

Sistem lahan basah buatan untuk mereduksi sedimen dan polutan di Sungai Tougela Kabupaten Minahasa

La'la Monica^{1,*}, Liany Amelia Hendratta¹, Olivia Maria Tumurang¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Sulawesi Utara, Indonesia

*Corresponding authors: lala.monica@unsrat.ac.id

Submitted: 31 January 2026, Revised: 2 June 2026, Accepted: 9 June 2026

ABSTRACT: Lake Tondano, a national priority lake, has experienced increasing sedimentation and declining water quality due to sediment and pollutant loads from its inlet rivers, including the Tougela River. Agricultural activities, settlements, and hydrological conditions contribute significantly to elevated sediment and nutrient inputs, particularly phosphate, which threaten the sustainability of the lake ecosystem. This study aims to analyze flood flow characteristics, sedimentation, and water quality of the Tougela River, as well as to evaluate the application of constructed wetlands as a measure to control sediment and pollutant loads before entering Lake Tondano. The research method includes hydrological analysis using the rational method to estimate design flood discharge, analysis of suspended sediment concentration, and water quality assessment based on BOD, COD, and phosphate parameters. Data were obtained through field measurements, water sampling, and rainfall data analysis. A floating constructed wetland was applied with emergent plants, planting media and floating media made of bamboo and anchors. The selected emergent plants were local aquatic macrophytes, namely water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and water spinach (*Ipomoea aquatica*) which are available at the research site. The results indicate that sedimentation in the Tougela River reaches 160.95 g/s at the 50-year return period flood discharge. BOD and COD values comply with water quality standards, while phosphate concentrations only meet Class III–IV standards. The constructed wetland reduced phosphate concentrations by 10–24.5% and suspended sediment by 4.6%. The water flow in the floating constructed wetland was still influenced by the lake's water flow, which affected the observation results, but its application has the potential as a nature-based solution for reducing sediment and pollutant loads.

KEYWORDS: constructed wetlands; Lake Tondano; sedimentation; Tougela River; water quality.

ABSTRAK: Danau Tondano sebagai danau prioritas nasional mengalami peningkatan sedimentasi dan penurunan kualitas air akibat masuknya sedimen dan polutan dari sungai-sungai inlet, salah satunya Sungai Tougela. Aktivitas pertanian, permukiman, serta kondisi hidrologi sungai berkontribusi terhadap tingginya beban sedimen dan nutrisi, khususnya fosfat, yang berpotensi menurunkan keberlanjutan ekosistem danau. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik aliran banjir, sedimentasi, dan kualitas air Sungai Tougela serta mengevaluasi penerapan lahan basah buatan sebagai upaya pengendalian sedimen dan polutan sebelum aliran memasuki Danau Tondano. Metode penelitian meliputi analisis hidrologi menggunakan metode rasional untuk menentukan debit banjir rencana, pengujian sedimen terlarut, serta analisis kualitas air berdasarkan parameter BOD, COD, dan fosfat. Data diperoleh melalui pengukuran lapangan, pengambilan sampel air, dan data curah hujan. Lahan basah buatan terapung diaplikasikan dengan tanaman emergent, media tanam dan media apung terbuat dari bambu serta anchor. Tanaman emergent yang dipilih berupa makrofita akuatik lokal, yakni Eceng gondok (*Eichornia crassipes*) dan Kangkung air (*Ipomoea aquatica*) yang tersedia di lokasi penelitian. Hasil penelitian menunjukkan laju sedimentasi Sungai Tougela mencapai 160.95 gr/detik pada debit banjir kala ulang 50 tahun. Parameter BOD dan COD memenuhi baku mutu air, sedangkan kadar fosfat hanya memenuhi standar kelas III–IV. Penerapan lahan basah buatan mampu menurunkan kadar fosfat sebesar 10–24.5% dan sedimen terlarut sebesar 4.6%. Aliran dalam lahan basah buatan terapung masih dipengaruhi aliran dalam danau sehingga mempengaruhi hasil pengamatan namun penerapannya berpotensi sebagai solusi berbasis alam untuk pengendalian sedimen dan polutan.

KATA KUNCI: lahan basah buatan; Danau Tondano; sedimentasi; Sungai Tougela; kualitas air.

© The Author(s) 2026. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1. PENDAHULUAN

Danau Tondano merupakan salah satu danau prioritas nasional yang memiliki fungsi strategis sebagai sumber air baku (Walangitan et al., 2024), pengendali banjir (Sittadewi, 2011), irigasi, perikanan (Urbasa et al., 2019), serta penopang ekosistem dan

aktivitas sosial ekonomi masyarakat di sekitarnya. Namun dalam beberapa dekade terakhir, Danau Tondano menghadapi permasalahan serius berupa peningkatan laju sedimentasi dan penurunan kualitas air, yang berpotensi mengancam keberlanjutan fungsi danau secara ekologis maupun ekonomis. Salah satu

faktor utama yang berkontribusi terhadap kondisi tersebut adalah masuknya beban sedimen dan polutan dari sungai-sungai inlet yang bermuara langsung ke danau (Hendratta et al., 2024; Zhang et.al, 2023; Sorey et al., 2016).

Sungai Tougela adalah salah satu dari 38 inlet di Danau Tondano yang pada musim penghujan di daerah dataran rendah sekitar sungai sering terjadi genangan banjir sehingga menghambat kegiatan pertanian, membawa material sedimen dan polutan yang mempengaruhi tingkat kelestarian danau Tondano. Sungai Tougela juga merupakan salah satu inlet utama danau Tondano dengan debit aliran relatif konstan dan yang melewati pemukiman serta lahan pertanian sehingga perlu dilakukan penelitian lanjut, khususnya terkait masalah sedimentasi dan kualitas air. Populasi dan aktivitas penduduk sekitar sungai yang semakin meningkat menambah potensi peningkatan pembuangan limbah rumah tangga dan pertanian, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan kualitas air sungai. Secara teknis, permasalahan banjir dan sedimentasi di bagian hilir Sungai Tougela dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain tingginya curah hujan, kondisi morfologi sungai, akumulasi sedimen di dasar sungai, serta pengaruh muka air Danau Tondano yang relatif tinggi. Endapan sedimen yang terbawa aliran banjir tidak hanya meningkatkan tinggi muka air banjir, tetapi juga menyebabkan degradasi kualitas air yang berdampak langsung pada lingkungan perairan dan kesehatan masyarakat di sekitar sungai dan danau. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengelolaan yang tidak hanya bersifat struktural, tetapi juga memperhatikan aspek keberlanjutan lingkungan.

Upaya penanggulangan banjir dan pengendalian sedimentasi yang selama ini banyak diterapkan umumnya mengandalkan bangunan pengendali konvensional (*grey infrastructure*), seperti tanggul dan normalisasi sungai (Harlan & Natasaputra, 2019; Layaliya & Nugroho, 2024). Pendekatan tersebut sering kali kurang mempertimbangkan keseimbangan ekosistem dan dapat menimbulkan dampak lingkungan jangka panjang. Sebagai alternatif, penerapan solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) melalui pengembangan lahan basah buatan (*constructed wetland*) menjadi pendekatan yang semakin banyak dikaji karena dinilai lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

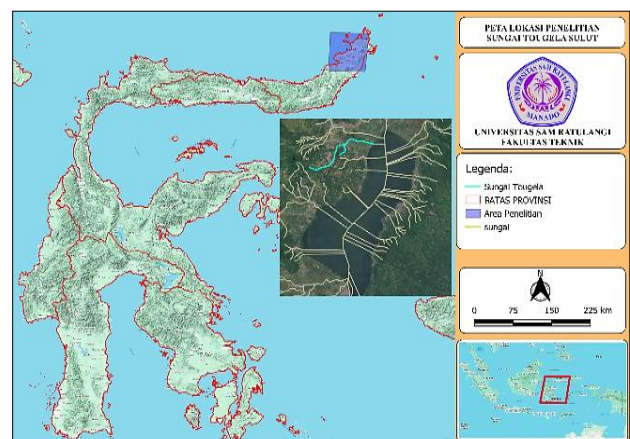
Lahan basah buatan berfungsi sebagai sistem alami yang mampu mereduksi sedimen dan menurunkan konsentrasi polutan melalui proses fisik, kimia, dan biologis (Biswal & Balasubramanian, 2022; Akinnowo et al, 2023; Kushwaha et al., 2024). Dibandingkan dengan studi sebelumnya, penelitian ini lebih menekankan pada pemanfaatan lahan basah buatan dengan penggunaan tanaman lokal yang tumbuh di sekitar sungai sehingga mengurangi pembiayaan apabila hasil penelitian akan

diimplementasikan. Penerapan lahan basah buatan diharapkan tidak hanya mampu mengurangi beban sedimen dan nutrien yang masuk ke Danau Tondano, tetapi juga mendukung konservasi ekosistem perairan. Namun, kajian mengenai efektivitas penerapan lahan basah buatan pada inlet Danau Tondano, khususnya di Sungai Tougela belum pernah dilakukan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penerapan lahan basah buatan menggunakan tanaman lokal sebagai upaya pengendalian sedimen dan polutan sebelum aliran air sungai Tougela memasuki Danau Tondano. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai model untuk beberapa inlet lainnya sehingga akan memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan serta menjadi acuan dalam upaya penyelamatan Danau Tondano.

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Tougela yang merupakan salah satu inlet Danau Tondano, Kabupaten Minahasa, Provinsi Sulawesi Utara. Fokus penelitian berada pada bagian hilir Sungai Tougela, khususnya pada daerah muara sungai sebelum aliran memasuki Danau Tondano. Lokasi penelitian dipilih karena kawasan ini sering mengalami genangan banjir pada musim hujan serta berkontribusi terhadap masuknya sedimen dan polutan ke Danau Tondano. Peta lokasi penelitian Gambar 1 dan Peta Das Tougela dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian



Gambar 2. Peta DAS Tougela

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer berupa kondisi luasan genangan banjir, pengukuran geometri sungai, pengukuran kemiringan sungai, pengambilan sampel aliran bersedimen, pengambilan sampel untuk uji kualitas air dan data eksisting lainnya. Sedangkan data-data sekunder adalah peta topografi, peta DAS, data curah hujan (hidrologi) dan data klimatologi.

Analisis curah hujan DAS Tougela dilakukan dengan menggunakan data curah hujan harian maksimum yang bersumber dari Balai Wilayah Sungai Sulawesi I dengan periode pencatatan tahun 2009 sampai dengan tahun 2023. Analisis pos hujan yang berpengaruh di DAS dilakukan dengan menggunakan Poligon Thiessen. Poligon Thiessen adalah cara membagi bidang (peta) menjadi area-area di sekitar titik-titik tertentu (misalnya stasiun hujan), sehingga setiap titik di suatu area selalu lebih dekat ke satu stasiun itu dibanding ke stasiun lain (Brassel & Reif, 1979).

Selanjutnya untuk pengujian data outlier dilakukan untuk menentukan berapa banyak data yang menyimpang terlalu tinggi dan terlalu rendah. Data yang menyimpang bisa dikarenakan kesalahan saat pencatatan data atau adanya kejadian ekstrim (Kwak & Kim, 2017). Rumus Cs_{log} untuk menentukan pengujian outlier dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$Cs_{log} = \frac{N}{(N-1)(N-2)S_{log}^3} \quad (1)$$

Jenis sebaran hujan bergantung pada nilai parameter statistik yaitu rata – rata hitung atau mean ($\bar{x}$), simpangan baku (S), koefisien kemencengan (Cs), koefisien variasi (Cv) dan koefisien kurtosis (Ck). Penentuan tipe distribusi adalah dengan melihat kecocokan nilai dari parameter statistik Cs , Cv dan Ck dengan syarat untuk tiap tipe distribusi (EMEKA-CHRIS et al., 2022).

Analisis debit banjir dalam penelitian ini menggunakan metode rasional. Metode rasional banyak dipakai di Indonesia untuk memperkirakan debit puncak/debit banjir rencana di DAS kecil–menengah, terutama untuk perencanaan drainase perkotaan, pengendalian banjir, dan kajian

infrastruktur air (Fitriani et al., 2020). Rumus metode rasional dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$Q = 0.278 \ C \ I \ A \quad (2)$$

dimana Q merupakan debit rencana, C merupakan koefisien limpasan, I merupakan intensitas curah hujan dan A adalah luas daerah aliran sungai.

Untuk menghitung debit banjir rencana, langkah awal adalah menentukan nilai intensitas curah hujan (I) menggunakan Persamaan 3.

$$I = \left(\frac{R_{24}}{24}\right) \left(\frac{24}{T_c}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

dimana R_{24} adalah curah hujan maksimum dalam 24 jam, T_c adalah waktu konsentrasi. Perhitungan waktu konsentrasi dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$T_c = \frac{0.606 (L \times n)^{0.467}}{S^{0.234}} \quad (4)$$

dimana L adalah jarak dari titik terjauh di DAS ke titik kontrol, n adalah koefisien kekasaran lahan dan S adalah kemiringan lahan antara elevasi maksimum dan minimum.

Dari tinggi rendah muka air danau dan faktor-faktor hidrologi lainnya ditetapkan elevasi muka air tertinggi danau. Selanjutnya, dari data curah hujan dihitung hujan rancangan (R_{24}), intensitas hujan dan debit rencana sungai (Q) berdasarkan luasan DAS Tougela.

Analisis sampel aliran bersedimen dilakukan untuk mendapatkan konsentrasi sedimen terlarut dan diagram distribusi partikelnya (Czuba et al., 2015). Pemeriksaan kadar sedimen terlarut dilakukan dengan pengambilan sampel aliran air bersedimen pada bagian paling hilir sungai Tougela, yaitu pada 3 titik di bagian tepi kiri, bagian tengah dan tepi kanan sungai dengan kedalaman 0,6 dikalikan ketinggian air. Kadar sedimen terlarut yang digunakan adalah rata-rata hasil pengamatan dari beberapa titik pengambilan sampel.

Dalam penelitian ini, lahan basah buatan dipilih lahan basah terapung (Floating Treatment Wetland / FTW). FTW terdiri dari tanaman emergent, media tanam dan media apung terbuat dari bambu serta anchor. Tanaman emergent yang dipilih berupa makrofita akuatik lokal, yakni Eceng gondok (*Eichornia crassipes*) dan Kangkung air (*Ipomoea aquatica*) yang tersedia di seputaran Danau Tondano. Untuk pemeriksaan kualitas air, pengambilan sampel dilakukan pada bagian hilir sungai Tougela yaitu sebelum dan sesudah diaplikasikan lahan basah buatan. Pengambilan sampel setelah FTW terpasang selama 2 bulan dan tanaman sudah tumbuh baik serta hampir memenuhi area lahan basah. Sampling dilakukan beberapa kali dengan rentang waktu setiap 3 hari di beberapa titik dengan jarak setiap 0.5 meter, sesudah lokasi FTW diterapkan. Penempatan FTW diletakan pada posisi tegak lurus arah aliran sungai Tougela menuju danau Tondano.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Curah Hujan

Data curah hujan yang didapat dari Balai Wilayah Sungai selanjutnya diambil curah hujan maksimum selama 15 tahun, data ini akan digunakan pada perhitungan selanjutnya. Data yang didapat dari Balai Wilayah Sungai Sulawesi 1 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data curah hujan harian maksimum

Tahun	Hujan (mm)
2009	43.00
2010	67.20
2011	90.90
2012	69.80
2013	66.50
2014	110.50
2015	64.90
2016	115.50
2017	160.20
2018	126.50
2019	157.30
2020	157.30
2021	106.10
2022	99.80
2023	118.40

3.2 Analisis Data Outlier

Data curah hujan yang didapat dari Balai Wilayah Sungai Sulawesi 1 harus diuji outlier terlebih dahulu. Data yang menyimpang bisa dikarenakan kesalahan saat pencatatan data atau adanya kejadian ekstrim. Berikut adalah uji outlier data hujan harian maksimum Pos Hujan Klimatologi Paleloan.

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 = \frac{15}{(15-1)(15-2)0.169^3} (-0.007) = -0.1165$$

Nilai Cs_{log} tidak lebih kecil dari -0,4 dan tidak lebih besar dari +0,4 sehingga dapat dipilih dilakukan uji outlier tinggi atau uji outlier rendah terlebih dahulu. Sebelum dilakukan uji outlier, dihitung terlebih dahulu nilai Kn karena nilai Cs_{log} lebih rendah dari +0,4.

$$Kn = (-3.62201) + (6.28446 \times 151/4) - (2.49835 \times 151/2) + (0.491436 \times 15 \cdot 3/4) - (0.037911 \times 15) = 2.2467$$

Uji outlier tinggi dihitung dengan persamaan 5.

$$\begin{aligned} \log x_h &= \overline{\log x} + Kn \cdot S_{log} \\ &= 1.99 + 2.2467 \cdot 0.169 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\log x_h = 2.367$$

$$x_h = 232.88 \text{ mm}$$

Hasil perhitungan batas tertinggi yaitu 232.88 mm, masih lebih tinggi dari nilai hujan tertinggi yaitu

160.20 maka tidak dilakukan koreksi data dan dilanjutkan dengan menghitung batas terendah. Uji outlier rendah dihitung dengan persamaan 6.

$$\begin{aligned} \log x_l &= \overline{\log x} - Kn \cdot S_{log} \\ &= 1.99 - 2.2467 \cdot 0.169 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\log x_l = 1.606$$

$$x_l = 40.41 \text{ mm}$$

Hasil perhitungan batas terendah ialah 40.41 mm, masih lebih rendah dari nilai hujan terendah yaitu 43 mm, maka tidak dilakukan koreksi data.

3.3 Analisis Curah Hujan Rencana

Analisis curah hujan rencana pada penelitian ini menggunakan sebaran *Log-Pearson tipe III* menggunakan persamaan 7.

$$\log X = \overline{\log X} + k \cdot S_{log} \quad (7)$$

Faktor frekuensi K untuk tiap kala ulang terdapat pada tabel nilai K_T untuk Koefisien kemencengan negatif yang ditentukan dengan menggunakan nilai $Cs_{log x}$ dan kala ulang dalam tahun. Selanjutnya adalah perhitungan hujan kala ulang 5 tahun dengan menggunakan persamaan 8.

$$\begin{aligned} \log X_{TR} &= \bar{Y} + K \cdot S_{log x} \\ &= 1.987 + (0.850) \times 0.168 \\ &= 2.13 \end{aligned} \quad (8)$$

$$X_{TR} = 10^{2.13} = 134.83$$

Hasil Perhitungan untuk kala ulang lainnya terdapat pada Tabel 2.

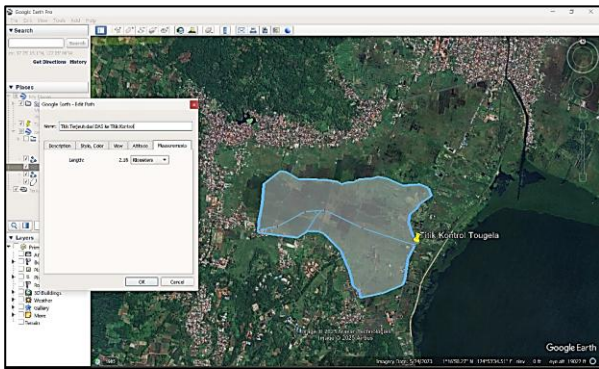
Tabel 2. Hujan rencana berbagai kala ulang

Kala Ulang	Hujan Rencana (mm)
5 Tahun	134.83
10 Tahun	168.90
25 Tahun	238.25
50 Tahun	359.74
100 Tahun	1,184.41

3.4 Analisis Debit Banjir Rencana Metode Rasional

Metode ini digunakan apabila daerah pengaliran memiliki luasan yang kecil. Metode Rasional digunakan dengan anggapan bahwa DAS memiliki luas $DAS < 200 - 300$ hektar, memiliki waktu konsentrasi (t_c) < 1 jam dan intensitas curah hujan merata di seluruh DPS dengan durasi tertentu. Berdasarkan hasil analisis pada DAS Tougela maka didapatkan luas sebesar 2.10 km², sesuai dengan kriteria yang diatas DAS Tougela memenuhi syarat untuk karakteristik DAS kecil. Maka analisis debit banjir rencana akan menggunakan metode Rasional.

Gambar 3 menunjukkan jarak dari titik terjauh di DAS ke titik Kontrol.



Gambar 3. Jarak titik terjauh di DAS Tougela ke titik kontrol

Berdasarkan gambar tersebut, jarak terjauh yang diperoleh adalah 2,18 km, dengan elevasi di hulu sebesar 688,79 m, dan elevasi di hilir sebesar 682,95 m maka besar kemiringan yang diperoleh.

$$S = \frac{(688.79 - 682.95)}{2,180} = 0.003$$

Koefisien kekasaran lahan, $n = 0,200$ yaitu Tanah dengan rumput tipis dan gundul dengan permukaan sedikit kasar.

$$T_c = \frac{0.606 (2.18 \times 0.200)^{0.467}}{0.003^{0.234}} = 1.644 \text{ jam}$$

Selanjutnya menghitung Intensitas curah hujan, Berikut ini adalah perhitungan Intensitas curah hujan untuk kala ulang 5 tahun dengan hujan rencana sebesar 134.84 mm.

$$I = \left(\frac{R_{24}}{24}\right) \left(\frac{24}{T_c}\right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{134.84}{24}\right) \left(\frac{24}{1.644}\right)^{\frac{2}{3}} = 33.55 \text{ mm/jam}$$

Setelah besar intensitas hujan untuk berbagai kala ulang diperoleh, langkah selanjutnya adalah menghitung debit rencana. Untuk koefisien limpasan yang digunakan adalah Lempung Siltloam sebesar 0.70 dikarenakan jenis tata guna tanah pada Sungai Tougela yaitu Tanah Pertanian dengan kemiringan 10 – 30%.

Perhitungan debit rencana menggunakan metode rasional karena sudah memenuhi 2 persyaratan utama yaitu ukuran DAS kecil dan intensitas curah hujan merata di seluruh DPS dengan durasi tertentu. Perhitungan Debit Rencana untuk kala ulang 5 tahun dapat dilihat pada perhitungan dibawah.

$$Q = 0.278 \text{ C. I. A} = 0.278 \times 0.70 \times 33.55 \times 2.10 = 13.71 \text{ m}^3/\text{detik}.$$

Besar debit rencana dengan berbagai kala ulang dapat dilihat pada Tabel 3.

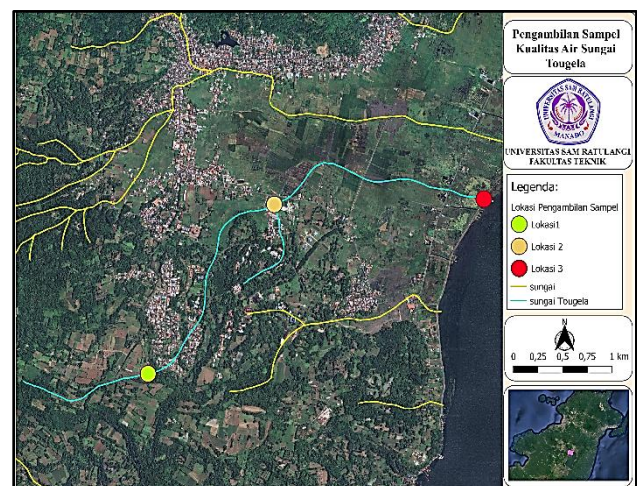
Tabel 3. Debit banjir dengan berbagai kala ulang

Kala ulang (Tahun)	Debit (m ³ /detik)
5	13.71
10	17.18
25	24.23
50	36.58
100	120.45

3.5 Pengujian Kualitas Air

Penentuan titik pengambilan sampel awal dilakukan pada 3 (tiga) titik di sungai Tougela. Pada penelitian ini, lokasi pengambilan sampel dimulai dari daerah Koya, Kabupaten Minahasa sebagai titik pengambilan sampel 1 dan sampai titik 3 yang berlokasi di outlet sungai Tougela yang terletak di Kecamatan Masarang. Koordinat titik pengambilan sampel dimulai dari 1°26'03" N dan 124°87'41" E, sampai dengan 1°27'53" N dan 124°90'43" E. Lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 4 berikut :

- Titik 1 terletak pada hulu sungai Tougela yang berlokasi di Kecamatan Koya, Kabupaten Minahasa pada koordinat 1°26'03" N dan 124°87'41" E.
- Titik 2. Pengambilan sampel air titik 2 terletak pada tengah sungai Tougela berlokasi di Kecamatan Koya, Kabupaten Minahasa pada Koordinat 1°27'64" N dan 124°88'50" E.
- Titik 3. Pengambilan sampel air pada titik 3 terletak pada hilir sungai Tougela yang terletak pada Kecamatan Kasarang, Kabupaten Minahasa pada koordinat 1°27'53" N dan 124°90'43" E.



Gambar 4. Lokasi titik pengambilan sampel

Pencemaran air di sungai Tougela yang mengalir dari hulu ke hilir dapat disebabkan oleh berbagai faktor yang berbeda tergantung pada aktivitas manusia dan penggunaan lahan di sepanjang alirannya. Penelitian ini khusus mengamati area pertanian dimana pencemaran air sering kali disebabkan oleh penggunaan pestisida dan pupuk kimia. Pestisida digunakan untuk mengendalikan hama tanaman, sementara pupuk kimia digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah dan hasil panen. Namun, zat-zat kimia ini dapat meresap ke dalam tanah dan terbawa oleh air hujan ke aliran sungai. Akibatnya, kandungan bahan kimia berbahaya seperti nitrat dan fosfat meningkat di dalam air, yang dapat menyebabkan eutrofikasi dan menurunkan kualitas air sungai.

Di bagian tengah sungai, yang melewati area pemukiman dan persawahan, sumber pencemaran air lebih bervariasi. Di daerah pemukiman, air sungai sering tercemar oleh limbah domestik berupa limbah rumah tangga, detergen, dan sampah organik. Limbah ini dapat mengandung bakteri patogen, bahan kimia berbahaya, dan zat organik yang dapat menyebabkan penurunan kualitas air dan berdampak negatif pada kesehatan manusia dan ekosistem sungai. Di area persawahan, penggunaan pestisida dan pupuk kimia juga berkontribusi terhadap pencemaran air. Selain itu, limbah dari peternakan di sekitar persawahan dapat menambah kandungan bahan organik dan bakteri ke dalam air sungai.

Pada bagian hilir sungai, pencemaran air merupakan gabungan dari semua sumber pencemaran yang ada di hulu dan tengah sungai. Semua kontaminan yang terbawa dari area perkebunan, pemukiman, dan persawahan akan berkumpul di bagian hilir. Ini menyebabkan konsentrasi zat pencemar menjadi lebih tinggi dan berpotensi menyebabkan kerusakan yang lebih parah pada ekosistem sungai dan kesehatan manusia. Di hilir, sedimen yang terbawa dari erosi tanah di daerah hulu dan tengah juga dapat menumpuk, menyebabkan kekeruhan air yang tinggi dan mengganggu ekosistem sungai.

3.6 Hasil Pengujian dan Analisis Kadar Nutrient

Berdasarkan data hasil pengukuran kandungan nutrient yang dilakukan pada tiga titik lokasi penelitian dengan menggunakan parameter *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan Fosfat. Pengambilan sampel dan analisis sampel di laboratorium dilakukan dan dengan hasil pengukuran sebagai berikut seperti pada Tabel 4.

Dari hasil analisis sampel air sungai Tougela, diketahui bahwa parameter BOD, COD memenuhi standar baku mutu Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 untuk Kelas I sampai Kelas IV. Sementara untuk parameter Fosfat hanya memenuhi standar baku mutu untuk Kelas III sampai Kelas IV (1.0 mg/L).

3.6.1 Hasil analisis parameter BOD

BOD digunakan sebagai indikator yang mengukur jumlah oksigen yang diperlukan oleh organisme perairan untuk memecah bahan pencemar yang terlarut di dalam ekosistem air. BOD adalah faktor yang digunakan untuk menilai tingkat pencemaran sungai karena semakin tinggi nilai BOD dalam air mengindikasikan bahwa air tersebut telah tercemar biasanya oleh limbah dari permukiman dan industri.

3.6.2 Hasil Analisis COD

COD digunakan untuk mengindikasikan jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh oksidan kimia untuk mengoksidasi bahan-bahan limbah dalam badan air. Nilai COD biasanya lebih tinggi daripada BOD karena dalam pengukuran COD, bahan-bahan yang tidak mudah terurai secara biologis dapat teroksidasi. Hasil penelitian menunjukkan nilai COD masih memenuhi standar baku mutu Kelas 1.

3.6.3 Hasil Analisis Fosfat

Fosfor sebagai fosfat merupakan parameter kimia yang sering dijadikan indikator tingkat kesuburan dan atau pencemaran perairan sungai/laut. Keberadaan senyawa fosfat dalam air sangat berpengaruh terhadap keseimbangan ekosistem perairan. Bila kadar fosfat dalam air rendah, seperti pada air alam (< 0.01 mg/L), pertumbuhan tanaman dan ganggang akan terhalang, dan keadaan ini disebut oligotrop. Hasil penelitian menunjukkan kadar fosfat yang sangat tinggi yang mengakibatkan pertumbuhan tanaman dan ganggang tidak terbatas lagi (keadaan eutrop), sehingga dapat mengurangi jumlah oksigen terlarut air.

3.6.4 Sedimen

Berdasarkan hasil analisis laboratorium, besar konsentrasi sedimen terlarut rata-rata antara titik 1 dan titik 3 adalah sebesar 4.4 gr/m^3 , ini mengartikan bahwa pada debit banjir $Q_{50}=36.58 \text{ m}^3/\text{det}$, akan menghasilkan sedimen yang cukup besar yaitu 160.95 gr/detik .

3.7 Pengelolaan Sedimen dan polutan

Parameter Fosfat memenuhi standar baku mutu Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 untuk Kelas III sampai kelas IV, namun tidak memenuhi Kelas I dan II. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan nilai fosfat sebesar 3 – 4.5 kali dari yang disyaratkan baku mutu Kelas 1. Ketersediaan fosfor yang tinggi menyebabkan perairan memiliki produktifitas tinggi pada permukaan air, yang akan menurun dengan cepat akibat penyerapan cahaya oleh biomasa plankton/alga. Pada kondisi lingkungan yang mendukung maka pertumbuhan fitoplankton terjadi secara terus menerus, sehingga dapat segera mencapai *algae blooming*/ledakan alga. Sungai Tougela yang sebagai salah satu inlet danau Tondano, dapat disimpulkan bahwa dengan tercemarnya sungai

Tougela maka integritas Danau Tondano pada tingkat rendah, sehingga perlu segera dilakukan penanganan khusus baik pada inlet dan badan air danau, secara

akurat, holistik dan penuh makna serta menghasilkan model pengelolaan danau yang akurat.

Tabel 4. Hasil analisis kualitas air Sungai Tougela

Parameter	Satuan	Standar Baku	Hasil Analisis		
		Mutu Kelas I	Titik I	Titik II	Titik III
Biological Oxygen Demand (BOD)	mg/L	6	2	2	2
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/L	10	<4	<4	<4
Fosfat	mg/L	0.2	0.6	0.7	0.9

Pengambilan sampel aliran sungai Tougela setelah melewati lahan basah (di tepi danau) dilakukan beberapa kali dengan rentang waktu setiap 3 hari. Dari 6 kali pengambilan sampel air dilakukan pengujian untuk mengetahui keberadaan senyawa fosfat, yang mana pada pengambilan sampel di titik 3 masih belum memenuhi standart baku mutu Air Kelas 1 dan Kelas 2.

Untuk parameter BOD dan COD tidak lagi dilakukan pengamatan karena memenuhi baku mutu air Kelas 1 dan 2. Pengambilan sampel larutan air bersedimen juga dilakukan pada 3 titik di bagian muara sungai Tougela, yaitu pada tepi kiri, tengah dan tepi kanan sungai Tougela.

Hasil pengamatan diperoleh kandungan fosfat masing-masing sampel adalah 0.81 mg/L, 0.73 mg/L, 0.82 mg/L, 0.77 mg/L, 0.71 mg/L dan 0.68 mg/L. Dari rata-rata nilai 6 hasil pengamatan ini nampak ada kecenderungan terjadi penurunan kadar kandungan fosfat dibanding pada pengamatan di titik 3 yaitu titik dimana sebelum aliran air sungai melewati lahan basah (=0.9 mg/L).

Penurunan kadar kandungan fosfat bervariasi antara 10 – 24.5 % menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan dengan diterapkannya lahan basah buatan untuk mereduksi polutan (Guo et al., 2026). Meskipun demikian, penurunan kadar kandungan fosfat ini belum mampu menaikkan kualitas air sesuai standar baku mutu air Kelas 1 dan Kelas 2.

Analisis laboratorium mekanika tanah untuk sampel aliran bersedimen pada 3 titik di muara sungai Tougela diperoleh kadar sedimen terlarut rata-rata sebesar 4.2 gr/m³. Nilai ini masih mendekati kadar sedimen terlarut sebelum aliran memasuki lahan basah, yaitu sebesar 4.4 gr/m³ sehingga dibutuhkan penerapan prinsip hidraulik seperti memperpanjang lintasan aliran air di sungai, memperpanjang waktu tempuh aliran sebelum memasuki lahan basah dengan membuat beberapa kelokan pada bagian paling hilir sungai agar sedimen dapat terdeposisi sebelum mengalir ke muara sungai/di danau. Alternatif lain adalah membagi aliran

air menjadi beberapa kompartemen sebelum memasuki lahan basah dan akan menjadi *on going study*.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan laju sedimentasi sungai Tougela sebesar 160.95 gr/detik. Dari hasil analisis sampel air sungai Tougela, diketahui bahwa parameter BOD, COD memenuhi standar baku mutu untuk kelas I sampai kelas IV sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Sementara untuk parameter Fosfat memenuhi standar baku mutu Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 untuk kelas III sampai kelas IV. Dari kondisi yang ada diperlukan upaya menjaga kelestarian danau Tondano dengan membangun lahan basah buatan terapung yang memanfaatkan tanaman lokal sekitar yakni Eceng gondok (*Eichornia crassipes*) dan Kangkung air (*Ipomoea aquatica*) yang tersedia di seputaran Danau Tondano.

Penerapan lahan basah dapat menurunkan kadar kandungan fosfat bervariasi antara 10 – 24.5 %, menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan untuk mereduksi polutan walaupun belum mampu menaikkan kualitas air sesuai standar baku mutu yang lebih baik. Kadar sedimen terlarut rata-rata diperoleh sebesar 4.2 gr/m³ atau terjadi pengurangan sebesar 4.6% dibanding kadar sedimen terlarut sebelum aliran memasuki lahan basah. Hal ini menunjukkan bahwa FTW memiliki potensi lebih baik untuk mereduksi fosfat daripada sedimen sehingga dibutuhkan studi lanjut tentang penerapan prinsip-prinsip hidraulik yaitu mengurangi kecepatan aliran air dan memperpanjang lintasan air agar sedimen dapat tereduksi sebelum memasuki lahan basah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Sam Ratulangi yang telah memberikan kesempatan dan membiayai penelitian Skema RDTU3 dengan Nomor Kontrak: 567/UN12.27/LT/2025. Terima kasih kepada Balai Wilayah Sungai Sulawesi 1

yang sudah membantu memberikan data sekunder yang diperlukan. Tim dari Laboratorium Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi yang sudah membantu dalam pengambilan data primer dan analisis mekanika tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Akinnawo, S. O., (2023). Eutrophication: Causes, Consequences, Physical, Chemical and Biological Techniques for Mitigation Strategies. *Environmental Challenges*, Vol.12.
- Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2022). Constructed Wetlands for Reclamation and Reuse of Wastewater and Urban Stormwater: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.836289>
- Brassel, K. E., & Reif, D. (1979). A Procedure to Generate Thiessen Polygons. *Geographical Analysis*, 11(3), 289–303. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1979.tb00695.x>
- Czuba, J. A., Straub, T. D., Curran, C. A., Landers, M. N., & Domanski, M. M. (2015). Comparison of fluvial suspended-sediment concentrations and particle-size distributions measured with in-stream laser diffraction and in physical samples. *Water Resources Research*, 51(1), 320–340. <https://doi.org/10.1002/2014WR015697>
- Emeka-Chris, C. C., Obineche, C., Unanka, B. O. (2022). Precipitation Intensity-Duration Occurrence Models Development for Designated Locations in the Southern Humid Rain Forest Zones of Nigeria. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 3(2), 277–291. <https://doi.org/10.46592/turkager.1190083>
- Fitriani, D., Satriyo, P., & Devianti, D. (2020). Analisis Debit Rencana Metode Rasional di Sub DAS Lawe Simpali Kabupaten Aceh Selatan. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 5(1), 491–500. <https://doi.org/10.17969/jimfp.v5i1.13679>
- Guo, Hongliang, Zhai, Xuetong Zhai, Li, Jiatu. (2026). Nitrogen and Phosphorus Removal in Constructed Wetland: Essential Effect of Substrates. *Process Safety And Environmental Protection*, Vol. 207.
- H. Zhang, J. Chen, G. Haffner,. (2023). Plateau Lake Water Quality and Eutrophication: Status And Challenges. *Water (Basel)*, 15 (337), pp. 1-6.
- Harlan, D., & Natasaputra, S. (2019). Study Of Flood Control And Reliability Index Of Tanggul River. *Jurnal Teknik Sipil*, 26(3), 195–204. <https://doi.org/10.5614/jts.2019.26.3.2>
- Hendratta, L. A., Ratu, Y. A., Laurentia, S. C., Koh, D. K., & Monica, L. (2024). *Sedimentation Analysis Study in Lake Tondano Due to the Development of the Surrounding Area*. 1–13. <https://doi.org/10.2174/0118741495347671240910115151>
- Kushwaha, A., Goswami, L., Kim, B. S., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K. H. (2024). Constructed wetlands for the removal of organic micropollutants from wastewater: Current status, progress, and challenges. *Chemosphere*, 360, 142364. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.142364>
- Kwak, S. K., & Kim, J. H. (2017). Statistical data preparation: management of missing values and outliers. *Korean Journal of Anesthesiology*, 70(4), 407. <https://doi.org/10.4097/kjae.2017.70.4.407>
- Layaliya, H. N., & Nugroho, J. (2024). Analisis Efektivitas Bangunan Pengendali Sedimen dalam Mengatasi Sedimentasi dan Erosi di Sungai Namo dengan Simulasi HEC-RAS 2D. *Journal on Education*, 7(1), 8491–8500. <https://doi.org/10.31004/joe.v7i1.7559>
- Sittadewi, E. H. (2011). Fungsi Strategis Danau Tondano, Perubahan Ekosistem dan Masalah yang Terjadi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 9(1), 59–66. <https://doi.org/10.29122/jtl.v9i1.444>
- Sorey, T. D., Bisri, M., & Sisinggih, D. (2016). Kajian Penanganan Sedimentasi Danau Tondano. *Jurnal Teknik Pengairan*, 7(2), 259–267.
- Urbasa, P. A., Undap, S. L., & Rompas, R. J. (2019). Dampak Kualitas Air Pada Budi Daya Ikan Dengan Jaring Tancap Di Desa Toulimembet Danau Tondano. *E-Journal BUDIDAYA PERAIRAN*, 3(1), 59–67. <https://doi.org/10.35800/bdp.3.1.2015.6932>
- Walangitan, H. D., Rotinsulu, W. C., & Paat, F. J. (2024). Analysis of Management Strategies for Lake Tondano Ecosystem in North Sulawesi, Indonesia Using Swot and AHP Methods. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(2), 1–20. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-087>