solid (TSS) dan Laju Sedimentasi di DAS Tondano Menggunakan Citra Satelit. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 14(2), 75–83.
- 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.
- Sumardi, M. A., Hendratta, L. A., & Halim, F. 2018. Analisis Angkutan Sedimen Di Sungai Air Kolongan Kabupaten Minahasa Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 6(12), 1043-1054.
- Suprayogi, B., Ritung, S., & Agus, F. 2021. Erosi dan Sedimentasi: Kajian dan Pengelolaan pada Lahan Pertanian. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 23(1), 47–55.
- Suryanti, S., & Farda, N. M. 2015. Aplikasi Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis untuk Pemetaan Kerawanan Longsor Lahan di Kabupaten Temanggung. *Jurnal Bumi Indonesia*, 4(4), 228290.
- Tatipata, W. H., I., Soekarno, A., Sabar, S., Legowo. 2015. Analisis Volume Sedimen Yang Mengendap Setelah T-Tahun Waduk Beroperasi (Studi Kasus: Waduk Cirata). *Jurnal Teknik Sipil*. 22:No. 3.
- Utomo, A. B., Hadi, S. P., & Widiatmaka. 2021. *Analisis laju erosi pada perubahan penggunaan lahan menggunakan pendekatan RUSLE dan SIG di Sub DAS Cisadane Hulu*. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 23(2), 109–120.
- Wischmeier W.H., & Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Lossess: A guide to Conservation Planning USDA. Washington DC.
- Wuryanta A., Susanti P. D. 2014. Analisis Spasial Tekanan Penduduk Terhadap Lahan Pertanian di Sub DAS Kedaung Kabupaten Wonogiri Jawa Tengah. *Jurnal Penelitian Sosial Ekonomi Kehutanan* Volume 12 Nomor 3 Desember 2015. Surakarta.
- Wibowo, K. M., I., Kanedi, J., Jumadi. 2015. Sistem Informasi Geografis (SIG) Menentukan Lokasi Pertambangan Batu Bara di Provinsi Bengkulu Berbasis Website. *Jurnal Media Infotama*. 11:No. 1.
- Zuma, D. S., Murtalaksono, 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.