

APLIKASI HIDROLOGI FORENSIK DALAM MENELUSURI DAMPAK LIMBAH AGROINDUSTRI TERHADAP SUMBER DAYA AIR DI DAERAH ALIRAN SUNGAI

APPLICATION OF FORENSIC HYDROLOGY IN TRACING THE IMPACT OF AGROINDUSTRIAL WASTE ON WATER RESOURCES IN WATERSHEDS

Muhammad Hakiem Sedo Putra ^{1*}, M. Ridho Ulya ², Zainal Alim ³

¹ Program Studi Rekayasa Tata Kelola Air Terpadu, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan
Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera ² Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik,
Universitas Lampung

³ Perum Jasa Tirta I

* penulis korespondensi: muhammad.sedo@tka.itera.ac.id

Tanggal masuk: 15 Januari 2026

Tanggal diterima: 12 Februari 2026

Abstract

Agroindustrial activities in both rural and urban areas often generate liquid waste that affects water resource quality. This article explores the application of forensic hydrology to trace the origins of industrial waste and its impact on hydrological systems, particularly in river basins that serve as key sites for agroindustry development. Using water quality analysis, stable isotopes, and chemical tracers, this method enables accurate tracking of pollution sources. A case study was conducted in southern Sumatra's palm oil and sugarcane processing areas. Results reveal significant groundwater and surface water quality degradation due to unmanaged waste discharge. Recommendations include integrating stricter waste treatment systems based on forensic hydrology risk mapping. This study is expected to support the development of a sustainable agroindustry that is more adaptive to water-related environmental risks.

Keywords: Agroindustry, Forensic Hydrology, Liquid Waste, Pollution, Water Resources

Abstrak

Aktivitas agroindustri di daerah pedesaan dan perkotaan kerap menghasilkan limbah cair yang berdampak terhadap kualitas sumber daya air. Artikel ini mengkaji penggunaan pendekatan hidrologi forensik untuk menelusuri asal muasal limbah dan dampaknya terhadap sistem hidrologi, khususnya di daerah aliran sungai (DAS) yang menjadi lokasi utama pengembangan agroindustri. Melalui analisis kualitas air, isotop stabil, dan jejak kimia, metode ini memungkinkan pelacakan akurat terhadap pencemaran yang terjadi. Studi kasus dilakukan di kawasan agroindustri pengolahan kelapa sawit dan tebu di Sumatera bagian selatan. Hasil menunjukkan adanya degradasi kualitas air tanah dan permukaan secara signifikan akibat pembuangan limbah yang tidak terkelola. Rekomendasi diberikan berupa integrasi sistem pengolahan limbah yang lebih ketat berbasis pemetaan risiko hidrologi forensik. Kajian ini diharapkan dapat mendukung pembangunan agroindustri berkelanjutan yang adaptif terhadap risiko lingkungan air.

Kata kunci: Agroindustri, Hidrologi forensik, Limbah cair, Polusi, Sumber daya air



Lisensi

Ciptaan disebarluaskan di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional.

PENDAHULUAN

Agroindustri merupakan sektor strategis dalam pembangunan ekonomi Indonesia, khususnya dalam meningkatkan nilai tambah produk pertanian serta membuka lapangan kerja di daerah perdesaan. Sektor ini mencakup berbagai komoditas seperti kelapa sawit, tebu, kopi, dan karet, yang tersebar luas di pulau Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi. Namun, di balik kontribusinya terhadap pertumbuhan ekonomi, aktivitas agroindustri juga menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar yang berpotensi mencemari lingkungan, terutama sumber daya air di sekitarnya (Putra, 2025).

Menurut data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2022), sektor industri pengolahan kelapa sawit di Indonesia menghasilkan limbah cair mencapai lebih dari 100 juta meter kubik per tahun. Sebagian besar limbah tersebut dibuang ke lingkungan tanpa pengolahan yang memadai, yang menyebabkan degradasi kualitas air permukaan dan air tanah. Di beberapa daerah aliran sungai (DAS) seperti Way Tulang Bawang di Lampung atau Sungai Siak di Riau, pencemaran air telah berdampak pada kualitas air baku, kesehatan masyarakat, serta keberlanjutan ekosistem lokal. Indikator kualitas air seperti BOD, COD, dan TSS kerap melebihi baku mutu, mencerminkan tekanan lingkungan yang serius dari sektor agroindustri (Prameswara *et al.*, 2024).

Sayangnya, sistem pengawasan dan penegakan hukum terhadap pencemaran lingkungan masih menghadapi tantangan, seperti keterbatasan data, lemahnya sistem pelacakan sumber pencemar, dan kurangnya kapasitas teknis di tingkat daerah. Untuk menjawab persoalan tersebut, pendekatan ilmiah yang lebih presisi dan berbasis bukti menjadi sangat penting. Salah satu pendekatan yang relevan dan relatif baru adalah hidrologi forensik (Napitupulu, 2024).

Hidrologi forensik merupakan cabang ilmu yang memanfaatkan prinsip-prinsip hidrologi, kimia lingkungan, isotop stabil, serta pemetaan spasial untuk menelusuri asal muasal pencemaran air. Pendekatan ini menggabungkan teknik isotopic and hydrochemical tracing untuk mengidentifikasi sumber pencemar serta jalur transportnya dalam sistem perairan, sehingga mampu membedakan kontribusi berbagai sumber polutan dalam suatu DAS dan mendukung strategi pengelolaan berbasis bukti ilmiah (Hakiem *et al.*, 2023). Studi terkini menunjukkan bahwa analisis isotop stabil dapat digunakan untuk menelusuri “jejak” kontaminan di lingkungan air—misalnya, dengan mengkuantifikasi variasi isotop pada nitrat dan senyawa organik untuk membedakan antara sumber antropogenik dan alami serta pola transportnya di akuifer dan sungai (Oubeid *et al.*, 2025). Selain itu, metode kombinasi chemical and isotopic tracers telah efektif digunakan untuk mengidentifikasi sumber utama pembuangan limbah industri dalam sistem kompleks serta jalur perpindahan kontaminan menuju badan air penerima, yang mendukung validasi dan interpretasi pencemaran secara ilmiah (Ren *et al.*, 2023). Di Indonesia sendiri, pendekatan ini masih relatif jarang

Way Tulang Bawang berperan penting sebagai sumber air baku untuk irigasi, air minum, dan kegiatan domestik masyarakat setempat. Namun, perkembangan industri yang pesat di sepanjang koridor sungai telah meningkatkan tekanan terhadap lingkungan, terutama melalui pembuangan limbah cair industri yang tidak selalu memenuhi standar kualitas lingkungan. Data dari Dinas Lingkungan Hidup Lampung menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi BOD, COD, dan TSS di beberapa titik pantau sungai selama lima tahun terakhir (Napitupulu and Putra, 2024). Laporan masyarakat menunjukkan perubahan warna, bau, dan rasa air yang digunakan untuk keperluan sehari-hari, yang diduga kuat berasal dari aktivitas pembuangan limbah agroindustri.

Penelitian ini menggunakan desain deskriptif-kuantitatif dengan pendekatan studi kasus, yang bertujuan untuk mengidentifikasi, melacak, dan memetakan pola pencemaran air yang berasal dari aktivitas limbah cair agroindustri. Melalui integrasi analisis laboratorium, pemetaan spasial, dan pendekatan hidrologi forensik, penelitian ini diharapkan mampu menjelaskan hubungan antara aktivitas industri dan degradasi kualitas air, serta memberikan dasar ilmiah dalam upaya pengelolaan limbah secara lebih efektif dan berkelanjutan (Fadillah *et al.*, 2025).

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan kombinasi metode primer dan sekunder untuk memperoleh gambaran menyeluruh tentang kondisi pencemaran air di DAS Way Tulang Bawang. Jenis data dan sumbernya dirangkum pada tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan jenis data dan sumbernya

No.	Jenis Data	Sumber Data	Metode Pengumpulan	Keterangan
1	Kualitas air (pH, TSS, BOD, COD, dll)	Sungai & sumur warga (hulu–hilir DAS)	Sampling langsung, uji laboratorium	Diambil di 9 titik menggunakan botol steril
2	Data spasial tata guna lahan	Citra satelit (Sentinel-2, Landsat 8)	Unduh online & interpretasi SIG	Rentang tahun 2020–2024
3	Wawancara masyarakat & industri	Warga, pelaku agroindustri, dinas lingkungan	Wawancara semi-terstruktur	Menggali persepsi, praktik pembuangan limbah
4	Dokumentasi sistem limbah	Lapangan (pabrik, sungai, saluran)	Observasi langsung & foto lapangan	Posisi outlet limbah & kondisi badan air
5	Laporan kualitas air & pengawasan	DLH & BWS Mesuji–Sekampung	Studi dokumen	Laporan resmi tahun 2022–2024
6	Data RTRW dan sebaran industri	Dokumen pemerintah daerah	Studi dokumen	Mendukung analisis kebijakan dan tata ruang

Keterangan: Laporan Kualitas Air DAS Way Tulang Bawang oleh DLH Provinsi Lampung, 2022–2024

Data primer diperoleh melalui:

- a. Pengambilan sampel air di sembilan titik yang mewakili bagian hulu, tengah, dan hilir DAS. Sampel diambil dari air permukaan (sungai utama, anak sungai, dan saluran limbah industri) serta air tanah (sumur gali dan bor warga). Pemilihan titik menggunakan pendekatan *purposive sampling* berdasarkan kedekatan dengan aktivitas agroindustri dan permukiman (Putra, 2025).
- b. Pengambilan dilakukan menggunakan botol kaca steril 1 liter pada kedalaman ± 30 cm dari permukaan, dengan waktu pengambilan pada pagi hari selama musim kemarau (Juli–Agustus 2025). Parameter in-situ seperti suhu, pH, dan TDS diukur langsung menggunakan alat digital portabel.
- c. Wawancara dilakukan terhadap pelaku industri (pengelola pabrik sawit dan tebu), warga setempat, serta petugas Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Tulang Bawang, untuk memperoleh informasi tentang sistem pengolahan limbah dan persepsi terhadap kualitas air.
- d. Observasi lapangan dilakukan untuk mendokumentasikan kondisi fisik badan air, outlet pembuangan limbah, vegetasi riparian, dan penggunaan lahan di sekitar sungai.

Data sekunder diperoleh dari:

- a. Laporan kualitas air tahunan dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) dan Balai Wilayah Sungai Mesuji–Sekampung, mencakup parameter BOD, COD, TSS, pH, dan logam berat (Siagian and Putra, 2024).
- b. Data tata guna lahan dan perubahan tutupan lahan diperoleh dari citra satelit Sentinel-2 tahun 2020–2024 yang diolah menggunakan perangkat lunak SIG (QGIS).
- c. Informasi tambahan seperti RTRW kabupaten, data industri aktif, dan laporan pengawasan limbah diperoleh dari dokumen pemerintah daerah.

Analisis Laboratorium

Sampel air yang diperoleh dari lokasi penelitian dianalisis di laboratorium lingkungan yang telah terakreditasi. Analisis laboratorium mencakup tiga kelompok parameter utama:

- a. Parameter Fisika dan Kimia Dasar

Analisis parameter fisika dan kimia dasar dilakukan untuk menentukan karakteristik umum kualitas air. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan botol polietilen bersih yang telah dibilas dengan air sampel. Sampel disimpan dalam kondisi pendingin ($\pm 4^{\circ}\text{C}$) dan dianalisis sesuai waktu simpan maksimum berdasarkan standar metode yang digunakan. Seluruh analisis dilakukan mengacu pada *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, edisi terbaru), serta standar ISO dan SNI yang relevan guna menjamin

keterulangan (*reproducibility*) hasil. Pengukuran suhu dilakukan secara in-situ menggunakan multiparameter *water quality meter* yang telah dikalibrasi sebelum penggunaan, dengan sensor dicelupkan pada kedalaman $\pm 10\text{--}15$ cm hingga pembacaan stabil (APHA 2550 B; SNI 6989.23:2005).

Nilai pH diukur menggunakan metode elektrometri dengan pH meter yang dikalibrasi menggunakan larutan buffer standar pH 4, 7, dan 10 sebelum pengukuran. Elektroda dibilas dengan akuades setiap pergantian sampel untuk menghindari kontaminasi silang (APHA 4500-H⁺ B; ISO 10523:2012; SNI 6989.11:2019).

Total Dissolved Solids (TDS) dianalisis dengan metode gravimetri. Sampel terlebih dahulu disaring menggunakan membran $0,45\ \mu\text{m}$, kemudian filtrat diuapkan dalam oven pada suhu $103\text{--}105^\circ\text{C}$ hingga berat konstan dan ditimbang untuk memperoleh konsentrasi residu terlarut (APHA 2540 C; SNI 6989.27:2019).

Total Suspended Solids (TSS) ditentukan melalui metode gravimetri dengan menyaring sampel menggunakan kertas saring serat kaca ($0,45\ \mu\text{m}$). Kertas saring yang mengandung residu dikeringkan pada suhu $103\text{--}105^\circ\text{C}$ hingga berat konstan, kemudian ditimbang untuk menentukan konsentrasi padatan tersuspensi (APHA 2540 D; SNI 6989.3:2019).

Dissolved Oxygen (DO) dianalisis menggunakan metode *Winkler* (titrimetri) atau DO meter elektrokimia yang telah dikalibrasi. Pada metode *Winkler*, sampel direaksikan dengan mangan sulfat dan *alkali-iodida-azida* untuk membentuk endapan mangan hidroksida, kemudian dititrasi menggunakan *natrium tiosulfat* hingga titik akhir (APHA 4500-O C; ISO 5814:2012; SNI 6989.72:2009).

Biochemical Oxygen Demand (BOD₅) dianalisis dengan metode inkubasi lima hari pada suhu 20°C . Konsentrasi DO diukur pada hari ke-0 (DO₀) dan setelah inkubasi lima hari dalam kondisi gelap (DO₅). Nilai BOD₅ dihitung berdasarkan selisih DO₀ dan DO₅ (APHA 5210 B; ISO 5815-1:2019).

Chemical Oxygen Demand (COD) ditentukan menggunakan metode refluks tertutup dengan kalium dikromat. Sampel direaksikan dalam suasana asam kuat dan dipanaskan pada suhu 150°C selama ± 2 jam, kemudian diukur secara spektrofotometri sesuai panjang gelombang yang ditentukan metode (APHA 5220 D; ISO 15705:2002; SNI 6989.73:2009).

Konsentrasi nitrat (NO₃⁻) dianalisis menggunakan metode reduksi kadmium yang diikuti dengan pembentukan kompleks berwarna dan pembacaan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang yang sesuai. Alternatif metode UV-spektrofotometri 220 nm digunakan apabila interferensi dapat dikendalikan (APHA 4500-NO₃⁻ E; ISO 7890-3:1988; SNI 6989.79:2011).

Seluruh instrumen dikalibrasi sesuai prosedur pabrikan dan standar laboratorium sebelum analisis. Pengendalian mutu dilakukan melalui penggunaan blanko, duplikat sampel, serta larutan standar bersertifikat untuk memastikan akurasi dan presisi hasil pengukuran.

b. Parameter Penanda Pencemaran

Parameter penanda pencemaran yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi logam berat besi (Fe), mangan (Mn), dan timbal (Pb), serta parameter senyawa organik terlarut. Analisis dilakukan di laboratorium terakreditasi dengan mengacu pada standar metode internasional dan nasional untuk menjamin validitas dan keterulangan hasil. Sampel untuk analisis logam berat dikumpulkan dalam botol polietilen yang telah diasamkan dengan HNO_3 pekat hingga $\text{pH} < 2$ guna mencegah presipitasi dan adsorpsi logam pada dinding wadah. Sampel kemudian disimpan pada suhu $\pm 4^\circ \text{C}$ hingga waktu analisis.

Konsentrasi Fe, Mn, dan Pb dianalisis menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) atau Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry (ICP-OES), tergantung ketersediaan instrumen laboratorium. Apabila menggunakan AAS, analisis mengacu pada:

- 1) APHA 3111 B (*Direct Air-Acetylene Flame Method*)
- 2) APHA 3111 D (*Graphite Furnace AAS*, khusus untuk Pb konsentrasi rendah)
- 3) SNI 6989.4:2009 (Fe)
- 4) SNI 6989.5:2009 (Mn)
- 5) SNI 6989.8:2009 (Pb)
- 6) ISO 8288:1986 (Determination of cobalt, nickel, copper, zinc, cadmium, and lead — Flame AAS)

Apabila menggunakan ICP-OES, analisis mengacu pada:

- 1) APHA 3120 B
- 2) ISO 11885:2007

Sebelum analisis, sampel didekstruksi menggunakan metode digesti asam (HNO_3 atau campuran HNO_3 – HCl) sesuai prosedur standar untuk melarutkan seluruh fraksi logam terlarut dan tersuspensi.

Untuk parameter senyawa organik terlarut, analisis dilakukan menggunakan metode yang sesuai dengan jenis parameter yang diuji. Jika yang dianalisis adalah Total Organic Carbon (TOC), maka digunakan metode pembakaran katalitik suhu tinggi dengan detektor inframerah (APHA 5310 B; ISO 8245:1999). Apabila parameter yang digunakan adalah senyawa organik spesifik, analisis dilakukan menggunakan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS) sesuai APHA 6200 B atau metode EPA yang relevan.

Seluruh instrumen dikalibrasi menggunakan larutan standar bersertifikat (certified reference materials). Pengendalian mutu dilakukan melalui analisis blanko, duplikat, kurva kalibrasi dengan koefisien determinasi (R^2) $\geq 0,995$, serta uji presisi dan akurasi sesuai prosedur laboratorium.

c. Analisis Isotop Stabil

Analisis isotop stabil dilakukan terhadap $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ untuk mendukung pelacakan sumber dan interaksi air dalam sistem hidrologi. Sampel air

dikumpulkan dalam botol kaca atau HDPE tertutup rapat tanpa ruang udara (*headspace*) untuk mencegah fraksinasi akibat evaporasi, kemudian disimpan pada suhu $\pm 4^{\circ}\text{C}$ hingga proses analisis. Sebelum pengukuran, sampel disaring menggunakan membran $0,45\ \mu\text{m}$ guna menghilangkan partikel tersuspensi yang dapat mempengaruhi stabilitas pembacaan instrumen.

Pengukuran isotop dilakukan menggunakan *Isotope Ratio Mass Spectrometry* (IRMS) atau *Cavity Ring-Down Spectroscopy* (CRDS) yang telah dikalibrasi terhadap standar internasional *Vienna Standard Mean Ocean Water* (VSMOW), serta dikontrol menggunakan standar sekunder yang relevan. Nilai isotop dinyatakan dalam notasi delta (δ) dalam satuan permil (‰) relatif terhadap VSMOW. Untuk menjamin kualitas data, dilakukan kalibrasi berkala menggunakan bahan acuan bersertifikat dan setiap sampel dianalisis secara duplo guna memastikan presisi analitik.

Pendekatan analisis dan interpretasi isotop mengikuti praktik isotop hidrologi modern sebagaimana direkomendasikan dalam literatur terkini (Martins et al., 2023) (Vreča & Kern, 2020). Data isotop kemudian digunakan untuk mengidentifikasi sumber air, pola pencampuran, serta indikasi interaksi antara air limbah dan air permukaan maupun air tanah dalam kerangka hidrologi forensik (Dini Syaputri, 2024).

1. Analisis Spasial dan Hidrologi Forensik

Data spasial dianalisis menggunakan perangkat lunak SIG (*Sistem Informasi Geografis*) untuk:

- Mendeteksi sebaran spasial pencemaran berdasarkan hasil uji laboratorium.
- Mengidentifikasi zona risiko tinggi pencemaran berdasarkan kedekatan dengan sumber limbah.
- Melakukan *overlay* antara peta jaringan sungai, lokasi industri, dan hasil analisis kualitas air.

Analisis forensik dilakukan dengan pendekatan interpretatif berdasarkan integrasi data kualitas air, isotop, serta spasial untuk menentukan kemungkinan sumber utama pencemaran. Pendekatan ini memungkinkan penelusuran rute limbah dari titik sumber hingga badan air penerima.

2. Validasi dan Interpretasi

Validasi data dilakukan untuk memastikan akurasi, konsistensi, dan reliabilitas hasil analisis. Proses validasi dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

- Perbandingan Data Primer dan Sekunder

Hasil uji laboratorium dari sampel air dibandingkan dengan data historis kualitas air dari instansi resmi seperti Dinas Lingkungan Hidup (DLH), Balai Wilayah Sungai (BWS), serta dokumen Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) yang relevan. Konsistensi hasil antara kedua sumber ini menjadi dasar awal validasi (Whitaker et al., 2022).

b. Triangulasi Informasi

Validasi juga dilakukan dengan triangulasi melalui wawancara mendalam dengan berbagai pihak, yaitu:

- 1) Pelaku industri agroindustri (pabrik kelapa sawit, gula)
- 2) Masyarakat setempat (petani, warga, pemilik sumur)
- 3) Aparat desa dan pegawai dinas lingkungan hidup

Triangulasi ini bertujuan memperkaya konteks dan menjelaskan anomali data, serta mengungkap pola pembuangan limbah yang tidak tercatat secara formal.

c. Konsistensi Spasial dan Temporal

Konsistensi hasil analisis isotop dan parameter fisik-kimia diuji secara spasial (antara hulu, tengah, hilir DAS) dan temporal (data musiman atau waktu pengambilan). Hasil ini dikorelasikan dengan data tata guna lahan dan posisi outlet limbah industri untuk mengidentifikasi potensi titik pencemar utama (Abdillah, 2022).

d. Interpretasi dan Sintesis Data

Seluruh hasil validasi digunakan untuk:

- 1) Menyusun peta sebaran pencemaran menggunakan perangkat GIS
- 2) Mengidentifikasi zona risiko tinggi terhadap kualitas air
- 3) Menyusun rekomendasi teknis untuk sistem pengolahan limbah dan
- 4) Merumuskan kebijakan pengelolaan sumber daya air berbasis bukti ilmiah yang adaptif terhadap pertumbuhan industri dan keberlanjutan lingkungan

HASIL DAN PEMBAHASAN**Hasil Uji Parameter Fisik dan Kimia**

Hasil analisis sampel air dari tiga zona pengambilan (hulu, tengah, hilir) menunjukkan variasi kualitas air yang signifikan. Tabel 2 merangkum nilai rata-rata parameter utama:

Tabel 2. Nilai Rata-Rata Parameter Utama

No	Parameter	Hulu (A)	Tengah (B)	Hilir (C)	Baku Mutu (PP No. 22/2021, Kelas II)
1	Suhu (°C)	27.5	29.1	30.4	≤30
2	pH	7.1	6.5	6.2	6.0–9.0
3	TDS (mg/L)	180	320	490	≤1.000
4	TSS (mg/L)	15	32	74	≤50
5	DO (mg/L)	6.8	4.2	2.3	≥4
6	BOD (mg/L)	1.9	4.8	8.1	≤3
7	COD (mg/L)	9	24	45	≤25
8	Nitrat (mg/L)	0.8	2.4	4.6	≤10

Keterangan: PP No. 22 Tahun 2021

Analisis kualitas air dari tiga zona pengambilan (hulu, tengah, hilir) memperlihatkan tren menurunnya kualitas air seiring dengan aliran ke hilir. Berdasarkan Tabel 2, nilai suhu cenderung meningkat mendekati batas baku

mutu, sedangkan pH sedikit menurun namun masih berada dalam rentang yang diizinkan (6,0–9,0). Parameter TDS dan TSS menunjukkan kenaikan yang cukup signifikan di zona tengah dan hilir, mencerminkan masuknya beban terlarut dan padatan tersuspensi.

Nilai DO menurun dari 6,8 mg/L di hulu menjadi 2,3 mg/L di hilir, berada di bawah batas minimum ≥ 4 mg/L di wilayah hilir, yang mengindikasikan kondisi stres bagi biota akuatik. Kenaikan BOD dan COD di titik tengah (4,8 dan 24 mg/L) serta hilir (8,1 dan 45 mg/L) melewati baku mutu kelas II, menunjukkan beban bahan organik yang tinggi. Hal ini konsisten dengan studi pada sungai lain yang menunjukkan bahwa nilai BOD dan COD yang melebihi ambang baku mutu merupakan indikator kuat pencemaran bahan organik seperti yang dilaporkan oleh Purnama V, 2022 dalam studi sungai Batang Masumai. Nilai nitrat masih relatif rendah dan jauh di bawah ambang batas (≤ 10 mg/L), yang menunjukkan bahwa sumber pencemar nitrat belum dominan dalam sistem ini.

Kandungan Logam Berat dan Senyawa Organik

Untuk mengetahui tingkat pencemaran logam berat pada badan air, dilakukan analisis terhadap beberapa parameter utama yaitu besi (Fe), mangan (Mn), dan timbal (Pb) pada tiga lokasi pengamatan, yaitu bagian hulu (A), tengah (B), dan hilir (C). Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan baku mutu air yang berlaku untuk menilai potensi risiko pencemaran. Data hasil analisis tersebut disajikan pada Tabel 3, yang memperlihatkan variasi konsentrasi logam berat di sepanjang aliran sungai serta keterkaitannya dengan ambang batas kualitas air yang telah ditetapkan.

Tabel 3. Kandungan Logam Berat Pada Badan Air

No	Parameter	Hulu (A)	Tengah (B)	Hilir (C)	Baku Mutu (mg/L)
1	Fe	0.13	0.41	0.82	≤ 0.3
2	Mn	0.05	0.18	0.26	≤ 0.1
3	Pb	nd	0.01	0.03	≤ 0.03

Keterangan: PP No. 22 Tahun 2021

Data Tabel 3 memperlihatkan bahwa konsentrasi logam berat mengalami peningkatan dari zona hulu ke hilir. Besi (Fe) di hilir tercatat sebesar 0,82 mg/L, jauh melampaui batas $\leq 0,3$ mg/L, sedangkan mangan (Mn) di titik hilir sebesar 0,26 mg/L melampaui batas $\leq 0,1$ mg/L. Timbal (Pb) tidak terdeteksi di hulu (nd), tetapi muncul di zona tengah (0,01 mg/L) dan hilir (0,03 mg/L), mendekati batas maksimum yang diizinkan ($\leq 0,03$ mg/L). Keberadaan logam berat ini dapat berasal dari limbah proses industri yang menyertakan pencucian bahan dan akumulasi dari limbah padat atau input dari permukaan lahan. Studi di Indonesia juga menunjukkan korelasi antara elevasi COD/BOD tinggi dengan peningkatan logam berat seperti Fe dalam perairan, sehingga pencemaran organik dan logam

sering saling terkait (Syukriah, S., 2024). Konsentrasi Pb yang mendekati batas maksimal, meskipun belum melampaui di hilir, menunjukkan potensi akumulasi jangka panjang yang perlu diwaspadai.

Analisis Isotop Stabil

Analisis isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ menunjukkan hasil seperti pada tabel 4. Hasil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ pada Tabel 4 menunjukkan nilai isotop yang semakin “bergeser” dari hulu ke hilir (misalnya $\delta^{18}\text{O}$ dari $-7,1\text{‰}$ di hulu ke $-4,2\text{‰}$ di hilir). Pergeseran ini mengindikasikan pencampuran dengan air yang mengalami evaporasi atau input dari sumber antropogenik (limbah industri/domestik) yang telah mengalami fraksionasi isotop. Dalam literatur tracer hidrologi, perubahan $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ banyak digunakan untuk memisahkan kontribusi limpasan dan aliran dasar serta untuk mengidentifikasi proses pencampuran antar sumber air (Sprenger et al., 2019) (Vreča & Kern, 2020).

Tabel 4. Nilai Isotop Pada Badan Air

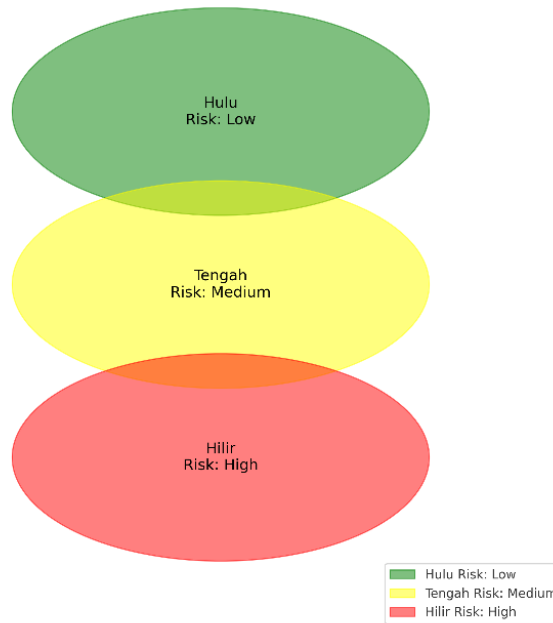
No	Titik	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
1	Hulu	-7.1	-45.2
2	Tengah	-5.4	-38.1
3	Hilir	-4.2	-31.6

Keterangan: Sidauruk et al., 2024

Pergeseran nilai isotop ke arah yang lebih positif umumnya mencerminkan proses evaporasi atau adanya masukan air yang telah mengalami *enrichment isotopik*, yang sering diasosiasikan dengan aktivitas antropogenik (Bowen et al., 2019). Oleh karena itu, pola isotop yang teramati pada titik tengah dan hilir mengindikasikan adanya pencampuran antara air alami dan masukan eksternal yang berpotensi tercemar.

Analisis Spasial Pencemaran

Interpretasi citra satelit dan *overlay* peta tata guna lahan memperlihatkan bahwa kluster konsentrasi pencemaran terkonsentrasi di sekitar lokasi pabrik agroindustri di Kecamatan Banjar Agung dan Tulang Bawang Tengah. Gambar 2 menunjukkan kluster tersebut terkait langsung dengan drainase terbuka yang bermuara ke anak sungai utama di DAS Way Tulang Bawang. Pola spasial seperti ini konsisten dengan temuan penelitian penilaian kualitas air di daerah agroindustri, yang menunjukkan bahwa wilayah dengan saluran drainase terbuka sering menjadi koridor utama transportasi polutan ke sistem perairan. Dengan demikian, distribusi spasial ini memperkuat argumen bahwa sumber pencemar lokal (agroindustri) berkontribusi besar terhadap degradasi kualitas air di hilir.



Gambar 2. Peta DAS Way Tulang Bawang

Dampak terhadap Lingkungan dan Masyarakat

Penurunan kualitas air di DAS Way Tulang Bawang menunjukkan dampak nyata terhadap lingkungan dan kesejahteraan masyarakat:

a. Dampak terhadap Pertanian

Irigasi menggunakan air yang tercemar (termasuk BOD, COD, logam berat) dapat memicu penurunan produktivitas tanaman. Dalam studi tanaman pangan, akumulasi logam berat dari air irigasi pernah dilaporkan menyebabkan klorosis dan gangguan pertumbuhan (misalnya penelitian tanaman padi dan jagung yang menemukan akumulasi logam berat di berbagai organ tanaman) (widyasari dkk, 2023). Dengan demikian, pola ini juga mungkin terjadi di lahan pertanian hilir di kawasan ini.

b. Pencemaran Air Tanah

Fenomena sumur warga yang berubah sifat (keruh, berbau, endapan) sejalan dengan dugaan infiltrasi limbah ke dalam akuifer dangkal. Beberapa studi menunjukkan bahwa logam berat dan polutan organik dapat merembes dan mencemari air tanah jika sistem geologi dan hidrolik mendukung pergerakan vertikal (misalnya dalam kajian logam berat pada air permukaan yang merembes ke air tanah) (Ishak NI dkk, 2023).

c. Risiko terhadap Kesehatan Masyarakat

Keberadaan logam berat seperti Fe, Mn, dan Pb dalam konsentrasi melebihi baku mutu menimbulkan risiko kesehatan jangka panjang, seperti gangguan fungsi ginjal dan sistem saraf. Selain itu, pencemaran organik memperbesar risiko penyakit berbasis air seperti diare, kolera, dan dermatitis.

d. Beban Tambahan bagi Sistem Penyediaan Air Bersih

PDAM dan penyedia air lainnya menghadapi beban operasional yang lebih besar untuk mengolah air baku yang tercemar. Peningkatan dosis bahan kimia dan frekuensi perawatan filter menjadi konsekuensi langsung dari tingginya kandungan TSS, BOD, dan bahan organik lainnya. Hal ini dapat berdampak pada tarif air bersih serta kontinuitas pasokan, terutama di musim kemarau.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan bahwa DAS Way Tulang Bawang menghadapi penurunan kualitas air akibat tekanan dari aktivitas agroindustri, khususnya pengolahan sawit dan tebu, yang menyebabkan konsentrasi pencemar organik dan logam berat melebihi ambang batas. Pendekatan hidrologi forensik yang digunakan, termasuk analisis isotop stabil dan pelacakan spasial, berhasil mengidentifikasi sumber serta pola sebaran pencemaran, termasuk indikasi infiltrasi limbah ke akuifer dangkal yang berdampak pada kualitas air sumur warga. Kondisi ini tidak hanya mengancam kesehatan masyarakat dan produktivitas pertanian, tetapi juga menambah beban pengolahan air bersih. Oleh karena itu, diperlukan penguatan pengawasan lingkungan, peningkatan teknologi pengolahan limbah cair, dan kebijakan pengelolaan sumber daya air yang berbasis bukti ilmiah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, M., Indonesia, D.W.-J.I.P. and 2022, undefined (2022) 'Peningkatan kualitas kimia tanah sulfat masam dengan aplikasi kombinasi bahan organik lokal dan limbah agroindustri', *journal.ipb.ac.id*, 27(1), pp. 120–131. Available at: <https://doi.org/10.18343/jipi.27.1.120>.
- American Public Health Association (APHA). (2022). Standard methods for the examination of water and wastewater (24th ed.). American Public Health Association.
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). Air dan air limbah—Bagian 4: Cara uji besi (Fe) secara spektrofotometri serapan atom (SSA) (SNI 6989.4:2009). Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). Air dan air limbah—Bagian 5: Cara uji mangan (Mn) secara spektrofotometri serapan atom (SSA) (SNI 6989.5:2009). Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). Air dan air limbah—Bagian 8: Cara uji timbal (Pb) secara spektrofotometri serapan atom (SSA) (SNI 6989.8:2009). Badan Standardisasi Nasional.
- Chattopadhyay, N., Malathi, K., Tidke, N., Attri, S. D., & Ray, K. (2020). Monitoring agricultural drought using combined drought index in India. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 155.

- Dini Syaputri, M., Kunci, K. and Lingkungan Hidup, D. (no date) 'Peran dinas lingkungan hidup kota Surabaya dalam pengendalian pencemaran air Sungai Brantas', *ejournal.uksw.edu* [Preprint]. Available at: <https://ejournal.uksw.edu/refleksihukum/article/view/1027> (Accessed: 20 October 2024).
- Fadillah, I. *et al.* (2025) 'Waste Power Plant as an Innovative Solution to Overcome Air Pollution in Bantargebang Integrated Waste Management Facility', *Applied Research in Science and Technology*, 5(1), pp. 86-96–86–96. Available at: <https://doi.org/10.33292/ARESTE.V5I1.72>.
- Hakim, M. *et al.* (2023) 'Potential of the Rainwater Harvesting Method in Fulfilling Domestic Water Needs at SD Negeri 02 Gunung Terang Bandar Lampung', *Jurnal Teknik Sipil*, 19(1), pp. 01–11. Available at: <https://doi.org/10.28932/JTS.V19I1.5112>.
- Hakim, M. and Putra, S. (2025) 'Analisis Kebutuhan Air Irigasi Menggunakan Software Cropwat 8.0 (Studi Kasus: Daerah Irigasi Sekampung Batanghari)', *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 30(2), pp. 246–255. Available at: <https://doi.org/10.14710/MKTS.V30I2.66772>.
- International Organization for Standardization. (2007). Water quality—Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) (ISO 11885:2007). ISO.
- Ishak, N. I., Ishak, E., Effendy, I. J., & Fekri, L. (2023). Analisis Kandungan Logam Berat Pada Air Sungai Martapura, Provinsi Kalimantan Selatan Tahun 2022. JSIPi (Jurnal Sains Dan Inovasi Perikanan)(Journal Of Fishery Science And Innovation), 7(1), 35-41.
- Martins, A. A., Koester, E., Rosalino, L. R., Bernardo, R., & Leitzke, F. P. (2023). Stable isotopes of oxygen and hydrogen in water: analytical method evaluation and the determination of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ on a control sample. *Química Nova*, 46, 343-350.
- Napitupulu, R., Sipil, M.P.-Civ.J.T. and 2024, undefined (no date) 'Pengaruh Bod, Cod Dan Do Terhadap Lingkungan Dalam Penentuan Kualitas Air Bersih Di Sungai Pesanggrahan', *jurnalnasional.ump.ac.id*. [<https://jurnalnasional.ump.ac.id/index.php/CIVENG/article/view/17878> (Accessed: 31 October 2024)].
- Napitupulu, R.T. and Putra, M.H.S. (2024) 'Pengaruh Bod, Cod Dan Do Terhadap Lingkungan Dalam Penentuan Kualitas Air Bersih Di Sungai Pesanggrahan', *CIVeng: Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 5(2), pp. 79–82. Available at: <https://doi.org/10.30595/CIVENG.V5I2.17878>.
- Oubeid, A. M. A., Hilal, I., Kebd, A., & Sadiki, M. (2025). Global applications of stable isotopes for identifying nitrate pollution sources in groundwater: a comprehensive review. *Frontiers in Water*, 7, 1666498.
- Prameswara, G. *et al.* (2024) 'Pelatihan Pengolahan Air yang Berkelanjutan di Desa Pasiang, Polewali Mandar', *jurnal.stmi.ac.id*, 2(2), pp. 26–36. Available at: <https://doi.org/10.52330/JOCSS.V2I2.374>.

- Purnama, V. (2022). Analisis Kadar Bod (Biological Oxygen Demand) Dan Cod (Chemical Oxygen Demand) Pada Air Sungai Batang Masumai Kabupaten Merangin Di Uptd Laboratorium Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Merangin. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 36-43.
- Putman, A. L., & Bowen, G. J. (2019). Technical note: A global database of the stable isotopic ratios of meteoric and terrestrial waters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 4389–4396. doi:10.5194/hess-23-4389-2019
- Ren, K., Pan, X., Peng, C., Chen, J., Li, J., & Zeng, J. (2023). Tracking contaminants in groundwater flowing across a river bottom within a complex karst system: Clues from hydrochemistry, stable isotopes, and tracer tests. *Journal of Environmental Management*, 342, 118099.
- Siagian, D.E.N. and Putra, M.H.S. (2024) 'Serat Alam Sebagai Bahan Komposit Ramah Lingkungan', *CIVeng: Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 5(1), pp. 55–60. Available at: <https://doi.org/10.30595/CIVENG.V5I1.17879>.
- Sprenger, M., Leistert, H., Gimbel, K., & Weiler, M. (2016). Illuminating hydrological processes at the soil–vegetation–atmosphere interface with water stable isotopes. *Reviews of Geophysics*, 54(3).
- Syukriah, S., Fauziansyah, H., & Amira, S. Studi Kandungan Logam Berat Besi (Fe) pada Air dan Ikan di Tambak Medan Belawan Sumatera Utara. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 26(1), 16-26.
- Vreča, P., & Kern, Z. (2020). Use of water isotopes in hydrological processes. *Water*, 12(8), 2227.
- Widyasari, N. L., Rai, I. N., Dharma, I. G., & Mahendra, M. S. (2023). Analisis kandungan logam berat Pb, Cu, Cd, Cr pada tanaman padi dan jagung yang sistem pengairannya berasal dari Sungai Badung. *Ecotrophic Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2), 165-173.
- Whitaker, S. *et al.* (2022) 'Anaerobic digestion of agro-industrial waste: Anaerobic lagoons in Latin America', *eprints.uanl.mx*, 21(2), p. 2680. Available at: <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA2680>.