Jurnal Reka Lingkungan
ISSN(p): 2337-6228 | ISSN(e): 2722-6077 | Vol. 14 | No. 1 | Hal. 57-70
DOI: http://dx.doi.org/10.26760/rekalingkungan.v14i1.57-70 April 2026

EVALUASI STATUS MUTU AIR SUNGAI GIRIAN (BITUNG, SULAWESI UTARA) MENGGUNAKAN INTEGRASI INDEKS PENCEMARAN DAN STORET

YOSIA NICO WIJAYA*[1], DANIEL HARVEY TULIS[2], MARIA RUNTUWENE[3], NATALIE GWYNETH RUMAMPUK[1], ANGELINA HOLIYONO[1], CHARLITA VALENTINE PAATH[1],

1. Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
2. Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
3. Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

*Email: yosianicowijaya@unsrat.ac.id

ABSTRAK

Evaluasi kualitas air dan sedimen Sungai Girian di Kota Bitung penting dilakukan karena tekanan antropogenik dari industrialisasi, permukiman, dan aktivitas pelabuhan berpotensi menurunkan kualitas perairan. Penelitian ini bertujuan memetakan distribusi logam berat Hg, Pb, Cd, Cu, dan Ni serta menilai status mutu air dengan Indeks Pencemaran dan kondisi sedimen dengan metode STORET. Studi observasional dilakukan pada tiga stasiun air, yaitu hulu, tengah, dan muara, serta satu stasiun sedimen di muara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh logam terlarut pada kolom air masih berada di bawah baku mutu Kelas II. Walaupun terdeteksi peningkatan sesaat beban organik pada beberapa lokasi, nilai Indeks Pencemaran tetap berada pada kategori memenuhi baku mutu, dengan rerata 0,833 di 1GB, 0,739 di 2PK, dan 0,800 di 3MA. Sebaliknya, sedimen muara menunjukkan lonjakan Hg pada satu periode, meskipun skor STORET secara umum masih menunjukkan kondisi baik hingga sangat baik. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan air dan sedimen secara terpadu untuk mendukung pengelolaan Sungai Girian yang berkelanjutan.

***Kata kunci**: Indeks Pencemaran, STORET, logam berat, kualitas air, sedimen*

ABSTRACT

Evaluation of water quality and sediment in the Girian River, Bitung, is important because anthropogenic pressures from industrialization, settlements, and port activities may reduce aquatic environmental quality. This study aimed to map the distribution of Hg, Pb, Cd, Cu, and Ni and to assess water quality status using the Pollution Index and sediment condition using the STORET method. An observational study was conducted at three water stations representing the upstream, middle, and estuarine segments, and at one sediment station in the estuary. The results showed that all dissolved heavy metals in the water column remained below the Class II water quality standards. Although temporary increases in organic load were detected at several locations, the Pollution Index values still fell within the compliant category, with average values of 0.833 at 1GB, 0.739 at 2PK, and 0.800 at 3MA. In contrast, estuarine sediment showed a spike in Hg during one sampling period, although STORET scores generally still indicated good to very good conditions. These findings highlight the importance of integrated water and sediment monitoring to support sustainable management of the Girian River.

***Keywords**: Pollution Index, STORET, heavy metals, water quality, sediment*

1. PENDAHULUAN

Sungai berperan sentral dalam menopang kebutuhan domestik, ekonomi, dan ekologi di kawasan perkotaan serta industri. Dinamika industrialisasi, urbanisasi, dan intensifikasi aktivitas maritim kerap memicu peningkatan beban pencemar ke badan air, terutama pada kota pelabuhan dan kawasan ekonomi khusus. Kota Bitung di Sulawesi Utara merupakan simpul industri dan logistik strategis, dengan aktivitas perikanan, perkapalan, manufaktur pendukung, dan jasa pelabuhan yang berkembang pesat di sekitar Daerah Aliran Sungai (DAS) Girian. Tekanan antropogenik tersebut berpotensi menurunkan mutu air dan memunculkan risiko kesehatan serta ekologis jika tidak dikelola dengan baik.

Sungai Girian merupakan salah satu badan air penting di Kota Bitung, Sulawesi Utara, yang berperan dalam menunjang fungsi ekologis, drainase kawasan, serta aktivitas masyarakat di wilayah sekitarnya. Posisi Sungai Girian yang terhubung dengan kawasan permukiman, aktivitas industri, dan pelabuhan menjadikannya rentan terhadap peningkatan beban pencemar. Dalam konteks kota pelabuhan seperti Bitung, keberadaan sungai memiliki arti strategis karena berhubungan langsung dengan kualitas lingkungan perairan, kesehatan masyarakat, dan keberlanjutan aktivitas ekonomi. Oleh karena itu, evaluasi mutu Sungai Girian menjadi penting untuk memberikan gambaran kondisi aktual perairan serta dasar bagi upaya pengendalian pencemaran yang lebih tepat sasaran. Penelitian hidrologi sebelumnya menunjukkan dinamika debit dan tinggi muka air Sungai Girian yang sensitif terhadap curah hujan dan limpasan, faktor yang dapat memodulasi transport serta pengenceran polutan (Sondak dkk., 2019). Namun, basis data mengenai kadar logam berat spesifik di Sungai Girian masih terbatas, padahal kawasan hilirnya berada dekat aktivitas industri, pelabuhan, dan permukiman padat. Kesenjangan pengetahuan ini menimbulkan pertanyaan kunci tentang tingkat ketercemaran aktual, parameter dominan penyebab penurunan mutu, dan implikasinya terhadap strategi pengendalian.

Di antara berbagai polutan prioritas, logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), tembaga (Cu), dan nikel (Ni) menjadi perhatian karena bersifat toksik, persisten, sukar terdegradasi, dan cenderung mengalami bioakumulasi. Berbagai studi di Indonesia menunjukkan bahwa logam berat telah terdeteksi pada air, sedimen, maupun biota perairan, serta berimplikasi pada penurunan mutu lingkungan dan potensi risiko kesehatan, sebagaimana dilaporkan di perairan Makassar, muara Krueng Aceh, Sungai Tondano, Sungai Lowatag, Sungai Winongo, dan Waduk Saguling (Polapa dkk., 2022; Hadi dkk., 2018; Maddusa dkk., 2017; Patty dkk., 2018; Fadlillah dkk., 2022; Paramita dkk., 2017). Temuan-temuan tersebut menegaskan pentingnya pemantauan logam berat secara berkala, terutama pada sungai yang berada di bawah tekanan aktivitas industri dan pelabuhan.

Secara kebijakan, PP Nomor 22 Tahun 2021 menyediakan dasar baku mutu air berdasarkan peruntukan, sedangkan penilaian status mutu di Indonesia banyak menggunakan Indeks Pencemaran dan metode STORET. Kedua pendekatan ini dinilai saling melengkapi karena dapat memberikan ringkasan tingkat ketercemaran sekaligus menunjukkan parameter dominan yang menyebabkan penurunan mutu (Romdania dkk., 2018; Sari & Wijaya, 2019; Hadi dkk., 2018; Santika, 2024). Penerapan kedua metode pada berbagai sungai dan perairan pesisir di Indonesia juga menunjukkan bahwa keduanya relevan digunakan sebagai alat evaluasi mutu air pada lokasi baru, termasuk Sungai Girian.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dirumuskan ke dalam beberapa pertanyaan utama, yaitu: bagaimana sebaran konsentrasi logam berat Hg, Pb, Cd, Cu, dan Ni pada air dan sedimen Sungai Girian; bagaimana status mutu air Sungai Girian jika dievaluasi menggunakan pendekatan Indeks Pencemaran; bagaimana status mutu sedimen Sungai Girian jika dievaluasi menggunakan metode STORET; serta parameter apa yang paling

berkontribusi terhadap potensi penurunan mutu dan perlu menjadi prioritas dalam strategi pengendalian pencemaran.

Secara ilmiah dan praktis, penelitian ini memiliki dua rasional utama. Pertama, dari sisi ilmu, diperlukan pembaruan data primer kandungan Hg, Pb, Cd, Cu, dan Ni pada beberapa titik strategis Sungai Girian, berikut penilaian status mutu yang andal melalui pendekatan ganda Indeks Pencemaran dan STORET. Kombinasi keduanya memberi ringkasan ketercemaran sekaligus mengidentifikasi parameter kritis yang melampaui baku mutu air atau nilai acuan sedimen. Kedua, dari sisi kebijakan, hasil kuantifikasi diperlukan untuk merumuskan rekomendasi pengendalian pencemaran yang selaras dengan PP 22/2021 serta dapat diintegrasikan dalam pengelolaan DAS dan perencanaan lingkungan kawasan industri maritim Bitung.

Tujuan penelitian ini adalah memperoleh gambaran komprehensif tentang mutu lingkungan Sungai Girian melalui serangkaian sasaran yang saling terkait, yaitu memetakan konsentrasi logam berat Hg, Pb, Cd, Cu, dan Ni pada beberapa stasiun pengamatan dalam periode pengambilan sampel yang terencana; mengevaluasi status mutu air menggunakan pendekatan Indeks Pencemaran berdasarkan baku mutu air Kelas II sesuai PP No. 22 Tahun 2021; menilai kondisi sedimen berdasarkan nilai acuan ANZG melalui metode STORET; dan pada akhirnya merumuskan rekomendasi strategi pengendalian pencemaran yang operasional dan kontekstual bagi Kota Bitung untuk mendukung pengelolaan kualitas lingkungan yang berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

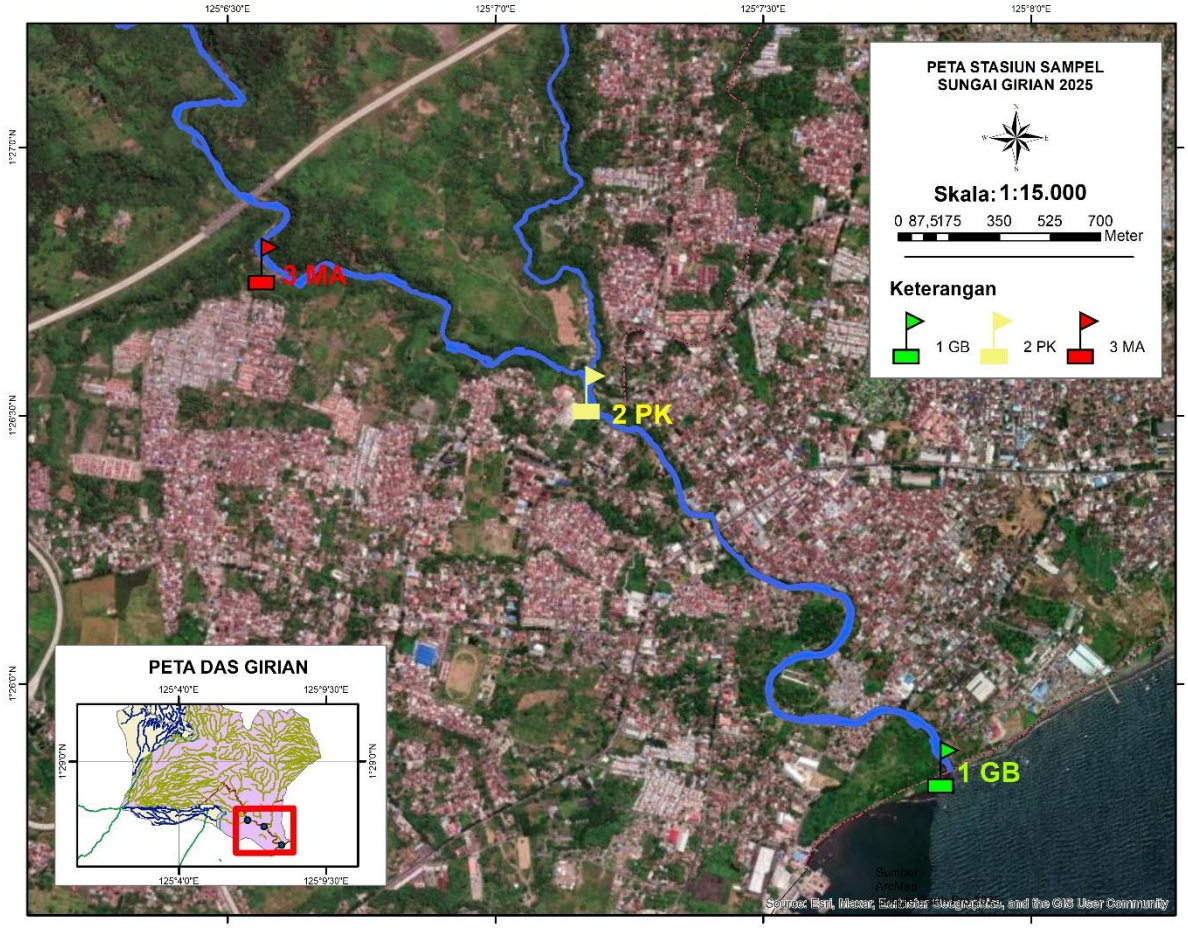
Penelitian ini menggunakan rancangan observasional kuantitatif untuk menilai mutu air Sungai Girian melalui pengukuran parameter kunci dan pembandingan terhadap baku mutu peruntukan. Penilaian status mutu dilakukan dengan dua pendekatan yang saling melengkapi, yaitu Indeks Pencemaran dan metode STORET. Seluruh interpretasi hasil Indeks Pencemaran mengacu pada ketentuan baku mutu air Kelas II dalam PP No. 22 Tahun 2021 serta aturan penetapan status mutu air menurut Kepmen LH No. 115 Tahun 2003, sehingga keluaran studi dapat langsung ditautkan dengan kebutuhan pengelolaan kualitas air di tingkat daerah, sedangkan interpretasi hasil STORET mengacu pada nilai acuan ANZG (*Australian and New Zealand Governments)* 2024 tentang *Toxicant Default Guideline Values for Sediment Quality*.

Lokasi penelitian berada pada ruas Sungai Girian, Kota Bitung, dengan pemilihan stasiun yang mewakili gradasi tekanan pencemar dari hulu, tengah, hingga muara. Penentuan stasiun dilakukan secara *purposive* berdasarkan observasi lapangan awal, keterwakilan posisi spasial pada alur sungai, perbedaan penggunaan lahan di sekitar lokasi, serta keberadaan sumber tekanan dominan seperti permukiman, aktivitas industri, dan kawasan pelabuhan. Dengan pendekatan tersebut, Stasiun 3MA ditetapkan sebagai segmen hulu di Desa Manembo-nembo Atas yang relatif minim tekanan langsung namun tetap menerima limpasan dari hulu DAS, Stasiun 2PK mewakili segmen tengah di kawasan permukiman padat Desa Pinokalan dengan dominasi pengaruh aktivitas domestik, sedangkan Stasiun 1GB mewakili segmen hilir atau muara di Desa Girian Bawah yang dipengaruhi campuran air tawar serta aktivitas maritim dan pelabuhan. Penetapan lokasi ini sejalan dengan tujuan penelitian untuk menilai status mutu air dan ketercemaran logam berat pada ruas sungai dengan sumber tekanan yang berbeda, lalu mengevaluasinya menggunakan Indeks Pencemaran serta memperkuat interpretasi melalui pembacaan parameter mutu lainnya (Sari & Wijaya, 2019; Romdania dkk., 2018; PP No. 22/2021). Penentuan koordinat dilakukan menggunakan GPS untuk menjamin keterlacakan spasial, sementara informasi hidrologi setempat, termasuk dinamika debit dan tinggi muka air Sungai Girian, digunakan sebagai dasar penjadwalan

pengambilan sampel agar variabilitas musiman dapat terwakili dalam data (Sondak dkk., 2019). Koordinat lokasi titik sampling disajikan pada **Tabel 1**, sedangkan posisi spasial masing-masing stasiun pengamatan pada ruas Sungai Girian ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Tabel 1. Koordinat Lokasi Titik Sampling

Stasiun	Lokasi	Koordinat		Deskripsi Lokasi
		Lintang	Bujur	
1GB	Desa Girian Bawah	01°25.834'	125°07.855'	Muara sungai dekat laut di Desa Girian Bawah
2PK	Desa Pinokalan	01°26.537'	125°07.187'	Bagian tengah sungai, area pemukiman padat penduduk di Desa Pinokalan
3MA	Desa Manembo-nembo Atas	01°26.779'	125°06.585'	Hulu sungai di Desa Manembo-nembo Atas



Gambar 1. Lokasi Titik Sampling

Pengambilan sampel dilakukan dalam tiga periode selama satu tahun dengan jeda sekitar dua bulan untuk menangkap dinamika musiman. Pada setiap periode, sampel air diambil pada tiga stasiun pengamatan, yaitu 1GB, 2PK, dan 3MA, sedangkan sampel sedimen diambil pada Stasiun 1GB yang mewakili segmen muara. Prosedur pengambilan, penanganan, dan pengawetan sampel air mengikuti acuan standar nasional yang berlaku untuk pengambilan contoh air permukaan, yaitu SNI 6989.57:2008 tentang Metode Pengambilan Contoh Air Permukaan, dengan penyesuaian lapangan sesuai karakteristik lokasi penelitian.

Pengambilan sampel dilakukan pada waktu yang sebanding untuk meminimalkan bias akibat perbedaan waktu pengambilan sampel dalam satu hari. Sampel air diambil menggunakan alat pengambil sampel air ke dalam botol polietilena yang telah dibersihkan, kemudian diawetkan dengan penambahan asam nitrat kemurnian tinggi hingga pH kurang dari 2 dan disimpan pada suhu sekitar 4 °C selama transportasi. Sampel sedimen diambil menggunakan *grab sampler*, ditempatkan dalam wadah *inert*, disimpan dalam kondisi dingin, lalu dipersiapkan untuk analisis melalui proses pengeringan dan homogenisasi sesuai kebutuhan pengujian logam berat.

Metode uji yang digunakan untuk setiap parameter mengikuti standar nasional yang berlaku. Untuk parameter fisika air sungai, TSS dianalisis dengan SNI 6989.3:2019, suhu dengan SNI 06-6989.23-2005, dan kekeruhan dengan SNI 06-6989.25-2005. Untuk parameter kimia air sungai, pH mengacu SNI 6989.11:2019, BOD SNI 6989.72:2009, dan COD mengacu pada IK-1.17 berbasis spektrofotometri. Analisis logam berat terlarut pada air masing-masing mengikuti SNI 6989.78-2019 untuk Hg, SNI 6989.46:2009 untuk Pb, SNI 06-6989.38-2005 untuk Cd, serta SNI 6989.84:2019 untuk Cu dan Ni. Untuk sedimen, pengujian Hg dilakukan dengan IK-1.42 menggunakan teknik *cold vapor* AAS, sedangkan Pb, Cd, Cu, dan Ni mengacu SNI 8910:2021. Pemakaian standar-standar ini memastikan prosedur analitik yang seragam, dapat ditelusuri, dan sejalan dengan praktik laboratorium lingkungan di Indonesia.

Analisis laboratorium terhadap logam berat merkuri, timbal, kadmium, tembaga, dan nikel dilakukan menggunakan spektrometri serapan atom. Preparasi sampel air dan sedimen mengikuti prosedur destruksi asam yang sesuai untuk melepaskan logam dari matriks. Kuantifikasi dilakukan pada panjang gelombang spesifik unsur dengan kurva kalibrasi multi titik dan verifikasi linearitas. Batas deteksi operasional dievaluasi dari simpangan baku replikasi blanko, sementara keabsahan hasil dipastikan melalui ulangan, penambahan standar, serta pemantauan perolehan kembali. Hasil dilaporkan dalam mg per liter untuk air dan mg per kilogram kering untuk sedimen agar sejalan dengan praktik pelaporan nasional.

Jaminan mutu dan pengendalian mutu diterapkan di lapangan dan laboratorium. Pada tingkat lapangan dilakukan duplo lapangan dan blanko peralatan pada sejumlah stasiun. Pada tingkat laboratorium dilakukan analisis duplo, pemeriksaan ulang kurva kalibrasi di awal dan akhir *batch*, serta uji perolehan kembali melalui penambahan standar atau bahan acuan pada sebagian sampel. Kriteria penerimaan mencakup deviasi ulangan yang wajar untuk konsentrasi di atas batas kuantifikasi dan perolehan kembali yang berada pada rentang yang disetujui laboratorium, sehingga ketidakpastian pengukuran dapat ditekan dan interpretasi hasil lebih andal.

Perhitungan Indeks Pencemaran dilakukan dengan mengonversi setiap hasil pengukuran menjadi rasio terhadap baku mutu Kelas II, kemudian mengagregasi nilai maksimum dan rataan sesuai formula IP untuk menghasilkan satu nilai indeks per stasiun. Klasifikasi hasil IP mengikuti kategori nasional: memenuhi baku mutu, tercemar ringan, tercemar sedang, dan tercemar berat.

Penilaian mutu air berdasarkan Indeks Pencemaran (IP) mengikuti pedoman resmi Kepmen LH No. 115 Tahun 2003. IP dihitung dengan menggabungkan dua informasi, yaitu rasio maksimum dan rasio rata-rata antara konsentrasi terukur (Ci) dan baku mutu untuk peruntukan tertentu (Lij). Persamaan yang digunakan adalah:

$$IPj = \sqrt{\{ [((Ci/Lij)M)^2 + ((Ci/Lij)R)^2] / 2 \}} \quad \text{.....(1)}$$

Keterangan: IPj adalah nilai indeks untuk peruntukan j; Ci konsentrasi parameter i; Lij adalah ambang baku mutu parameter i pada peruntukan j; (Ci/Lij)M menyatakan rasio

tertinggi yang terukur; dan (Ci/Lij)R adalah rasio rata-rata. Semakin besar IP, semakin tinggi tingkat pencemaran.

Kriteria penafsiran IP adalah sebagai berikut: IP 0 sampai 1 menunjukkan perairan memenuhi baku mutu; IP lebih dari 1 hingga 5 menandakan tercemar ringan; IP lebih dari 5 hingga 10 menunjukkan tercemar sedang; dan IP di atas 10 diklasifikasikan tercemar berat. Pembagian kelas ini memudahkan perumusan tindakan pengendalian pencemaran yang proporsional.

Metode STORET digunakan sebagai pelengkap dengan memberi skor untuk setiap parameter yang melampaui nilai acuan sedimen, lalu menjumlahkannya menjadi skor total per stasiun yang selanjutnya dipetakan ke dalam kelas mutu sedimen. Kombinasi kedua pendekatan ini memberikan ringkasan tingkat ketercemaran sekaligus menyoroti parameter yang dominan berkontribusi terhadap penurunan mutu.

Pengolahan data dilakukan secara deskriptif dan komparatif antarperiode dan antarstasiun. Statistik ringkas seperti rerata dan simpangan baku digunakan untuk menggambarkan sebaran konsentrasi. Hasil IP dan STORET diinterpretasikan dengan mempertimbangkan karakteristik setempat, potensi sumber beban, serta dinamika hidrologi. Temuan pada air yang melebihi baku mutu dan temuan pada sedimen yang melebihi nilai acuan dibahas bersama parameter pendukung seperti pH, TSS, BOD, dan COD guna merumuskan rekomendasi pengendalian pencemaran yang operasional bagi pengelolaan Sungai Girian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Uji Laboratorium Air Sungai Per Parameter

Hasil uji laboratorium air Sungai Girian pada tiga stasiun dan tiga periode pengambilan sampel disajikan pada **Tabel 2**. Tabel ini memuat seluruh parameter fisika, kimia, dan logam berat terlarut yang digunakan sebagai dasar untuk menilai kondisi mutu air pada masing-masing lokasi pengamatan.

Tabel 2. Data Hasil Uji Laboratorium Air Sungai Girian per Stasiun dan per Periode

Para-meter	Unit	1GB			2PK			3MA		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
TSS	mg/L	2	4	6	6	9	10	9	5	8
Suhu	°C	28	27	29	27	28	27	27	27	26
Keke-ruhan	NTU	0,4	1,6	0,6	0,8	1,1	0,3	0,9	2,9	2,0
pH	-	7,0	7,5	6,4	7,7	7,8	8,1	7,9	7,9	7,0
BOD	mg/L	2	4	3	2	1	1	1	1	1
COD	mg/L	12	4	22	11	<4	14	31	<4	<4
Hg	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003	0,0001	<0,0001
Pb	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,0006
Cd	mg/L	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,00001	0,00006	<0,00001	<0,00001
Cu	mg/L	0,005	<0,0023	<0,002	0,004	<0,0023	<0,002	0,004	<0,0023	<0,002
Ni	mg/L	<0,02	<0,016	<0,02	<0,02	<0,016	<0,02	<0,02	<0,016	<0,02

Ringkasan hasil uji kualitas air dalam bentuk rerata dan simpangan baku antarperiode disajikan pada **Tabel 3**. Tabel ini digunakan untuk menunjukkan kecenderungan umum mutu air pada masing-masing stasiun secara lebih ringkas. Data hasil uji air di tiga stasiun selama tiga periode yang disajikan pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa secara umum kualitas kolom air Sungai Girian masih berada pada kondisi yang baik. Hal ini terlihat dari nilai TSS, suhu, pH, serta seluruh logam berat terlarut yang masih berada di bawah baku mutu yang berlaku, sehingga perairan pada saat pengamatan masih dapat dikategorikan memenuhi

baku mutu untuk peruntukan Kelas II (PP No. 22/2021). Kondisi ini sejalan dengan pendekatan penilaian mutu air yang menekankan pentingnya pembacaan beberapa parameter secara bersama-sama, bukan hanya dari satu parameter saja (Sari & Wijaya, 2019; Romdania dkk., 2018).

Tabel 3. Ringkasan hasil uji kualitas air Sungai Girian berdasarkan rerata ± simpangan baku antarperiode

Parameter	Unit	Baku mutu Kelas II	1GB (rerata ± SD)	2PK (rerata ± SD)	3MA (rerata ± SD)
TSS	mg/L	50	4,00 ± 2,00	8,33 ± 2,08	7,33 ± 2,08
Suhu	°C	deviasi 3 °C	28,00 ± 1,00	27,33 ± 0,58	26,67 ± 0,58
Kekeruhan	NTU	-	0,87 ± 0,64	0,73 ± 0,40	1,93 ± 1,00
pH	-	6-9	6,97 ± 0,55	7,87 ± 0,21	7,60 ± 0,52
BOD	mg/L	3	3,00 ± 1,00	1,33 ± 0,58	1,00 ± 0,00
COD	mg/L	25	12,67 ± 9,02	9,67 ± 5,13	13,00 ± 15,59
Hg	mg/L	0,002	0,00010 ± 0,00000	0,00013 ± 0,00006	0,00017 ± 0,00012
Pb	mg/L	0,03	0,00010 ± 0,00000	0,00010 ± 0,00000	0,00030 ± 0,00026
Cd	mg/L	0,01	0,00001 ± 0,00000	0,00001 ± 0,00000	0,00003 ± 0,00003
Cu	mg/L	0,02	0,00310 ± 0,00165	0,00277 ± 0,00108	0,00277 ± 0,00108
Ni	mg/L	0,05	0,01867 ± 0,00231	0,01867 ± 0,00231	0,01867 ± 0,00231

Catatan: Simpangan baku (SD) dihitung dari variasi antarperiode pengambilan sampel. Untuk nilai di bawah batas hasil uji, perhitungan memakai nilai batas hasil uji sebagai pendekatan konservatif.

Jika dilihat dari hubungan antarparameter fisika dan kimia dasar yang disajikan pada **Tabel 3**, nilai TSS dan kekeruhan yang rendah menunjukkan bahwa jumlah partikel tersuspensi di air masih kecil. Kondisi ini penting karena partikel di dalam air sering menjadi media pembawa logam berat. Pada Sungai Girian, rendahnya TSS dan kekeruhan diikuti oleh rendahnya kadar Hg, Pb, Cd, Cu, dan Ni terlarut, sehingga dapat dipahami bahwa perpindahan logam dalam kolom air selama periode pengamatan juga masih terbatas. Nilai pH yang berada pada kisaran netral hingga sedikit basa turut mendukung kondisi tersebut, karena pada keadaan seperti ini beberapa logam cenderung tidak mudah larut di air. Dengan kata lain, hubungan antara TSS, kekeruhan, pH, dan logam berat menunjukkan bahwa kondisi dasar perairan Sungai Girian masih relatif stabil dan belum menunjukkan tekanan kuat dari pencemaran logam berat terlarut (Hadi dkk., 2018; Romdania dkk., 2018; Sari & Wijaya, 2019).

Perubahan kualitas air yang lebih terlihat justru muncul pada parameter organik, terutama BOD dan COD. Nilai BOD tertinggi ditemukan di Stasiun 1GB, sedangkan COD tertinggi muncul di Stasiun 3MA. Pola ini menunjukkan bahwa gangguan kualitas air di Sungai Girian selama penelitian lebih banyak berkaitan dengan tambahan bahan organik dibandingkan dengan logam berat. Pada bagian hilir, kenaikan BOD dapat dikaitkan dengan pengaruh aktivitas domestik dan limpasan dari kawasan permukiman, sedangkan di bagian hulu kenaikan COD dapat berasal dari bahan organik alami atau masukan setempat yang terbawa aliran. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian pada sungai perkotaan lain di Indonesia yang menunjukkan bahwa beban organik sering menjadi penanda awal penurunan mutu air, bahkan ketika kadar logam berat masih rendah (Harahap dkk., 2020; Suriadikusumah dkk., 2021).

Jika seluruh parameter dibaca secara bersama, terlihat bahwa Sungai Girian memiliki pola mutu air yang cukup jelas. Dari satu sisi, parameter fisika dasar, pH, dan logam berat menunjukkan kondisi yang masih aman dan stabil. Dari sisi lain, BOD dan COD memperlihatkan bahwa sungai ini tetap menerima tekanan pencemaran organik pada lokasi tertentu. Hubungan ini penting karena menunjukkan bahwa masalah utama pada kolom air Sungai Girian saat ini bukanlah pencemaran logam berat terlarut, melainkan tambahan

beban organik yang muncul pada waktu dan lokasi tertentu. Walaupun demikian, rendahnya logam di air tidak berarti risiko logam dapat diabaikan, sebab beberapa logam dapat berpindah dan tersimpan pada sedimen, lalu muncul kembali dalam kondisi tertentu. Karena itu, hasil air ini tetap perlu dibaca bersama hasil sedimen agar gambaran mutu lingkungan Sungai Girian menjadi lebih utuh (Hadi dkk., 2018; Maddusa dkk., 2017; Polapa dkk., 2022; Paramita dkk., 2017).

3.2 Penentuan Status Mutu Air Sungai Menggunakan Indeks Pencemaran

Hasil perhitungan rasio parameter terhadap baku mutu, nilai rata-rata, nilai maksimum, dan Indeks Pencemaran pada setiap stasiun dan periode disajikan pada **Tabel 4**. Adapun rekap nilai Indeks Pencemaran rata-rata per stasiun ditunjukkan pada **Tabel 5**. Hasil IP per periode memperlihatkan seluruh pengamatan berada pada kategori memenuhi baku mutu. Terdapat dua kejadian bertanda perhatian, yaitu 3MA periode 1 ketika rasio maksimum COD mencapai 1,24 dan 1GB periode 2 ketika BOD melebihi ambang. Namun, karena komponen rataan parameter lain masih rendah, nilai IP teragregasi tetap berada di bawah 1.

Tabel 4. Data Baku Mutu (Lij), dan Rasio Hasil Uji dengan Baku Mutu (Ci/Lij), Rasio Rata-Rata [(Ci/Lij)R], Rasio Tertinggi yang Terukur [(Ci/Lij)M], Indeks Pencemaran (IPj), dan Status Mutu di Sungai Girian

No	Para-meter	Baku Mutu		1GB			2PK			3MA		
		Lij	Satuan	Ci/Lij -1	Ci/Lij -2	Ci/Lij -3	Ci/Lij -1	Ci/Lij -2	Ci/Lij -3	Ci/Lij -1	Ci/Lij -2	Ci/Lij -3
1	TSS	50	mg/L	0,040	0,080	0,120	0,120	0,180	0,200	0,180	0,100	0,160
2	ΔSuhu	3	°C	1,000	0,333	0,667	0,667	0,333	0,333	0,667	1,000	0,667
3	pH	6–9	-	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
4	BOD	3	mg/L	0,667	1,333	1,000	0,667	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
5	COD	25	mg/L	0,480	0,160	0,880	0,440	0,160	0,560	1,240	0,160	0,160
6	Hg	0,002	mg/L	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,100	0,150	0,050	0,050
7	Pb	0,03	mg/L	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,007	0,003	0,020
8	Cd	0,01	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,006	0,001	0,001
9	Cu	0,02	mg/L	0,250	0,115	0,100	0,200	0,115	0,100	0,200	0,115	0,100
10	Ni	0,05	mg/L	0,400	0,320	0,400	0,400	0,320	0,400	0,400	0,320	0,400
(Ci/Lij)R				**0,389**	**0,340**	**0,422**	**0,355**	**0,250**	**0,303**	**0,418**	**0,308**	**0,289**
(Ci/Lij)M				**1,000**	**1,333**	**1,000**	**1,000**	**1,000**	**1,000**	**1,240**	**1,000**	**1,000**
IPj				**0,759**	**0,973**	**0,768**	**0,750**	**0,729**	**0,739**	**0,925**	**0,740**	**0,736**
Status Mutu				**Memenuhi**	**Memenuhi**	**Memenuhi**	**Memenuhi**	**Memenuhi**	**Memenuhi**	**Memenuhi**	**Memenuhi**	**Memenuhi**

Tabel 5. Nilai Indeks Pencemaran Rata-rata di Sungai Girian

Stasiun	Indeks Pencemaran	Status Mutu
1GB	0,833	Memenuhi
2PK	0,739	Memenuhi
3MA	0,800	Memenuhi

Rekap nilai IP rata-rata per stasiun menunjukkan: Stasiun 1GB 0,833, 2PK 0,739, dan 3MA 0,800. Seluruhnya berada pada rentang 0 sampai kurang dari 1, sehingga mengindikasikan status memenuhi baku mutu atau kondisi baik menurut kriteria IP nasional. Pola ini menyiratkan bahwa kualitas perairan permukaan Sungai Girian pada saat pengamatan berada pada kondisi yang dapat diterima untuk peruntukan Kelas II, dengan catatan terdapat kejadian episodik lonjakan beban organik yang perlu diwaspadai pada segmen hulu dan hilir. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menunjukkan IP efektif merangkum kondisi multi-parameter dan tidak mudah terdistorsi oleh satu parameter yang meningkat sesaat, berbeda dengan STORET yang cenderung sensitif mengidentifikasi parameter penyumbang dominan deviasi mutu untuk tujuan pengendalian (Romdania dkk., 2018; Sari & Wijaya, 2019; Santika, 2024).

Secara implikatif, pengelolaan harian perlu menitikberatkan mitigasi sumber organik domestik untuk menurunkan risiko lonjakan BOD dan COD sesaat di hilir maupun hulu, misalnya melalui peningkatan pengolahan air limbah domestik skala komunal dan pengendalian limpasan di permukiman padat. Untuk logam berat, strategi pemantauan berkala dengan memasukkan matriks sedimen disarankan guna mendeteksi akumulasi jangka panjang sebagaimana ditunjukkan di beragam studi perairan Indonesia, termasuk sungai dan ekosistem pesisir (Hadi dkk., 2018; Patty dkk., 2018; Polapa dkk., 2022; Paramita dkk., 2017).

3.3 Hasil Uji Laboratorium Sedimen Per Parameter

Hasil uji laboratorium sedimen pada Stasiun 1GB selama tiga periode pengambilan sampel disajikan pada **Tabel 6**. Tabel ini menunjukkan konsentrasi logam berat pada sedimen serta nilai ringkas rerata dan simpangan baku yang digunakan untuk membaca pola akumulasi logam pada segmen muara.

Tabel 6. Data Hasil Uji Laboratorium Sedimen di Stasiun 1GB per Periode

Parameter	Unit	Nilai acuan ANZG	1GB			
			1	2	3	Rerata ± SD
Hg	mg/kg	0,15	0,01	3,92	<0,01	1,31 ± 2,26
Pb	mg/kg	50	0,5	38,5	32,0	23,67 ± 20,32
Cd	mg/kg	1,5	<0,005	<0,08	<0,08	0,055 ± 0,043
Cu	mg/kg	65	26,4	24,7	16,3	22,47 ± 5,41
Ni	mg/kg	21	2,3	4,8	3,4	3,50 ± 1,25

Catatan: Simpangan baku (SD) dihitung dari variasi antarperiode pengambilan sampel. Untuk nilai di bawah batas hasil uji, perhitungan memakai nilai batas hasil uji sebagai pendekatan konservatif.

Pada bagian sedimen, pembandingan hasil uji dilakukan menggunakan nilai acuan ANZG (*Australian and New Zealand Governments*) 2024 untuk *Toxicant Default Guideline Values for Sediment Quality*. Acuan yang digunakan pada penelitian ini adalah Hg 0,15 mg/kg, Pb 50 mg/kg, Cd 1,5 mg/kg, Cu 65 mg/kg, dan Ni 21 mg/kg. Berdasarkan acuan tersebut, hasil uji menunjukkan bahwa sebagian besar logam berat pada sedimen Stasiun 1GB masih berada di bawah nilai acuan, kecuali Hg yang pada satu periode meningkat tajam hingga melampaui nilai acuan. Dengan demikian, pembacaan sedimen di muara Sungai Girian menunjukkan bahwa masalah utama bukan terjadi merata pada semua logam, tetapi lebih terfokus pada Hg sebagai parameter yang paling perlu diwaspadai.

Jika seluruh parameter dibaca secara bersama, terlihat bahwa Hg memiliki pola yang paling berbeda dibandingkan Pb, Cd, Cu, dan Ni. Nilai Hg rendah pada dua periode, tetapi melonjak sangat tinggi pada satu periode, sehingga rerata dan simpangan bakunya menjadi paling besar. Pola ini menunjukkan bahwa akumulasi Hg di sedimen muara tidak berlangsung stabil, melainkan dipengaruhi oleh kejadian tertentu yang mendorong pelepasan atau pengendapan logam secara lebih kuat. Kondisi tersebut sesuai dengan sifat Hg yang mudah terikat pada partikel halus dan cenderung terkumpul di sedimen, sehingga perubahan di sedimen tidak selalu langsung tampak pada kolom air (Turner dkk., 2001; Fang & Lien, 2021). Pada kawasan muara dan pelabuhan, proses seperti pengerukan, lalu lintas kapal, dan gangguan dasar perairan juga dapat memicu naiknya kembali logam dari sedimen ke lingkungan sekitar (Guarnieri dkk., 2021; Chen dkk., 2020).

Berbeda dengan Hg, nilai Pb, Cd, Cu, dan Ni cenderung lebih rendah dan seluruhnya masih berada di bawah nilai acuan. Walaupun demikian, keempat logam ini tetap menunjukkan variasi antarperiode, yang berarti sedimen muara tetap menerima pengaruh dari berbagai sumber di sekitarnya. Pb dan Cd yang tetap rendah di kolom air tetapi muncul pada sedimen

mendukung pemahaman bahwa logam-logam tersebut lebih mudah tertahan pada partikel dan bahan organik sedimen dibanding tetap berada dalam fase terlarut. Hal yang sama juga terlihat pada Cu dan Ni, yang nilainya tidak melampaui acuan, tetapi tetap menunjukkan adanya akumulasi pada sedimen sebagai tempat penyimpanan alami logam. Pola ini sejalan dengan penjelasan bahwa interaksi antara air dan sedimen sangat menentukan pergerakan logam, terutama pada perairan muara yang dipengaruhi perubahan arus, pengadukan sedimen, dan kondisi kimia lokal (Miranda dkk., 2021; Byrnes dkk., 2020; Zhao dkk., 2024).

Jika dikaitkan dengan kondisi lokal Sungai Girian, Stasiun 1GB berada pada kawasan muara yang langsung dipengaruhi aktivitas pelabuhan, pergerakan kapal, dan masukan aliran dari bagian sungai di atasnya. Karena itu, sedimen di lokasi ini lebih mudah menjadi tempat berkumpulnya logam dibandingkan kolom air. Dalam konteks ini, lonjakan Hg dapat dipahami sebagai hasil gabungan antara sifat alami Hg yang mudah tersimpan di sedimen dan adanya gangguan lokal yang memicu perpindahan kembali logam tersebut. Di sisi lain, Pb, Cd, Cu, dan Ni yang tetap berada di bawah nilai acuan menunjukkan bahwa tekanan pencemaran logam di muara tidak sama kuat untuk semua unsur. Artinya, pembahasan hasil sedimen Sungai Girian tidak menunjukkan pencemaran logam berat yang merata, tetapi lebih menegaskan bahwa Hg merupakan indikator paling sensitif untuk menggambarkan risiko di lokasi muara, termasuk kemungkinan pengaruh sumber lama atau sumber regional yang masih tersisa di lingkungan Sulawesi Utara (Lasut dkk., 2010; Kambey dkk., 2001).

Secara keseluruhan, keterkaitan antar semua parameter sedimen memperlihatkan bahwa muara Sungai Girian berfungsi sebagai tempat penumpukan logam, tetapi tidak semua logam menunjukkan perilaku yang sama. Hg menjadi parameter yang paling menonjol karena memperlihatkan lonjakan yang jelas, sedangkan Pb, Cd, Cu, dan Ni lebih menunjukkan pola akumulasi rendah sampai sedang yang masih berada di bawah nilai acuan. Perbedaan ini penting karena menunjukkan bahwa strategi pengelolaan tidak cukup hanya melihat jumlah logam secara umum, tetapi perlu memperhatikan unsur mana yang paling peka terhadap perubahan kondisi muara. Dengan demikian, hasil sedimen pada penelitian ini memperkuat bahwa pemantauan di Stasiun 1GB harus tetap diprioritaskan, terutama untuk Hg, sambil tetap mempertahankan pengamatan terhadap Pb, Cd, Cu, dan Ni agar perubahan kondisi sedimen dapat diketahui lebih dini (Miranda dkk., 2021; Byrnes dkk., 2020).

3.4 Status Mutu Sedimen Berdasarkan Metode STORET

Pembandingan hasil uji sedimen terhadap nilai acuan dan skor STORET untuk setiap parameter disajikan pada **Tabel 7**, sedangkan rekap nilai STORET per periode ditunjukkan pada **Tabel 8**.

Tabel 7. Pembandingan Hasil Uji Sedimen Terhadap Nilai Acuan dan Skor STORET di Stasiun 1GB

Parameter	Nilai Acuan (mg/kg)	Status Periode 1	Skor Periode 1	Status Periode 2	Skor Periode 2	Status Periode 3	Skor Periode 3
Hg	0,15	Memenuhi	0	Melebihi	-1	Memenuhi	0
Pb	50	Memenuhi	0	Memenuhi	0	Memenuhi	0
Cd	1,5	Memenuhi	0	Memenuhi	0	Memenuhi	0
Cu	65	Memenuhi	0	Memenuhi	0	Memenuhi	0
Ni	21	Memenuhi	0	Memenuhi	0	Memenuhi	0

Rekap pada **Tabel 8** menunjukkan bahwa skor total Stasiun 1GB adalah 0 (Periode 1), –1 (Periode 2), dan 0 (Periode 3), masing-masing berstatus sangat baik, baik, dan sangat baik. Skor –1 di Periode 2 dipicu oleh pelampauan Hg di sedimen sebagaimana diulas pada Bagian 3.3. Temuan ini mengindikasikan deviasi mutu yang bersifat terlokalisasi dan episodik pada

satu parameter dominan; STORET efektif mengidentifikasi "parameter pemicu" dan sangat komplementer dengan indeks ringkas lainnya dalam komunikasi mutu kepada pengelola (Sari & Wijaya, 2019).

Tabel 8. Rekap Nilai Indeks STORET Sedimen di Stasiun 1GB Sungai Girian

Stasiun	Pengambilan Sampel Periode ke-	Indeks STORET	Status
1GB	1	0	Sangat Baik
1GB	2	-1	Baik
1GB	3	0	Sangat Baik

Rata-rata Indeks Pencemaran (IP) kolom air di Stasiun 1GB adalah ±0,833 (kategori memenuhi), meskipun terjadi lonjakan Hg pada sedimen Periode 2. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh fungsi sedimen sebagai "penyimpan" polutan yang merekam pulsa beban lebih lama, sedangkan IP merangkum kondisi multiparameter pada saat pengukuran di air yang cenderung teredam oleh rendahnya fraksi terlarut (Sari & Wijaya, 2019). Di lokasi muara/pelabuhan seperti 1GB, dinamika resuspensi karena kapal/pengerukan menjadikan sedimen indikator dini untuk kejadian puncak logam; sebaliknya, IP di kolom air cocok untuk pemantauan rutin dan kewaspadaan terhadap kejadian organik (Byrnes dkk., 2020; Guarnieri dkk., 2021).

3.5 Strategi Pengendalian Pencemaran Sungai

Strategi pengendalian pencemaran Sungai Girian pada penelitian ini disusun dengan mempertimbangkan perbedaan karakter lokasi pada setiap stasiun pengamatan. Stasiun 3MA mewakili segmen hulu yang relatif lebih sedikit menerima tekanan langsung, tetapi tetap dapat dipengaruhi oleh limpasan dari daerah tangkapan di bagian atas. Stasiun 2PK berada pada segmen tengah yang berdekatan dengan permukiman padat, sehingga lebih berkaitan dengan masukan limbah domestik dan drainase lingkungan. Sementara itu, Stasiun 1GB berada pada segmen hilir atau muara yang dipengaruhi aktivitas maritim dan pelabuhan, serta berhubungan langsung dengan Selat Lembeh yang memiliki nilai ekologi dan wisata bahari. Karena itu, strategi pengendalian tidak dapat disusun secara umum, tetapi perlu disesuaikan dengan sumber tekanan yang lebih dominan pada masing-masing segmen. Di sisi regulasi, Kota Bitung telah memiliki Perda No. 9/2016 tentang Pengelolaan Air Limbah Domestik dan Perda No. 16/2013 tentang pengendalian pembuangan air limbah ke air atau sumber air, sehingga strategi yang diusulkan memiliki dasar implementasi yang jelas pada tingkat daerah.

Pada segmen hulu dan tengah sungai, terutama di sekitar Stasiun 2PK yang dipengaruhi permukiman padat, strategi pengendalian perlu diarahkan untuk menekan beban organik dan partikel yang masuk ke badan air. Langkah yang dapat dilakukan meliputi pembangunan atau optimalisasi IPAL komunal terdesentralisasi (*Decentralised Wastewater Treatment Systems*, DEWATS) di koridor padat, dengan operasi dan pemeliharaan harian oleh kelompok warga, karena pendekatan ini lebih sesuai untuk kawasan yang tidak seluruhnya terlayani sistem perpipaan. Selain itu, tangki septik rumah tangga perlu ditingkatkan agar lebih kedap dan disertai penyedotan lumpur terjadwal. Penataan sempadan sungai, sumur resapan, parit resapan, dan perangkap sedimen pada saluran menuju sungai juga penting untuk mengurangi limpasan langsung dari lingkungan sekitar. Pelaksanaan strategi ini perlu diperkuat melalui pembinaan dan pengawasan terhadap kepatuhan izin pembuangan, saluran kedap, bak kontrol, serta uji efluen berkala sebagaimana diatur dalam Perda No. 9/2016. Dalam konteks sosial lokal, pendekatan berbasis budaya mapalus dapat dimanfaatkan untuk mendukung kerja bakti bantaran sungai, iuran operasi dan pemeliharaan, serta pemantauan partisipatif bersama tokoh masyarakat, tokoh agama, dan nelayan.

Pada segmen hilir atau muara di sekitar Stasiun 1GB, strategi pengendalian perlu lebih menekankan pengelolaan sedimen dan pengaruh aktivitas pelabuhan, karena pada lokasi ini terdeteksi lonjakan Hg pada sedimen meskipun mutu kolom air secara umum masih memenuhi baku mutu. Oleh karena itu, pengerukan dan manuver kapal perlu dikelola dengan batas kekeruhan yang jelas, pemantauan waktu nyata, penggunaan *silt curtain*, serta penanganan material keruk yang sesuai dengan praktik pelabuhan berkelanjutan. Fasilitas penerimaan limbah kapal, termasuk limbah got kapal, limbah domestik, dan minyak, juga perlu disediakan dan diawasi, disertai audit berkala terhadap bengkel dan galangan. Untuk menekan tambahan beban Cu, penggunaan cat *antifouling* dengan pelepasan rendah atau alternatif tanpa biosida perlu mulai didorong pada armada lokal. Di samping itu, pemetaan titik rawan sedimen di muara perlu dilakukan secara triwulanan, dan bila lonjakan Hg kembali terdeteksi, dapat dipertimbangkan remediasi ringan seperti lapisan penutup tipis dari material bersih serta penanaman mangrove untuk stabilisasi tepi. Dengan pendekatan ini, strategi pengendalian pencemaran Sungai Girian menjadi lebih terkait langsung dengan tata guna lahan, kepadatan aktivitas, dan karakter ruang pada tiap segmen, sehingga tidak bersifat spekulatif, tetapi bertumpu pada kondisi nyata lokasi penelitian (Byrnes dkk., 2020; Guarnieri dkk., 2021).

4. KESIMPULAN

Penelitian pada tiga stasiun di Sungai Girian menunjukkan bahwa mutu kolom air secara umum berada dalam kondisi baik. Seluruh logam berat terlarut yang diuji, yaitu Hg, Pb, Cd, Cu, dan Ni, berada di bawah baku mutu Kelas II PP 22 Tahun 2021 sepanjang tiga periode pengambilan contoh. Parameter pendukung memperlihatkan TSS dan kekeruhan rendah serta pH dalam rentang 6,4 sampai 8,1. Terdapat kejadian episodik pada beban organik, yaitu BOD 4 mg/L di 1GB pada periode kedua dan COD 31 mg/L di 3MA pada periode pertama, namun secara agregat Indeks Pencemaran per stasiun tetap berada di bawah 1 dengan rerata IP 0,833 di 1GB, 0,739 di 2PK, dan 0,800 di 3MA, yang mengindikasikan status memenuhi baku mutu.

Analisis sedimen dengan pendekatan STORET menegaskan bahwa mayoritas parameter logam berada pada tingkat yang aman, kecuali satu kejadian puncak Hg di stasiun muara 1GB pada periode kedua dengan nilai 3,92 mg/kg. Kejadian ini menyebabkan skor STORET sedimen Periode 2 bernilai −1 pada periode tersebut, sedangkan dua periode lainnya bernilai 0, sehingga secara keseluruhan sedimen di muara dikategorikan baik sampai sangat baik dengan catatan kewaspadaan terhadap Hg. Hasil gabungan IP dan STORET menunjukkan gambaran yang saling melengkapi, yaitu risiko akut pada kolom air rendah dan stabil, sementara sedimen berperan sebagai penyimpan polutan yang dapat merekam peristiwa puncak setempat. Dengan demikian, kondisi Sungai Girian saat ini dapat dinyatakan memenuhi peruntukan Kelas II, namun diperlukan pemantauan adaptif yang menitikberatkan pada pengendalian beban organik domestik yang memicu lonjakan sesaat serta audit berkala sedimen muara untuk mengantisipasi munculnya titik rawan logam, khususnya merkuri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Daftar Isian Pelaksanaan Anggaran (DIPA) Badan Layanan Umum Nomor: SP DIPA – 139.03.2.693382/2025 Universitas Sam Ratulangi, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi melalui Skema Riset Dasar / Terapan Umum Unggulan Unsrat (RDTU3) PNBP BLU Unsrat Tahun Anggaran 2025 dengan Kontrak No. 559/UN12.27/LT/2025.

DAFTAR PUSTAKA

ANZG (Australian and New Zealand Governments). (2024). Toxicant Default Guideline Values for Sediment Quality. waterquality.gov.au.

Arfadillah, M., Hamdani, A., & Dewi, S. (2024). Analisis Kandungan Logam Berat (Pb dan Cu) pada Sedimen di Daerah Estuari Desa Muara Kintap Kabupaten Tanah Laut Provinsi Kalimantan Selatan. MCSIJ – Jurnal Kelautan, 7(2): 1–10.

Budiastuti, R., Herumurti, I., & Agustyawati, D. (2016). Analisis Pencemaran Logam Berat Timbal di Badan Sungai Babon Kecamatan Genuk Semarang. Jurnal Kesehatan Masyarakat (e-Journal), 4(5): 119–125.

Byrnes, T. A., Henderson, C. J., Saintilan, N., & Gillanders, B. M. (2020). Boating- and Shipping-Related Environmental Impacts and Management in Coastal Areas. Journal of Marine Science and Engineering 8(11): 908.

Chen, C., Kong, M., Wang, Y. Y., Shen, Q. S., Zhong, J. C., & Fan, C. X. (2020). Dredging method effects on sediment resuspension and nutrient release across the sediment-water interface in Lake Taihu, China. Environmental Science and Pollution Research, 27(21), 25861-25869.

Fadlillah, L.N., Indrastuti, A.N., Azahra, A.F., & Widyastuti, A. (2022). Evaluasi Level Toksik Logam Berat pada Air, Sedimen Tersuspensi, dan Sedimen Dasar di Sungai Winongo, D.I. Yogyakarta. Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(1): 30–36.

Fang, T. H., & Lien, C. Y. (2021). Different mercury species partitioning and distribution in the water and sediment of a eutrophic estuary in Northern Taiwan. Water, 13(18), 2471.

Guarnieri, A., Saremi, S., Pedroncini, A., Jensen, J. H., Torretta, S., Vaccari, M., & Vincenzi, C. (2021). Effects of marine traffic on sediment erosion and accumulation in ports: A new model-based methodology. Ocean Science, 17(2), 411-430.

Hadi, I., Suhendrayatna, & Muchlisin, Z. A. (2018). Status mutu air dan kandungan logam berat pada air dan sedimen di muara Krueng Aceh, Kota Banda Aceh. Depik: Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan, Pesisir dan Perikanan 7(2): 91–99.

Harahap, M. K. A., Rudiyanti, S., & Widyorini, N. (2020). Analisis kualitas perairan berdasarkan konsentrasi logam berat dan Indeks Pencemaran di Sungai Banjir Kanal Timur Semarang. Jurnal Pasir Laut 4(2): 108–115.

Kambey, J. L., Farrell, A. P., & Bendell-Young, L. I. (2001). Influence of illegal gold mining on mercury levels in fish of North Sulawesi's Minahasa Peninsula, (Indonesia). Environmental Pollution, 114(3), 299-302.

Kementerian Negara Lingkungan Hidup. (2003). Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air. Jakarta.

Lasut, M. T., Yasuda, Y., Edinger, E. N., & Pangemanan, J. M. (2010). Distribution and Accumulation of Mercury Derived from Gold Mining in Marine Environment and Its Impact on Residents of Buyat Bay, North Sulawesi. Water, Air, & Soil Pollution 208: 153–164.

Maddusa, S. S., Paputungan, M. G., Syarifuddin, A. R., Maambuat, J., & Alla, G. (2017). Kandungan logam berat timbal (Pb), merkuri (Hg), zink (Zn) dan arsen (As) pada ikan dan air Sungai Tondano, Sulawesi Utara. Al-Sihah: Public Health Science Journal 9(2): 153–159.

Miranda, L. S., Wijesiri, B., Ayoko, G. A., Egodawatta, P., & Goonetilleke, A. (2021). Water–Sediment Interactions and Mobility of Heavy Metals in Aquatic Environments. Water Research 202: 117386.

Paramita, R. W., Wardhani, E., & Pharmawati, K. (2017). Kandungan logam berat kadmium (Cd) dan kromium (Cr) di air permukaan dan sedimen studi kasus Waduk Saguling Jawa Barat. Reka Lingkungan 5(2): 1–12.

Parubak, A.S., Rombe, Y.P., & Surbakti, P.S. (2023). Identifikasi Logam Berat Pb dan Cd pada Air Sumur di Kampung Bugis Wosi Papua Barat. Chemical Progress, 16(1): 53–59.

Patty, J. O., Siahaan, R., & Maabuat, P. V. (2018). Kehadiran logam-logam berat (Pb, Cd, Cu, Zn) pada air dan sedimen Sungai Lowatag, Minahasa Tenggara Sulawesi Utara. Jurnal Bios Logos 8(1): 15–20.

Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (Lampiran VI).

Polapa, F. S., Annisa, R. N., Yanuarita, D., & Ali, S. M. (2022). Quality indeks dan konsentrasi logam berat dalam perairan dan sedimen di perairan Kota Makassar. Jurnal Ilmu Lingkungan 20(2): 271–278.

Romdania, Y., Herison, A., Susilo, G. E., & Novilyansa, E. (2018). Kajian penggunaan metode IP, STORET, dan CCME WQI dalam menentukan status kualitas air. Jurnal Spatial Wahana Komunikasi dan Informasi Geografi, 18(1), 1-14.

Sachoemar, S. I. (2008). Evaluasi Kondisi Lingkungan Perairan Kawasan Pulau Abang, Galang Baru, Batam Berdasarkan Analisa Indeks Storet dan Similaritas Canbera. Jurnal Rekayasa Lingkungan, 4(3).

Santika, Y. E. (2024). Analisis status mutu air dengan metode Indeks Pencemaran berdasarkan parameter fisika-kimia di Sungai Beji, Desa Pondok, Kecamatan Karanganom, Kabupaten Klaten. Ekosains 16(1): 30–43.

Sari, E. K., & Wijaya, O. E. (2019). Penentuan status mutu air dengan metode Indeks Pencemaran dan strategi pengendalian pencemaran Sungai Ogan Kabupaten Ogan Komering Ulu. Jurnal Ilmu Lingkungan 17(3): 486–491.

Sidauruk, V., Karang, I.W.G.A., & Nurweda Putra, I.D.N. (2024). Analisis Status Mutu Air Laut Berdasarkan Metode STORET di Pelabuhan Gilimanuk Bali. Journal of Marine Research and Technology, 7(1): 55–63. DOI:10.24843/JMRT.2024.v07.i01.p09.

Sondak, S. W., Tangkudung, H., & Hendratta, L. (2019). Analisis debit banjir dan tinggi muka air Sungai Girian Kota Bitung. Jurnal Sipil Statik 7(8): 1049–1058.

Suriadikusumah, A., Utami, T. P., Witriono, N., & Rizal, A. (2021). Analysis of the water quality at Cipeusing River, Indonesia using the pollution index method. Acta Ecologica Sinica 41: 177–182.

Turner, A., Millward, G. E., & Le Roux, S. M. (2001). Sediment–Water Partitioning of Inorganic Mercury in Estuaries. Environmental Science & Technology 35(23): 4648–4654.

Zhao, S., Zhao, Y., Cui, Z., Zhang, H., & Zhang, J. (2024). Effect of pH, temperature, and salinity levels on heavy metal fraction in lake sediments. Toxics, 12(7), 494.