

Arahan Penutupan Lahan Daerah Aliran Sungai Batu-batu sebagai Upaya Mitigasi Pendangkalan Danau Tempe

*Chaeria Anila¹, Marleny Dara², Muhammad Dahri Syahbani Rusman³, Sri Batara Nurfajri Arisaputri⁴

¹) Program Studi Arsitektur Bangunan Gedung, Politeknik Negeri Samarinda, Indonesia

²) Program Studi Ilmu Tanah, Universitas Papua, Indonesia

³) Program Studi Teknik Perencanaan Wilayah dan Kota, Universitas Sulawesi Barat, Indonesia

⁴) Departemen Arsitektur dan Perencanaan, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

*Corresponding Author, Email: chaeriaanila@polnes.ac.id

Abstrak

Ekosistem Danau Tempe merupakan salah satu danau prioritas nasional yang perlu diselamatkan karena tingkat kerusakannya berupa sedimentasi yang cukup tinggi dan merupakan ekosistem yang sangat berpengaruh terhadap ketahanan ekonomi serta ketahanan sosial dan sumber kehidupan masyarakat di wilayah sekitarnya. Pendangkalan yang terjadi di Danau Tempe secara alami diakibatkan oleh sedimen yang dibawa oleh sungai-sungai yang bermuara di danau salah satunya adalah sungai Batu-Batu. Penelitian Oseanologi dan Limnologi menyatakan bahwa akumulasi endapan Total Suspended Solids (TSS) tertinggi di Danau Tempe terjadi di muara sungai Batu-Batu. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besaran nilai sedimentasi pada DAS Batu-Batu. Dengan mengetahui tingkat sedimentasi maka dapat dilakukan alternatif mitigasi dan skenario yang sesuai untuk DAS Batu-Batu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi sedimen dan merumuskan arahan penggunaan lahan yang tepat sebagai mitigasi sedimentasi. Simulasi untuk mengetahui akumulasi sedimen dilakukan dengan menggunakan analisis hidrologi Soil and Water Assesment Tool (SWAT). Sedangkan arahan penutupan lahan dilakukan dengan mempertimbangkan daerah dengan kelas sedimen berat dan sangat berat, kelas kemampuan lahan, kondisi penutupan lahan tahun 2020 dan rencana Pola Ruang Tahun 2032. Hasil simulasi berdasarkan tahun 2020 menunjukkan bahwa pada tahun 2020 nilai sedimen yang dihasilkan cukup tinggi sebanyak 1.233.509,04 ton/tahun. Penambahan nilai sedimen pada tahun 2032 sebesar 30,10% dari kondisi aktual. Setelah dilakukan arahan nilai sedimen berkurang sebesar 66,17%. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa arahan yang telah dibuat dapat menjadi bahan pertimbangan dalam membuat Rencana Tata Ruang Wilayah kedepannya.

Kata kunci: Arahan Penutupan Lahan, Soil and Water Assesment Tool (SWAT), Sedimen

Abstract

The Lake Tempe ecosystem is one of Indonesia's national priority lakes that requires restoration due to severe sedimentation. The lake plays an important role in supporting regional economic resilience, social sustainability, and community livelihoods. The natural shallowing of the lake is caused by sediment transported by rivers flowing into the lake, including the Batu-Batu River. Previous oceanographic and limnological studies identified the highest accumulation of Total Suspended Solids (TSS) at the Batu-Batu River estuary. This study aims to analyze sediment conditions and formulate appropriate land-use directions as a sedimentation mitigation strategy in the Batu-Batu Watershed. Sediment accumulation was simulated using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model. Land-use recommendations were developed by considering areas with heavy and very heavy sedimentation classes, land capability classes, 2020 land cover conditions, and the 2032 Spatial Pattern Plan. The simulation results show that sediment production in 2020 reached 1,233,509.04 tons/year, indicating a high sedimentation rate. Under the 2032 spatial planning scenario, sediment yield is

projected to increase by 30.10% compared to existing conditions. However, the proposed land-use directions could reduce sediment yield by 66.17%. These findings indicate that the proposed land-use strategy can be considered in future regional spatial planning and watershed management policies.

Keywords: Land use direction, Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Sediment

I. PENDAHULUAN

Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan aspek krusial dalam konservasi sumber daya air untuk melindungi kualitas lingkungan. Salah satu tantangan utama dalam pengelolaan DAS adalah perubahan penggunaan lahan yang tidak terkendali, seperti perambahan hutan, penebangan liar di daerah hulu sungai, pembangunan pemukiman, dan infrastruktur, serta transformasi lahan vegetasi menjadi penggunaan lahan yang lain (Anwar et al., 2011). Perubahan penggunaan lahan untuk keperluan pembangunan merupakan salah satu faktor yang paling berpengaruh pada perubahan lingkungan secara global.

Perubahan penutupan lahan di kawasan tangkapan Danau Tempe menunjukkan adanya peningkatan aktivitas budidaya dan penurunan kualitas tutupan vegetasi alami dari waktu ke waktu. Penelitian Nasrullah dan Kartiwa (2012) terkait perubahan tutupan lahan pada DAS inlet Danau Tempe menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan yang terjadi pada periode 1994–2002 berdampak terhadap peningkatan sedimentasi dan penurunan fungsi tata air DAS. Perubahan tersebut ditandai dengan berkurangnya area vegetasi dan meningkatnya lahan budidaya pada kawasan tangkapan air Danau Tempe. Perubahan ini berdampak signifikan terhadap kondisi hidrologi DAS, khususnya saat musim hujan ketika lahan tidak mampu menyerap air secara maksimal, yang mengakibatkan limpasan air berlebihan. Hal ini mengarah pada degradasi lingkungan seperti erosi tanah dan sedimentasi (Hutyra et al., 2011). Sedimentasi yang terjadi dapat merusak struktur infrastruktur air seperti waduk, serta mempengaruhi ekosistem perairan seperti danau dan sungai (Chen et al., 2020).

Dalam skala global, Li et al. (2021) mengkonfirmasi bahwa deforestasi dan konversi lahan hutan menjadi areal pertanian meningkatkan limpasan permukaan secara signifikan, yang pada gilirannya memperbesar beban sedimen yang masuk ke badan air. Sementara itu, Rahman et al. (2022) dalam kajiannya di Asia Tenggara menunjukkan bahwa danau-danau yang berfungsi sebagai sumber penghidupan masyarakat mengalami laju sedimentasi yang terus meningkat seiring dengan intensifikasi pertanian di daerah tangkapan air hulunya. Kondisi ini analog dengan situasi Danau Tempe yang menghadapi tekanan sedimentasi dari DAS-DAS sekitarnya, termasuk DAS Batu-Batu, dengan laju sedimentasi yang telah terdokumentasi sebesar 1,0–3,0 cm per tahun.

Salah satu contoh ekosistem yang terdampak secara signifikan adalah Danau Tempe, yang merupakan prioritas nasional untuk konservasi. Menurut Puslit Limnologi LIPI (2011 dalam BLHD, 2012a), laju sedimentasi di Danau Tempe yaitu sebesar 1,0 – 3,0 cm per tahun. Sedimentasi yang terjadi secara terus menerus dari tahun ke tahun menyebabkan terjadinya pendangkalan pada danau. Pendangkalan yang terjadi di Danau Tempe secara alami diakibatkan oleh sedimen yang dibawa oleh sungai-sungai yang bermuara di danau seperti sungai Lawo, sungai Batu-Batu, sungai Belokka, sungai Bila dan Walanae. Terjadinya pendangkalan tersebut mengakibatkan penurunan kapasitas tampung Danau Tempe dan memicu terjadinya bencana banjir di kawasan sekitarnya (Kementerian Lingkungan Hidup, 2014).

Penelitian Oseanologi dan Limnologi di Indonesia yang dilakukan oleh Pusat Penelitian Limnologi LIPI Tahun 2016, meneliti kondisi Danau Tempe pada 3 zona berdasarkan DAS yang melingkupinya. Laju sedimentasi di Danau Tempe berkisar antara 1,0 hingga 3,0 cm per tahun. Zona I (Zona Batu-Batu) berbentuk teluk dengan luas 7.230,94 ha, Zona II (Zona Sidenreng)

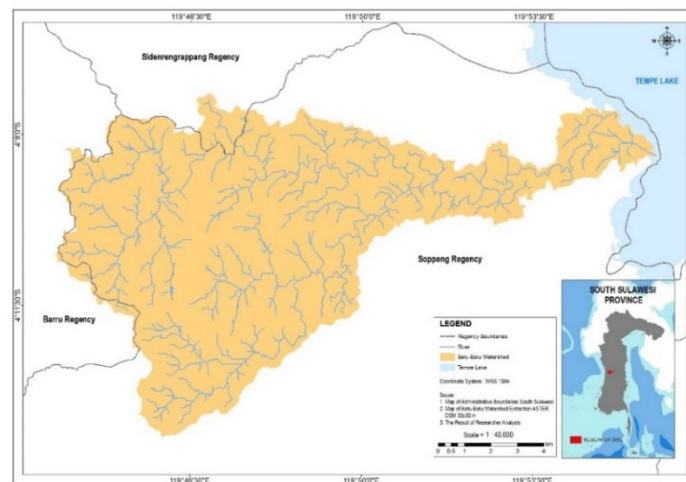
berbentuk teluk dengan luas 416,06 ha, dan Zona III (Zona Bila) berbentuk teluk dengan luas 2.919,86 ha. DAS Batu-Batu, salah satu sumber utama sedimentasi, menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Penelitian tersebut mengidentifikasi bahwa muara sungai Batu-Batu merupakan titik dengan akumulasi tertinggi endapan Total Suspended Solids (TSS) di Danau Tempe. Namun, volume sedimentasi yang dihasilkan masih memerlukan penelitian lebih lanjut untuk dapat diprediksi dengan akurat (Harsono, 2016).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besaran sedimen yang dihasilkan DAS Batu-Batu yang menjadi salah satu penyuplai sedimen terbesar untuk Danau Tempe. Dengan pemahaman yang lebih dalam terhadap besaran sedimentasi, diharapkan dapat dirumuskan strategi pengelolaan lahan yang efektif untuk mengurangi dampak negatif terhadap Danau Tempe serta mempertahankan keberlanjutan ekosistemnya. Penelitian ini akan menggunakan hasil analisis SWAT sebagai dasar untuk merumuskan arahan penggunaan lahan, mengintegrasikan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) serta mempertimbangkan kelas kemampuan lahan, sehingga dapat menghasilkan kebijakan yang tepat dan berkelanjutan dalam pengelolaan DAS Batu-Batu.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan dukungan analisis spasial dan pemodelan hidrologi. Pendekatan ini dipilih karena sesuai untuk menjawab tujuan penelitian yang berfokus pada analisis perubahan penggunaan lahan terhadap besaran sedimen yang dihasilkan serta penyusunan arahan penggunaan lahan yang lebih efektif dalam mengurangi sedimentasi di Danau Tempe. Melalui pendekatan ini, hubungan antara faktor biofisik DAS, perubahan penggunaan lahan, dan dinamika sedimentasi dapat dianalisis secara terukur dan sistematis. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada integrasi analisis perubahan penutupan lahan, pemodelan hidrologi SWAT, serta penyusunan arahan penggunaan lahan berbasis kemampuan lahan dan RTRW dalam konteks mitigasi pendangkalan Danau Tempe. Penelitian sebelumnya umumnya hanya berfokus pada identifikasi tingkat sedimentasi atau kondisi kualitas lingkungan Danau Tempe, tanpa mengaitkan secara komprehensif hubungan antara dinamika perubahan penggunaan lahan di DAS Batu-Batu dengan besaran sedimen yang dihasilkan.

Penelitian dilakukan di DAS Batu-Batu yang secara administratif berada di Kabupaten Soppeng dan Kabupaten Sidenreng Rappang, Provinsi Sulawesi Selatan. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada perannya sebagai salah satu sub DAS yang berkontribusi terhadap sedimentasi di Danau Tempe.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Metode penelitian dibagi ke dalam dua tahapan utama, yaitu tahapan pengumpulan data dan tahapan analisis data.

II.1. Tahapan Pengumpulan Data

Data yang akan digunakan dalam penelitian ini antara lain Data Digital Elevation Model (DEM), peta penutupan lahan tahun 2008, tahun 2014, dan tahun 2020, peta jenis tanah, data iklim, peta Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Soppeng dan Kabupaten Sidrap, hasil proyeksi penggunaan lahan tahun 2032, dan hasil proyeksi iklim tahun 2030an. Data yang dikumpulkan merupakan data input dalam analisis model SWAT nantinya. Data proyeksi penggunaan lahan tahun 2032 dalam penelitian ini tidak dihasilkan secara langsung, melainkan mengacu pada hasil penelitian sebelumnya yang menggunakan model Cellular Automata-Markov (CA-Markov). Sedangkan untuk proyeksi iklim diperoleh dengan melakukan simulasi menggunakan software Statistical Downscaling Correction for Climate Scenarios (SiBiaS) versi 1.1. Proyeksi dilakukan dengan metode delta menggunakan skenario RCP4.5 dan model GCM CSIRO Mk3.6.0. Data curah hujan yang telah disesuaikan digunakan sebagai input untuk menghasilkan proyeksi kondisi iklim periode 2030-an yang kemudian menjadi bagian dari input model hidrologi.

II.2. Tahapan Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan, dimulai dari proyeksi penggunaan lahan dan iklim, dilanjutkan dengan simulasi hidrologi, hingga penyusunan arahan penggunaan lahan berbasis hasil sedimentasi.

Tahapan analisis data dalam penelitian ini menggunakan pemodelan hidrologi Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Proses ini meliputi deliniasi batas DAS menggunakan data DEM, pembentukan Hydrological Response Unit (HRU) melalui overlay penggunaan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng, serta input data iklim harian. Model kemudian dijalankan untuk menghasilkan output berupa aliran dan sedimen pada masing-masing sub DAS. Untuk memastikan keandalan model, dilakukan kalibrasi dan validasi menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan Nash-Sutcliffe Index (NSI), dengan kriteria kelayakan model mengacu pada nilai NSI.

Selanjutnya dilakukan analisis hasil sedimentasi berdasarkan output model SWAT yang mengacu pada persamaan Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE). Hasil sedimentasi yang diperoleh kemudian diklasifikasikan ke dalam beberapa kelas untuk memudahkan interpretasi tingkat erosi dan sedimen pada setiap sub-DAS. Klasifikasi tingkat sedimentasi dalam penelitian ini mengacu pada kategori yang disajikan pada tabel berikut.

Tabel 1. Klasifikasi Sedimen

No	Muatan Sedimen (ton/ha/tahun)	Keterangan
1	≤ 5	Sangat Rendah
2	$> 5 - \leq 10$	Rendah
3	$> 10 - \leq 15$	Sedang
4	$> 15 - \leq 20$	Tinggi
5	> 20	Sangat Tinggi

Sumber: Peraturan Menteri Kehutanan RI No. P61/Menhut.II/2014

Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, dilakukan penyusunan arahan penggunaan lahan dengan mempertimbangkan tingkat sedimentasi, kondisi penggunaan lahan aktual, serta kebijakan RTRW. Sub DAS dengan tingkat sedimentasi tinggi menjadi prioritas dalam penentuan arahan penggunaan lahan. Penentuan arahan ini juga memperhatikan kelas kemampuan lahan untuk

memastikan kesesuaian pemanfaatan ruangnya.

Tahap akhir adalah simulasi ulang menggunakan skenario arahan penggunaan lahan yang telah disusun. Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan tingkat sedimentasi setelah dilakukan intervensi penggunaan lahan. Hasil dari tahapan ini digunakan untuk menilai efektivitas arahan yang diusulkan dalam mengurangi sedimentasi di DAS Batu-Batu.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

III. 1. Simulasi dan Validasi

Periode waktu simulasi model pada penelitian ini dipilih pada rentang waktu yang ketersediaan datanya lengkap. Periode model SWAT dilakukan selama sepuluh tahun, yaitu pada rentang waktu tahun 2011-2020 sesuai dengan ketersediaan data yang ada.

III.1.1. Proses Deliniasi Sub DAS

Pembentukan Sub-DAS atau biasa disebut dengan deliniasi dilakukan secara otomatis (Automatic Watershed Delineation – AWD). Tahapan analisis ini dilakukan menggunakan tools AWD yang terdapat di SWAT sebelum melakukan penentuan HRU. Delineasi menggunakan data DEM akan menghasilkan DAS beserta pembagian Sub-DAS yang menyusunnya. Pada penelitian ini digunakan nilai ambang batas (*threshold*) 300 ha. Pemilihan *threshold* mengacu pada hasil penelitian (Ardiansah, 2021) yang mengatakan bahwa semakin kecil *threshold* yang digunakan, maka kinerja model akan lebih baik selama masih dalam rentang *threshold* yang diberikan oleh model. Rentang *threshold* yang disarankan pada simulasi model SWAT DAS Batu-Batu adalah 133–26.607 ha. Batas terendah dari rentang tersebut merupakan batas optimum *threshold* pada proses deliniasi DAS. Jumlah Sub-DAS yang dihasilkan dari proses simulasi sebanyak 129 Sub-DAS dengan luas daerah penelitian sebesar 12.425,22 ha.

III.1.2. Hydrological Respones Unit (HRU)

Pembentukan HRU merupakan tahapan yang dilakukan setelah menentukan deliniasi DAS. HRU merupakan hasil dari overlay Sub DAS, data penutupan lahan, karakteristik tanah dan kelas kemiringan. Peta penutupan lahan dan jenis tanah yang digunakan sebagai *input* hanya menyimpan informasi angka ID (*identity*). Angka ID tersebut kemudian dihubungkan dengan kode yang terdapat pada *database* SWAT. Selain itu, pengelompokkan HRU juga dipisahkan berdasar rentang kemiringan lahan.

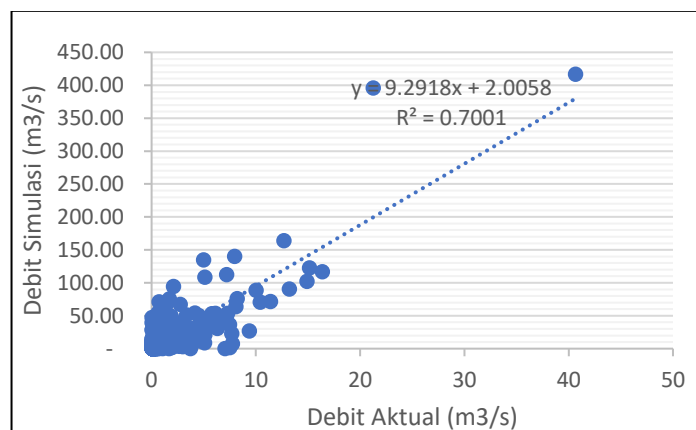
Hasil HRU yang terbentuk di daerah penelitian disimpan dalam bentuk file *.txt*. Jumlah HRU yang terbentuk sebanyak 762 pada 129 Sub-DAS. Laporan hasil HRU juga memuat kuantitas dan persentase tutupan lahan, jenis tanah dan kemiringan lahan di daerah DAS yang terdelineasi. Setelah HRU terbentuk, tahapan selanjutnya yaitu proses penggabungan HRU dan data data iklim harian tahun 2011-2020 yang terdiri dari data curah hujan dengan satuan (mm), suhu udara dengan satuan (°C), kelembaban udara (fraksi), radiasi surya (MJ/m²) dan kecepatan angin (m/s). Selanjutnya yaitu menjalankan simulasi model menggunakan tools Run SWAT, tahapan ini dijalankan setelah semua tahapan sebelumnya telah selesai dilakukan.

III.1.3. Simulasi dan Validasi

SWAT merupakan salah satu model hidrologi yang umum digunakan dalam menganalisis kondisi hidrologi DAS. Untuk menguji keakuratan hasil dari model ini dilakukan kalibrasi dan validasi. Kalibrasi dan validasi dilakukan dengan membandingkan debit keluaran model SWAT (debit simulasi) dengan debit hasil pengukuran lapangan (debit observasi). Proses kalibrasi dan validasi yang dilakukan adalah proses otomatis dengan menggunakan algoritma optimasi, bahwa hubungan yang digunakan berdasarkan nilai determinasi (R²). Nilai ini merupakan gambaran hubungan antara hasil keluaran model dan hasil observasi yang nilainya dapat berupa antara 0-

1.

Titik pemantauan hasil observasi yang digunakan berada dalam Batas Wilayah Kajian, data debit observasi harian tersebut pada Tahun 2018. Data debit observasi yang digunakan dalam proses validasi model SWAT di DAS Batu-Batu bersumber dari hasil pengukuran yang dilakukan oleh BBWS Pompengan Jeneberang. Adapun perbandingan antara debit simulasi dan debit observasi disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Hubungan Antara Debit Observasi dan Debit Simulasi

Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa validasi model menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,70. Nilai tersebut merupakan hasil perbandingan antara debit simulasi dan debit observasi di DAS Batu-Batu. Kalibrasi dan validasi dengan nilai determinasi yang bisa diterima lebih besar dari 0,6. Berdasarkan hal tersebut, kalibrasi dan validasi antara debit simulasi Model SWAT dan debit observasi BBWS Pompengan Jeneberang di DAS Batu-Batu merupakan nilai yang dapat diterima karena nilai determinasi yang dihasilkan lebih besar dari 0,6. Sehingga model SWAT dapat digunakan untuk analisis hasil sedimen di DAS Batu-Batu.

III. 2. Hasil Simulasi Sedimen Tahun 2020, 2032 dan RTRW

Analisis pendugaan erosi dan sedimentasi dilakukan dengan memperhitungkan variabel penutupan lahan tahun, data jenis tanah berdasarkan RePPPProt dan Web Soil USDA Natural Resource Conservation Service, data kelerengan yang dibuat dari DEM dan data iklim harian periode 10 tahun. Hasil erosi dan sedimentasi dianalisis berdasarkan Sub DAS yang terdapat pada DAS Batu-Batu.

Muatan sedimen berdasarkan Peraturan Menteri Kehutanan RI No. P61/Menhut.II/2014 dibagi menjadi 5 kelas, yakni kelas sedimen sangat ringan, ringan, sedang, berat dan sangat berat. Analisis simulasi tingkat sedimen dilakukan pada tiga kondisi penutupan lahan dan iklim yang berbeda.

III.2.1. Hasil Sedimen Berdasarkan Penutupan Lahan Aktual Tahun 2020

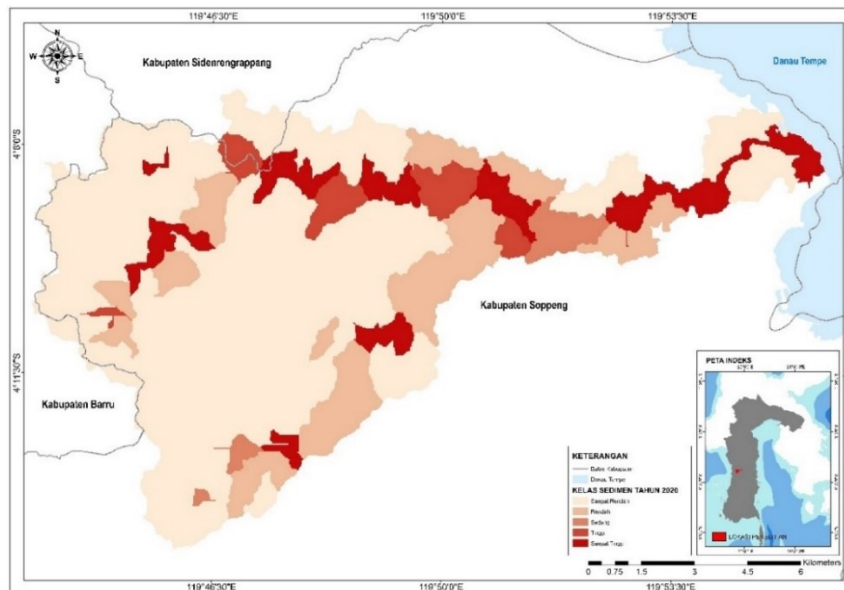
Sedimen tahun aktual diperoleh dengan melakukan simulasi menggunakan data penutupan lahan tahun 2020 dan data iklim tahun 2011-2020. Nilai total sedimen tahun 2020 pada wilayah DAS Batu-Batu yaitu sebesar 84,65 ton/ha/tahun. Hasil pendugaan Sedimen kemudian dikelaskan pada setiap Sub DAS. Berdasarkan hasil analisis diperoleh 5 kelas sedimen yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Klasifikasi Muatan sedimen pada DAS Batu-Batu disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Klasifikasi Sedimen Berdasarkan Penutupan Lahan Aktual

No	Kelas Sedimen	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Sangat Rendah	8.099,55	65,19
2	Rendah	2.164,86	17,42
3	Sedang	317,25	2,55
4	Tinggi	581,13	4,68
5	Sangat Tinggi	1.262,43	10,16

Tabel 2, menjelaskan bahwa luas klasifikasi muatan sedimen menggunakan penutupan lahan aktual didominasi oleh kelas sangat ringan dengan batasan kelas sedimen < 5 ton/ha/tahun yang mencakup luasan sebesar 65% dari total luas DAS dengan luas 8.099,55 ha. Sedangkan kelas sedimen berat dan sangat berat seluas 1.843,56 atau sekitar 14,84%. Akumulasi sedimen pada kelas sangat tinggi sebesar 80,92 ton/ha/tahun.

Hasil sedimen berdasarkan Sub DAS menunjukkan bahwa terdapat sebanyak 36 Sub DAS yang memiliki kelas sedimen tinggi dan sangat tinggi. Sub DAS dengan total akumulasi sedimen terbesar yakni Sub DAS 49. Sub DAS lainnya yang memiliki nilai akumulasi sedimen yang cukup tinggi yakni Sub DAS 5, Sub DAS 31, Sub DAS 49, Sub DAS 58 Sub DAS 81, dan Sub DAS 89. Adapun peta hasil klasifikasi sedimen berdasarkan penutupan lahan aktual dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 3. Peta Sebaran Klasifikasi Muatan Sedimen Berdasarkan Penutupan Lahan Tahun 2020

Sedimentasi yang terjadi tergantung pada ukuran partikel halus yang terbawa air larian, kecepatan aliran sungai, dan kondisi fisik perairan yang diindikasikan oleh tingkat kekeruhan sungainya. Hasil observasi di lapangan secara visual juga menunjukkan hal yang sama. Berdasarkan pengamatan lapangan, pendangkalan yang terjadi pada daerah hilir DAS Batu-Batu yakni Danau Tempe merupakan akibat dari tingginya hasil sedimen. Hal tersebut diindikasikan oleh pertumbuhan gulma air yang didominasi oleh eceng gondok yang semakin meningkat di perairan danau dengan luas penutupan yang mencapai 75%. Tumbuhnya eceng gondok dipengaruhi oleh tingginya unsur hara dari hasil sedimen pada DAS Batu-Batu maupun DAS lainnya yang berbatasan langsung dengan Danau Tempe. Berikut disajikan gambaran kondisi sungai dan daerah hilir DAS Batu-Batu.



Gambar 4. Gambaran Kondisi Wilayah Kajian
 A) Kondisi Sungai, B) Kondisi Hilir DAS Batu-Batu

III.2.2. Hasil Sedimen Berdasarkan Hasil Proyeksi Penutupan Lahan Tahun 2032

Proyeksi hasil sedimen tahun 2032 diperoleh dengan merubah memasukkan data penutupan lahan dan data iklim pada proses simulasi model. Data penutupan lahan yang digunakan merupakan data penutupan lahan proyeksi tahun 2032 dan data proyeksi iklim tahun 2032. Nilai total sedimentasi tahun proyeksi 2032 pada wilayah DAS Batu-Batu yaitu sebesar 86,01 ton/ha/tahun, meningkat sebesar 1,36 ton/ha/tahun dari kondisi aktual. Klasifikasi muatan sedimen berdasarkan penutupan lahan tahun 2032 dapat dilihat pada Tabel 3.

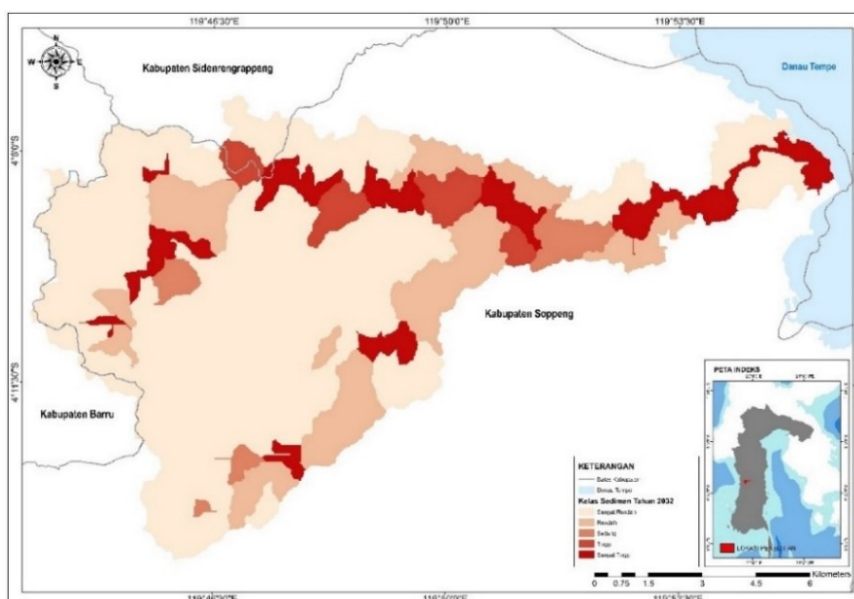
Tabel 3. Hasil Klasifikasi Sedimen Berdasarkan Kondisi Penutupan Lahan Proyeksi Tahun 2032

No	Kelas Sedimen	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Sangat Rendah	7.902,99	63,60
2	Rendah	2.250,63	18,11
3	Sedang	428,04	3,44
4	Tinggi	556,65	4,48
5	Sangat Tinggi	1.286,91	10,36

Tabel 3, memperlihatkan bahwa luas klasifikasi muatan sedimen didominasi oleh kelas sedimen sangat rendah dengan luas sebesar 7.902,99 ha atau sekitar 63,60% dari luas total DAS. Akumulasi hasil sedimen pada kelas sangat tinggi sebesar 80,92 ton/ha/tahun meningkat sebesar 4,15 ton/ha/tahun dari hasil sedimen berdasarkan penutupan lahan aktual. Sedangkan pada kelas sangat rendah sebesar 1,15 ton/ha/tahun.

Hasil sedimen berdasarkan Sub DAS menunjukkan bahwa, 36 dari 129 Sub DAS memiliki klasifikasi sedimen tinggi dan sangat tinggi. Jika dibandingkan dengan hasil sedimen berdasarkan penutupan lahan tahun 2020, besaran sedimen tahun 2032 mengalami peningkatan hasil akumulasi sedimen pada setiap Sub DAS berkisar antara 0,01 – 14 ton/ha/tahun. Sub DAS dengan total besaran hasil sedimen terbesar yakni Sub DAS 49. Sedangkan Sub DAS lainnya yang memiliki nilai akumulasi sedimen yang cukup tinggi yakni Sub DAS 5, Sub DAS 31, Sub DAS 49, Sub DAS 58 Sub DAS 81, dan Sub DAS 89.

Proyeksi peningkatan sedimentasi sebesar 30,10% pada tahun 2032 dibandingkan kondisi aktual 2020 merupakan angka yang patut mendapat perhatian serius. Temuan ini selaras dengan proyeksi global Borrelli et al. (2022) yang memperkirakan bahwa laju erosi tanah secara global akan meningkat rata-rata 14–30% pada periode 2015–2050 akibat kombinasi perubahan iklim dan ekspansi pertanian, dengan kawasan tropis menunjukkan peningkatan yang lebih tinggi dari rata-rata global. Di kawasan Asia Tenggara yang mengalami tekanan pembangunan intensif, angka peningkatan sedimentasi 30% dalam satu dekade merupakan proyeksi yang realistis dan bahkan dapat menjadi lebih besar apabila tidak ada intervensi pengelolaan lahan yang memadai. Peta sebaran kelas sedimen berdasarkan penutupan lahan proyeksi tahun 2032 dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 5. Peta Sebaran Klasifikasi Muatan Sedimen Berdasarkan Penutupan Lahan Tahun Proyeksi 2032

III.2.3. Hasil Sedimen Berdasarkan Penutupan Lahan Pola Ruang Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Tahun 2032

Hasil sedimen berdasarkan pola ruang diperoleh menggunakan data rencana pola ruang RTRW tahun 2032 yang telah disesuaikan dengan klasifikasi penutupan lahan dan data proyeksi iklim tahun 2032. Nilai total sedimentasi berdasarkan rencana pola ruang RTRW tahun 2032 pada wilayah DAS Batu-Batu yaitu sebesar 71,82 ton/ha/tahun, berkurang sebesar 12,83 ton/ha/tahun dari kondisi aktual. Klasifikasi muatan sedimen berdasarkan kondisi penutupan lahan Rencana Pola Ruang Wilayah disajikan pada Tabel 4.

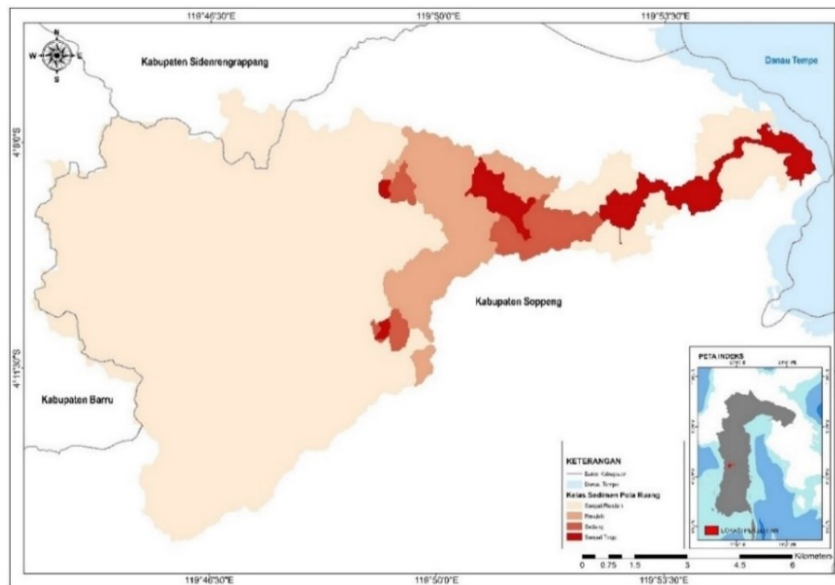
Tabel 4. Hasil Klasifikasi Sedimen Berdasarkan Kondisi Rencana Pola Ruang RTRW Tahun 2032

No	Kelas Sedimen	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Sangat Ringan	10.182,51	81,95
2	Ringan	1.166,04	9,38
3	Sedang	438,84	3,53
4	Sangat Berat	637,83	5,13

Tabel 4 menunjukkan hasil klasifikasi muatan sedimen berdasarkan penutupan lahan pola ruang tahun 2032 yang didominasi oleh kelas sedimen sangat ringan dengan luasan sebesar 10.182,51 ha atau sekitar 81,95% dari total luas DAS. Akumulasi sedimen sangat berat sebesar 74,43

ton/ha/tahun menurun dari kondisi aktual sebesar 2,34 ton/ha/tahun, sedangkan untuk klasifikasi sedimen sangat ringan total akumulasi sedimen yang diperoleh sebesar 74,69 ton/ha/tahun.

Hasil akumulasi besaran sedimen berdasarkan Sub DAS menunjukkan bahwa terdapat sebanyak 11 Sub DAS yang memiliki kelas sedimen tinggi. Sub DAS dengan total akumulasi sedimen terbesar yakni Sub DAS 49. Sub DAS lainnya yang memiliki nilai akumulasi sedimen yang cukup tinggi yakni Sub DAS 5, Sub DAS 45, dan Sub DAS 49. Peta sebaran kelas sedimen berdasarkan penutupan lahan proyeksi tahun 2032 dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 6. Peta Sebaran Sedimen Berdasarkan Rencana Pola Ruang RTRW Tahun 2032

III. 3. Arahan Penutupan Lahan

III.3.1. Perbandingan Akumulasi Sedimen

Hasil sedimen diperoleh dari simulasi SWAT dengan mengakumulasikan total sedimen selama periode analisis. Besaran nilai sedimen yang dihasilkan merupakan hasil dari akumulasi sedimen dari DAS Batu-Batu yang diperkirakan akan sampai pada Danau Tempe. Simulasi dilakukan sebanyak empat kali yakni berdasarkan kondisi tahun 2020, proyeksi penutupan lahan tahun 2032, pola ruang RTRW dan berdasarkan arahan penutupan lahan. Nilai sedimen untuk tahun aktual, tahun proyeksi, rencana pola ruang RTRW tahun 2032, dan berdasarkan arahan penutupan lahan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Akumulasi Sedimen DAS Batu-Batu

No	Produksi Sedimen	ton/tahun	Perubahan Sedimen dari Kondisi Aktual (ton/tahun)	Persentase Selisih (%)
1	Tahun Aktual (2020)	1.233.509,04	-	-
2	Tahun Proyeksi (2032)	1.604.478,87	371.289,84	30,1
3	Pengurangan Tahun 2032	815.576,65	-817.932,24	-66,28

Tabel 5 menunjukkan bahwa pada tahun 2020 nilai sedimen yang dihasilkan cukup tinggi sebanyak 1.233.509,04 ton/tahun. Kondisi tersebut akan mengalami peningkatan yang cukup

signifikan pada masa mendatang. Penambahan nilai sedimen pada tahun 2032 sebesar 371.280,84 ton/tahun atau sekitar 30,10% dari kondisi aktual. Jika dibiarkan secara terus menerus, maka besaran sedimen akan semakin bertambah. Untuk menekan penambahan besaran nilai sedimen maka perlu dilakukan arahan berdasarkan pola ruang dan kondisi kemampuan lahan. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan pola ruang nilai sedimen yang diperoleh menurun dari kondisi aktual sekitar 327.632,34 ton/tahun.

III.3.2. Arahan Penutupan Lahan

Arahan penutupan lahan disusun berdasarkan pertimbangan kondisi penutupan lahan aktual tahun 2020, pola ruang tahun 2032, kelas kemampuan lahan yang diperoleh dari RePPPProt dan klasifikasi hasil sedimen. Arahan yang direkomendasikan harus disesuaikan dengan Rencana Tata Ruang Kabupaten (RTRW) dalam wilayah kajian yaitu Kabupaten Soppeng, Kabupaten Barru, dan Kabupaten Sidrap. Kelas kemampuan lahan juga menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan arahan, mengingat kemampuan lahan dapat memberikan batasan dalam mengelola suatu lahan.

Lahan yang dengan kelas kemampuan rendah dapat diarahkan ke beberapa penutupan lahan baik untuk pertanian, kehutanan atau tujuan lain seperti permukiman, industri sarana infrastruktur dan lainnya. Berbeda dengan kelas kemampuan lahan rendah, kemampuan lahan tinggi memiliki keterbatasan dalam pemanfaatannya dikarenakan banyaknya kendala yang harus diatasi sebelum memanfaatkan lahan tersebut. Suatu lahan yang digunakan tanpa menyesuaikan dengan kemampuan lahannya akan mengakibatkan rusaknya suatu lahan bahkan dapat menyebabkan terjadinya bencana. Lahan dengan kelas kemampuan lahan tinggi akan diperuntukkan pada penutupan lahan yang tidak intensif atau sama sekali dilarang untuk dimanfaatkan untuk diambil hasil produknya secara langsung. Peruntukkan yang disarankan dalam kelas kemampuan lahan yang tinggi adalah kawasan lindung (Fithriah, 2011).

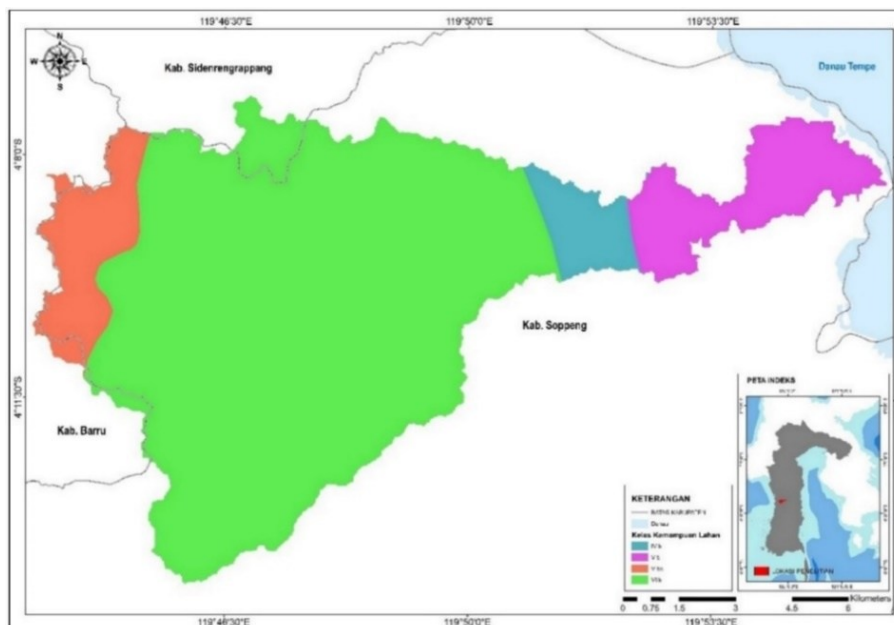
DAS Batu-Batu memiliki kelas kemampuan lahan IV dengan faktor pembatas lereng, kelas kemampuan lahan V dengan faktor pembatas batuan, kelas kemampuan lahan V dengan faktor pembatas batuan singkapan dan kelas kemampuan lahan VI dengan faktor pembatas lereng. Adapun luas untuk setiap jenis kelas kemampuan lahan dapat dilihat pada Tabel 6 dan peta sebaran kelas kemampuan lahan pada Gambar 7.

Tabel 6. Klasifikasi Kemampuan Lahan DAS Batu-Batu

No	Kelas Kemampuan Lahan	Luas	
		ha	%
1	IV lr	526.67	4.24
2	V b	1259.80	10.14
3	V bs	989.45	7.96
4	VI lr	9649.30	77.66
Total		12425.22	100

Keterangan faktor pembatas:

1. lr : Lereng
2. b : Batuan
3. bs : Batuan Singkapan



Gambar 7. Peta Sebaran Kelas Kemampuan Lahan DAS Batu-Batu

Arahan penutupan lahan DAS Batu-Batu merupakan arahan berbasis kemampuan lahan yang bertujuan untuk memberikan masukan dalam penyempurnaan RTRW Kabupaten dalam wilayah kajian. Arahan penutupan lahan disusun berdasarkan hasil perumusan kriteria sebagai berikut:

1. Kawasan yang berfungsi sebagai kawasan lindung dan kawasan danau tetap sesuai dengan rencana pola ruang RTRW.
2. Klasifikasi penutupan lahan eksisting tahun 2020 hutan lahan kering sekunder tetap sesuai dengan kondisi aktual sehingga direkomendasikan menjadi kawasan hutan.
3. Klasifikasi penutupan lahan sungai/tubuh air tetap sesuai dengan kondisi eksisting.
4. Klasifikasi penutupan lahan permukiman tetap sesuai dengan kondisi eksisting.
5. Kawasan hutan dengan klasifikasi sedimen berat hingga sangat berat dan memiliki kelas penutupan lahan pertanian lahan kering dan padang rumput serta berada pada kelas kemampuan lahan IV, V, dan VI direkomendasikan menjadi Agroforestry. Kelas penutupan lahan semak belukar dan lahan terbuka diarahkan sebagai hutan lahan kering sekunder. Sedangkan kelas penutupan permukiman dikategorikan tetap.
6. Kawasan peruntukan non kehutanan seperti kawasan peruntukan lainnya, kelas sedimen berat dan sangat berat dan memiliki kelas kemampuan lahan V dan VI diarahkan sebagai Agroforestry.
7. Kawasan pertanian pangan dengan penutupan lahan sawah atau pertanian lahan kering campur semak dengan kelas sedimen ringan sangat ringan dan sedang dikategorikan tetap, sedangkan kelas sedimen berat dan sangat berat dengan kemampuan lahan V dan VI diarahkan menjadi agroforestry.
8. Taman wisata alam dan laut dengan kondisi eksisting sawah, lahan terbuka, pertanian lahan kering campur semak maupun tanah terbuka diarahkan menjadi agroforestry, sedangkan penutupan lahan hutan, sungai dan permukiman dikategorikan tetap.

Arahan agroforestry dalam penelitian ini dipilih karena dinilai lebih sesuai dengan kondisi DAS Batu-Batu yang memiliki tingkat erosi dan sedimentasi relatif tinggi. Sistem agroforestry merupakan pola pemanfaatan lahan yang mengombinasikan tanaman berkayu dengan tanaman pertanian dalam satu hamparan lahan, sehingga tidak hanya memberikan manfaat ekologis, tetapi juga tetap mendukung kebutuhan ekonomi masyarakat. Menurut Nair (1993), penerapan agroforestry dapat membantu memperbaiki kondisi tanah melalui sistem perakaran tanaman

tahunan yang mampu memperkuat struktur tanah, meningkatkan infiltrasi air, serta mengurangi limpasan permukaan yang menjadi penyebab utama erosi.

Kondisi DAS Batu-Batu yang didominasi oleh kelas kemampuan lahan IV, V, dan VI menunjukkan adanya keterbatasan fisik lahan, terutama pada faktor lereng dan batuan. Pada kondisi tersebut, penggunaan lahan untuk budidaya pertanian intensif berpotensi mempercepat degradasi lahan apabila tidak diimbangi dengan upaya konservasi yang memadai. Aktivitas budidaya pada lahan miring tanpa vegetasi penutup yang cukup dapat meningkatkan aliran permukaan dan memperbesar jumlah tanah tererosi yang kemudian terbawa menuju sungai dan bermuara ke Danau Tempe. Oleh karena itu, penerapan agroforestry dianggap lebih tepat karena keberadaan vegetasi pohon dapat berfungsi sebagai penutup lahan permanen yang mampu mengurangi energi jatuhnya air hujan, memperlambat aliran permukaan, serta membantu meningkatkan daya resap tanah terhadap air.

Selain berfungsi dalam konservasi tanah dan air, pendekatan agroforestry juga dipandang lebih realistis untuk diterapkan pada kawasan DAS yang telah dimanfaatkan masyarakat. Arahannya berupa penghutan penuh sering kali sulit diterapkan karena dapat membatasi aktivitas ekonomi masyarakat setempat. Sebaliknya, sistem agroforestri tetap memberikan peluang pemanfaatan lahan melalui hasil pertanian, tanaman kayu, maupun tanaman produktif lainnya, sehingga aspek konservasi dapat berjalan beriringan dengan kebutuhan ekonomi masyarakat. Pendekatan ini sejalan dengan konsep watershed management berbasis konservasi yang menekankan pentingnya keseimbangan antara fungsi lindung dan fungsi budidaya dalam pengelolaan DAS secara berkelanjutan. Dengan demikian, arahan agroforestry pada DAS Batu-Batu diharapkan mampu menjadi alternatif pengelolaan lahan yang tidak hanya efektif dalam menekan laju sedimentasi menuju Danau Tempe, tetapi juga dapat diterapkan secara berkelanjutan dan diterima oleh masyarakat lokal.

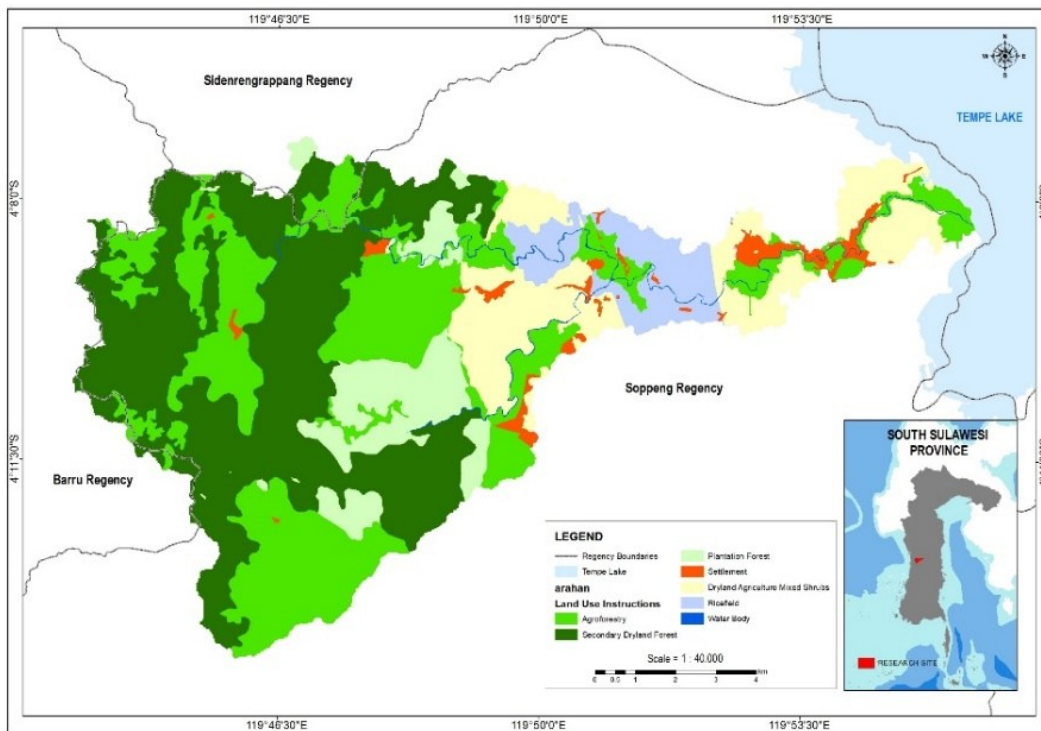
Pilihan agroforestri sebagai arahan penutupan lahan utama didukung oleh sejumlah studi terbaru. Abdulkareem et al. (2023) melakukan meta-analisis terhadap 87 studi di berbagai zona iklim dan menemukan bahwa sistem agroforestri secara rata-rata mampu mengurangi aliran permukaan sebesar 37,5% dan erosi tanah sebesar 48,2% dibandingkan lahan pertanian monokultur—kisaran yang konsisten dengan penurunan sedimentasi sebesar 66,17% yang dicapai dalam penelitian ini melalui kombinasi arahan agroforestri dan restorasi hutan. Lebih spesifik untuk konteks DAS tropis di Indonesia, Hairiah et al. (2022) menunjukkan bahwa agroforestri multistrata berbasis tanaman kayu lokal dapat memberikan perlindungan tanah yang setara dengan hutan sekunder, dengan sistem perakaran yang meningkatkan konduktivitas hidrolik tanah hingga 2,5 kali lipat dibandingkan lahan pertanian monokultur. Dari aspek sosial, Rhoades et al. (2024) menegaskan bahwa adopsi agroforestri meningkat signifikan ketika pendekatan dilakukan secara partisipatif dan spesies yang direkomendasikan sesuai preferensi ekonomi masyarakat lokal—faktor penting mengingat kawasan DAS Batu-Batu merupakan kawasan padat penduduk di Kabupaten Soppeng dan Sidenreng Rappang.

Berdasarkan hasil analisis kriteria arahan penutupan lahan, dihasilkan peta arahan penutupan lahan DAS Batu-Batu sebagaimana disajikan pada Gambar 8 dengan uraian luas kawasan pada Tabel 7.

Tabel 7. Arahan penutupan lahan DAS Batu-Batu

No	Arahan Penutupan Lahan	Luas (ha)	%
1	Agroforestry	3,877.99	31.21
2	Hutan Lahan Kering Sekunder	4,571.87	36.80

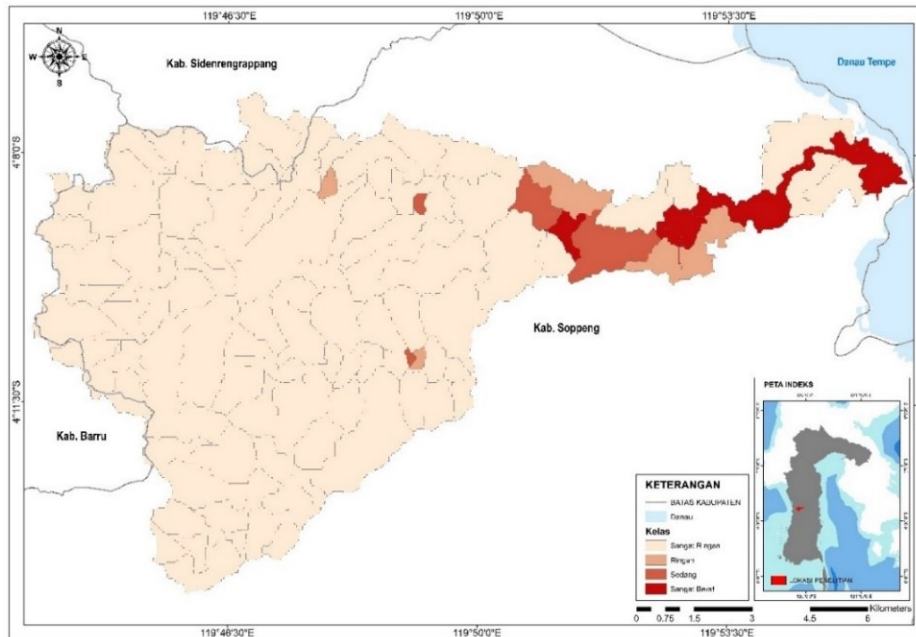
No	Arahan Penutupan Lahan	Luas (ha)	%
3	Hutan Tanaman	1,142.54	9.20
4	Permukiman	157.653	1.27
5	Permukiman	152.817	1.23
6	Pertanian Lahan Kering Campur Semak	1,696.24	13.66
7	Sawah	738.04	5.94
8	Tubuh Air	88.05	0.71
Grand Total		12,424.22	100.00



Gambar 8. Peta Arahan Penutupan Lahan DAS Batu-Batu

III.3.3. Hasil Sedimen Berdasarkan Arahan Penutupan Lahan

Hasil arahan penutupan lahan kemudian disimulasikan kembali menggunakan model SWAT. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh penurunan nilai hasil sedimen yang cukup signifikan sebesar 417,235.73 ton/tahun. Jika dibandingkan dengan kondisi tahun aktual nilai sedimen berkurang sebesar 816,273.31 ton/tahun atau sekitar 66,17%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil arahan yang dilakukan cukup dapat diterima, dan dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam merevisi Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten. Peta Sebaran klasifikasi sedimen berdasarkan arahan penutupan lahan disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Peta Sebaran Klasifikasi Sedimen Berdasarkan Arah Penutupan Lahan di DAS Batu-Batu

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap besaran sedimentasi di DAS Batu-Batu, di mana hasil simulasi model SWAT pada kondisi eksisting tahun 2020 menghasilkan sedimen sebesar 84,65 ton/ha/tahun dengan dominasi kelas sangat rendah namun masih terdapat sejumlah sub-DAS dengan kategori tinggi hingga sangat tinggi sebagai penyumbang utama. Pada kondisi proyeksi tahun 2032, terjadi peningkatan sedimentasi menjadi 86,01 ton/ha/tahun yang mengindikasikan bahwa tanpa pengelolaan yang tepat, perubahan penggunaan lahan di masa mendatang berpotensi memperbesar beban sedimen yang masuk ke Danau Tempe. Sebaliknya, skenario berdasarkan rencana pola ruang RTRW tahun 2032 menunjukkan penurunan sedimentasi menjadi 71,82 ton/ha/tahun, yang menegaskan bahwa kebijakan tata ruang memiliki peran penting dalam mengendalikan laju sedimentasi. Lebih lanjut, arahan penutupan lahan yang disusun dengan mempertimbangkan tingkat sedimentasi, kondisi eksisting, RTRW, dan kelas kemampuan lahan terbukti mampu menurunkan sedimentasi secara lebih signifikan, dengan penurunan mencapai sekitar 66,17% dibandingkan kondisi aktual. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan pengelolaan DAS yang terintegrasi, khususnya melalui penerapan prinsip konservasi seperti agroforestry dan perlindungan kawasan hutan, efektif dalam menekan erosi dan sedimentasi, serta dapat menjadi dasar dalam penyempurnaan RTRW dan pengelolaan DAS Batu-Batu secara berkelanjutan dalam mendukung keberlanjutan ekosistem Danau Tempe.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N. A., & Jamil, N. R. (2023). Agroforestry for watershed conservation: A meta-analysis of runoff and erosion reduction. *Agroforestry Systems*, 97(2), 281–298. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00793-4>
- Anwar, R., Dariah, A., & Nurida, N. L. (2011). Dampak perubahan penggunaan lahan terhadap kualitas lingkungan daerah aliran sungai. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 5(1): 45–56.

- Ardiansah, T. (2021). Arahan Penggunaan Lahan sebagai Bentuk Mitigasi Sedimentasi di Daerah Aliran Sungai Lisu. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- BLHD Sulawesi Selatan. (2012a). Laporan Status Lingkungan Hidup Daerah 2012. Makassar: Badan Lingkungan Hidup Daerah Sulawesi Selatan.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., ... & Ballabio, C. (2022). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), 21994–22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Chen, X., Zhang, X., & Liu, Y. (2020). Dampak perubahan penggunaan lahan terhadap hasil sedimen dan kualitas air: Tinjauan global. *Science of the Total Environment*, 738: 139–151.
- Fithriah, N. (2011). Evaluasi kemampuan lahan untuk arahan penggunaan lahan di daerah aliran sungai. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 33: 55–64.
- Hairiah, K., Dewi, S., Agus, F., Velarde, S., Ekadinata, A., Rahayu, S., & van Noordwijk, M. (2022). Measuring carbon stocks across land use systems: A manual. World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor.
- Harsono, E. (2016). Kajian limnologi Danau Tempe berdasarkan tiga zona daerah aliran sungai. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 42(2): 123–136.
- Hutyra, LR, Yoon, B., & Alberti, M. (2011). Stok karbon terestrial di sepanjang gradien urbanisasi: Sebuah studi di wilayah Seattle, WA. *Global Change Biology*, 17(2): 783–797.
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2014). Danau Tempe: Status dan Pengelolaan. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Li, Z., Fang, H., & Li, X. (2021). Global analysis of the relationship between land use change and streamflow and sediment yield. *Journal of Hydrology*, 599, 126394. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126394>
- Nair, PKR (1993). Pengantar Agroforestri. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Nasrullah, N., & Kartiwa, B. (2012). Perubahan tutupan lahan dan pengaruhnya terhadap sedimentasi di DAS inlet Danau Tempe periode 1994–2002. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 2(3): 101–110.
- Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.61/Menhut-II/2014 tentang Monitoring dan Evaluasi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Jakarta: Kementerian Kehutanan Republik Indonesia.
- Pusat Penelitian Limnologi LIPI. (2011). Laju sedimentasi dan kondisi kualitas air Danau Tempe. Dalam BLHD Sulawesi Selatan (Ed.). Laporan Status Lingkungan Hidup Daerah 2012. Makassar: BLHD Sulawesi Selatan.
- Rahman, M. M., Salehin, M., & Islam, M. S. (2022). Sedimentation and its impacts on freshwater lakes in Southeast Asia: A review. *Environmental Science & Policy*, 136, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.07.008>
- Rhoades, C., Nair, P., & Singh, V. (2024). Community-based agroforestry adoption in Indonesian watersheds: Drivers and barriers. *Forest Policy and Economics*, 158, 103098. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103098>