

Konsentrasi dan Distribusi Spasial Arsenik (As) Pada Air Sungai Batang Ombilin, Sawahlunto, Sumatra Barat

Ahmad Fauzan, Zulkarnaini Zulkarnaini*, Shinta Silvia

Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, Padang, Sumatera Barat

*Koresponden email: zulkarnaini@eng.unand.ac.id

Diterima: 8 Juni 2026

Disetujui: 17 Juni 2026

Abstract

The Batang Ombilin River in Sawahlunto, West Sumatra, faces anthropogenic pressures from five land-use types: illegal sand and gold mining, a coal-fired power plant (PLTU), residential areas, a drinking water treatment facility (PDAM), and a former coal mining site. This study analyzed arsenic (As) concentrations and their relationship with physical water quality parameters at five representative sampling points, with As determined using ICP-OES and physical parameters measured *in situ*. All measured physical parameters (pH 8.0 - 8.4; temperature 23.6 - 30.1 °C; dissolved oxygen 5.2 - 5.6 mg/L) remained within the Class II water quality standard of Government Regulation No. 22 of 2021. Arsenic concentrations ranged from 0.0053 to 0.0745 mg/L, with only the sand and gold mining site exceeding the permissible threshold of 0.05 mg/L, attributed to arsenopyrite oxidation via acid mine drainage. Pearson correlation analysis showed that pH exhibited the strongest correlation with the spatial distribution of As ($r = -0.7314$), followed by a moderate positive correlation with DO ($r = 0.5144$) and a weak positive correlation with temperature ($r = 0.3569$) which may be attributed to the limited sample size ($n = 5$). Illegal sand and gold mining was identified as the most critical source of As contamination, warranting more systematic monitoring and management.

Keywords: *arsenic; batang ombilin river; illegal mining; acid mine drainage; water quality*

Abstrak

Sungai Batang Ombilin di Sawahlunto, Sumatra Barat, menghadapi berbagai antropogenik dari lima jenis penggunaan lahan yang berbeda, termasuk penambangan pasir dan emas ilegal, PLTU, kawasan permukiman, PDAM, dan bekas tambang batu bara. Penelitian ini bertujuan menganalisis konsentrasi arsenik (As) dan kaitannya dengan parameter fisik air di sepanjang sungai tersebut. Pengambilan sampel dilakukan pada lima titik yang mewakili masing-masing penggunaan lahan, dengan analisis konsentrasi As menggunakan ICP-OES dan pengukuran parameter fisik secara *in situ*. Hasil menunjukkan bahwa seluruh parameter fisik (pH 8,0 - 8,4; suhu 23,6 - 30,1°C; DO 5,2 - 5,6 mg/L) masih memenuhi baku mutu air Kelas II PP RI No. 22 Tahun 2021. Konsentrasi As berkisar antara 0,0053 - 0,0745 mg/L, di mana hanya lokasi penambangan pasir dan emas yang melampaui ambang batas 0,05 mg/L akibat oksidasi melalui mekanisme drainase asam tambang. Analisis korelasi Pearson menunjukkan pH memiliki korelasi terkuat terhadap distribusi spasial As ($r = -0,7314$), yang diikuti korelasi positif dengan kekuatan sedang dengan DO ($r = 0,5144$) dan korelasi positif lemah dengan suhu ($r = 0,3569$) yang mungkin disebabkan oleh jumlah sampel yang terbatas ($n = 5$). Penambangan pasir dan emas ilegal teridentifikasi sebagai sumber pencemaran As paling kritis dan memerlukan pemantauan serta penanganan yang lebih sistematis.

Kata Kunci: *arsenik; sungai batang ombilin; penambangan ilegal; kualitas air*

1. Pendahuluan

Kontaminasi logam berat pada sistem sungai telah menjadi perhatian lingkungan yang kritis di seluruh dunia, terutama di wilayah yang aktivitas industri dan ekstraktifnya beririsan dengan ekosistem perairan tawar [1]. Salah satu logam berat yang diatur dalam peraturan lingkungan yaitu arsenik (As) diklasifikasikan sebagai karsinogen manusia Grup 1 oleh *International Agency for Research on Cancer* (IARC) dan diakui sebagai salah satu polutan anorganik paling berbahaya di lingkungan perairan. Konsentrasi Arsenik di dalam sistem perairan sangat dipengaruhi oleh pH, di mana pada kondisi asam, arsenik cenderung tetap berada dalam bentuk terlarut, sedangkan pada nilai pH yang lebih tinggi, adsorpsi terhadap partikel sedimen meningkat [2]. Paparan kronis terhadap air yang terkontaminasi arsenik bahkan pada konsentrasi subletal telah dikaitkan dengan kanker kulit, kanker kandung kemih, penyakit kardiovaskular, dan gangguan perkembangan [3,4].

Salah satu kasus krisis arsenic yang terkenal terjadi di Bangladesh pada tahun 1993, yang menyebabkan kematian 3.000 orang dan kanker kulit pada 125.000 individu akibat kontaminasi air tanah, masih menjadi salah satu kasus toksisitas arsenik paling parah yang pernah terdokumentasi secara global [4]. Sedangkan beberapa kasus kontaminasi Arsenik yang tinggi di sistem perairan di Indonesia dapat ditemui pada beberapa daerah di antaranya di kawasan pertambangan timah Bangka Belitung yang mencatat konsentrasi As yang melampaui standar baku mutu nasional [2], sementara kegiatan pertambangan emas rakyat di Desa Tobongon dan Sungai Bone yang menggunakan teknik amalgamasi merkuri telah menghasilkan konsentrasi As yang melebihi batas 0.0053 [5].

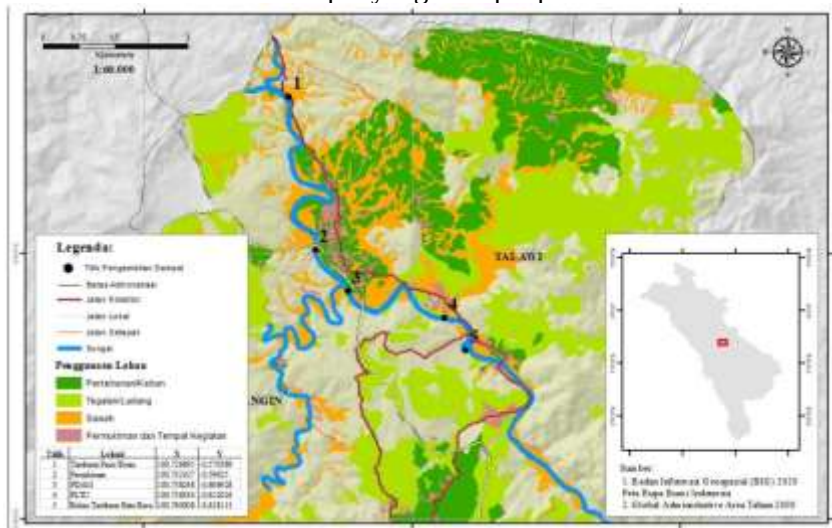
Beberapa kasus pencemaran di Indonesia tersebut menunjukkan sebuah pola yang berulang dari aktivitas pertambangan menjadi sumber utama kontaminasi arsenik pada ekosistem air tawar, dan ini menegaskan perlunya sebuah studi khususnya pada wilayah-wilayah dengan riwayat tekanan ekstraktif serupa. Salah satu wilayah yang relevan dengan kondisi tersebut ialah Sungai Batang Ombilin di Sawahlunto, Sumatera Barat. Sungai ini memiliki nilai strategis sekaligus memiliki sejarah panjang penambangan batu bara dan mineral, sehingga saat ini sungai Batang Ombilin menghadapi berbagai dampak antropogenik secara bersamaan dari lima sumber, yaitu penambangan pasir dan emas ilegal, pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batu bara, pembuangan limbah domestik, pengambilan air oleh PDAM, serta keberadaan kawasan bekas tambang batu bara [6, 7].

Penambangan pasir dan emas ilegal dinilai sebagai ancaman paling penting terhadap transpor arsenik, karena aktivitas penggalian, pembuangan tailing, dan pembukaan lahan berpotensi melepaskan arsenik dari substrat geologi ke dalam kolom air [5]. Namun, pemantauan konsentrasi arsenik secara sistematis dan spasial di Sungai Batang Ombilin masih sangat terbatas dalam literatur ilmiah, sehingga ketimpangan inilah yang menjadi landasan utama dilaksanakannya penelitian ini. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengukur konsentrasi As pada air Sungai Batang Ombilin di lima lokasi pengambilan sampel yang berbeda secara ekologis dan antropogenik lalu mengkaji hubungan antara konsentrasi As dengan parameter kualitas air fisikokimia serta membandingkan konsentrasi dengan baku mutu kualitas air Kelas II yang ditetapkan dalam PP RI No. 22 Tahun 2021.

2. Metode Penelitian

Wilayah Penelitian dan Titik Lokasi Sampel

Wilayah studi penelitian dilakukan di Sungai Batang Ombilin yang melintasi Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat, sedangkan lokasi pengambilan sampel terdapat di sepanjang koridor sungai, yang masing-masing merepresentasikan penggunaan lahan dan karakteristik pencemaran yang berbeda, berikut peta wilayah studi dan sebaran lima titik sampel yang terdapat pada **Gambar 1**.



Gambar 1: Sebaran Lokasi Titik Sampel
Sumber: Peneliti, 2024

Untuk menangkap gradien aliran Sungai Batang Ombilin, lokasi pengambilan sampel dilakukan berada pada jarak sekitar 3–5 km antar lokasi titik penelitian seperti yang di ditampilkan pada **Gambar 1**. Selain itu setiap titik yang tersebar juga merepresentasikan aktivitas antropogenik di sekitarnya di antaranya berturut-turut kawasan penambangan pasir dan emas yang ditandai oleh aktivitas pertambangan ilegal aktif,

kawasan permukiman yang menerima masukan dari limbah domestik, kawasan instalasi pengolahan air bersih (PDAM), kawasan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) serta kawasan bekas tambang batu bara.

Alat dan Bahan

Pada pelaksanaan penelitian ini, diperlukan sejumlah alat dan bahan pendukung yang disajikan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2** berikut.

Tabel 1. Alat Penelitian

No.	Nama Alat	Spesifikasi/Tipe
1.	Botol sampel HDPE	High-Density Polyethylene, dicuci asam
2.	Multiparameter water quality meter	Terkalibrasi
3.	Lemari asam (fume hood)	-
4.	Hot plate/pemanas	Suhu kerja 150°C
5.	Kertas saring Whatman	No. 42
6.	Labu ukur	Volume 100 mL
7.	ICP-OES	Shimadzu ICPE-9000
8.	Perangkat lunak statistik	IBM SPSS Statistics versi 26
9.	Coolbox/wadah es	-

Tabel 2. Bahan Penelitian

No	Nama Bahan	Spesifikasi
1.	Sampel air sungai	Kedalaman 20–30 cm
2.	Asam nitrat pekat (HNO ₃)	Concentrated, pro analysis (p.a.)
3.	Air deionisasi	-
4.	Es batu	-

Pengambilan Sampel Air

Sampel air yang dikumpulkan dengan kedalaman sekitar 20 - 30 cm dari permukaan pada masing-masing dari lima lokasi sesuai prosedur yang ditetapkan dalam SNI 6989.57:2008 (Standar Nasional Indonesia untuk Pengambilan Sampel Air).



Gambar 2: Proses Pengambilan dan Pengukuran Sampel Air
Sumber: Peneliti, 2024

Pada setiap lokasi dilakukan pengukuran parameter fisikokimia berupa pH, suhu air dan *dissolved oxygen* (DO) secara in situ menggunakan alat ukur kualitas air multiparameter yang telah dikalibrasi (**Gambar 2**). Selain itu sampel komposit triplo juga dikumpulkan menggunakan botol HDPE kemudian diawetkan melalui pengasaman menggunakan HNO₃ hingga pH < 2, kemudian diangkut menggunakan media pendingin menuju Laboratorium Analisis Air, Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, Padang, untuk dianalisis dalam waktu 24 jam setelah pengambilan.

Analisis Arsenik

Sampel air didestruksi basah dengan memanaskan 20 mL aliquot bersama 5 mL HNO₃ pekat pada suhu 150°C hingga volume tersisa ±10 mL. Setelah didinginkan, larutan disaring dengan kertas saring Whatman No. 42 dan diencerkan hingga 100 mL menggunakan air deionisasi.



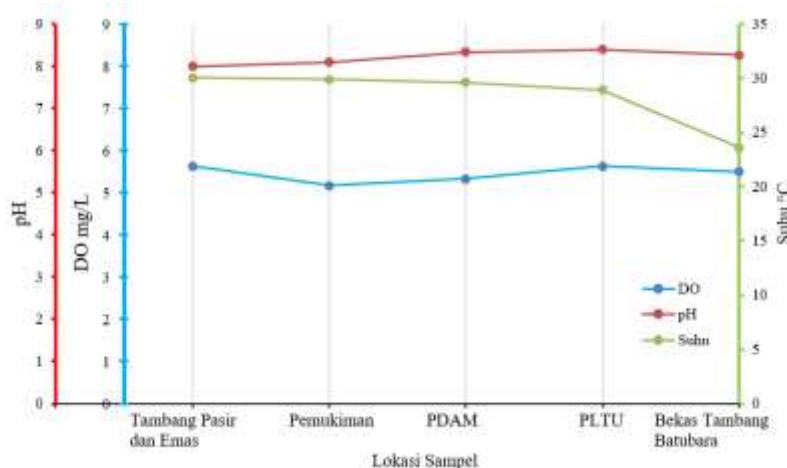
Gambar 1: Proses Destruksi dan Analisis As menggunakan ICP-OES

Konsentrasi arsenik dianalisis menggunakan ICP-OES (Shimadzu ICPE-9000) mengacu pada APHA (2017), kemudian dibandingkan dengan baku mutu air Kelas II parameter As sebesar 0,05 mg/L sesuai PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VI.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis Fisik Sungai Batang Ombilin

Parameter kualitas air secara fisik yang diukur langsung di lapangan (*in situ*) pada kelima titik *sampling* dan divisualisasikan pada **Gambar 4**. Seluruh parameter tersebut dibandingkan dengan baku mutu air Kelas II berdasarkan PP RI No. 22 Tahun 2021.



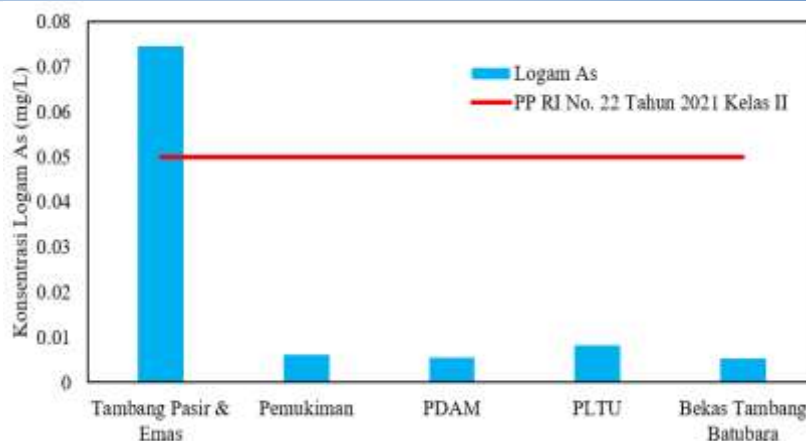
Gambar 2: Kondisi Fisik Pada Titik Sampling di Kawasan Sungai Batang Ombilin

Kondisi fisik pada Kawasan Sungai Batang Ombilin menunjukkan nilai berkisar antara 8,0 - 8,4 untuk seluruh titik *sampling*, dengan pH tertinggi tercatat di lokasi PLTU (8,4) yang kemungkinan dipengaruhi oleh aktivitas pendinginan turbin, dan pH terendah di lokasi penambangan pasir dan emas (8,0) akibat gangguan lapisan tanah dan batuan yang mengekspos mineral sulfida, sehingga memicu proses oksidasi yang menghasilkan drainase asam tambang (*acid mine drainage/AMD*) dan berkontribusi pada penurunan pH perairan [8], [9].

Suhu air berkisar antara 23,6°C - 30,1°C; suhu terendah di lokasi bekas tambang batu bara karena kerapatan vegetasi yang mengurangi paparan radiasi matahari, sedangkan suhu tertinggi di lokasi penambangan pasir dan emas akibat hilangnya tutupan vegetasi yang pada umumnya berperan sebagai penyangga termal permukaan air [10], [11], [12]. Lalu konsentrasi oksigen terlarut (DO) berkisar antara 5,2 - 5,6 mg/L, dengan nilai terendah di kawasan permukiman akibat beban limbah domestik yang meningkatkan aktivitas dekomposisi mikroba [13], [14] dan tertinggi di lokasi PLTU serta penambangan pasir/emas yang didukung oleh aliran air yang relatif deras. Keseluruhan parameter tersebut masih memenuhi baku mutu air Kelas II PP RI No. 22 Tahun 2021.

Konsentrasi Arsenik (As) Pada Sungai Batang Ombilin

Konsentrasi arsenik yang diukur pada kelima titik *sampling* disajikan dalam **Gambar 5**, beserta nilai baku mutu air Kelas II berdasarkan PP RI No. 22 Tahun 2021 dengan ambang batas sebesar 0,05 mg/L.



Gambar 3: Konsentrasi As di Setiap Titi Sampel

Konsentrasi arsenik di Sungai Batang Ombilin berkisar antara 0,0053 mg/L di kawasan permukiman hingga 0,0745 mg/L di lokasi penambangan pasir dan emas. Pada gambar lima yang menyajikan grafik dari konsentrasi As pada masing-masing titik lokasi sampel menunjukkan bahwa hanya lokasi penambangan yang melampaui ambang batas baku mutu air Kelas II PP RI No. 22/2021 sebesar 0,05 mg/L, sedangkan lokasi lainnya masih berada jauh di bawah batas yang ditetapkan.

Tingginya konsentrasi As di lokasi penambangan pasir dan emas ini sesuai dengan mekanisme serta proses yang terjadi pada kawasan tersebut sehingga berdampak pada sungai di sekitar kawasan akibat transport As. Proses pelepasan As ke sungai biasanya berkaitan dengan keberadaan mineral sulfida yang mengandung arsenik, khususnya arsenopirit (FeAsS) ketika kegiatan penambangan emas, proses penggalian, penggilingan, dan pengolahan bijih emas akan mengakibatkan pelepasan tailing kaya arsenik akibat pelapukan oksidatif yang terjadi pada tailing tersebut sehingga dapat melepaskan arsenik terlarut ke dalam kolom air, terutama pada kondisi sedikit asam seperti yang teramati di lokasi ini (pH 8,0) [5], [15]. Selain itu, deforestasi dan gangguan lapisan tanah atas selama aktivitas penambangan akan memperparah aliran permukaan dan erosi, sehingga partikel tanah kaya arsenik terbawa masuk ke sungai proses yang semakin intensif saat kejadian hujan [5], [16].

Penurunan konsentrasi As dari lokasi penambangan (0,0745 mg/L) ke kawasan permukiman di hilir (0,0053 mg/L) menunjukkan terjadinya proses pengenceran alami oleh aliran anak sungai yang tidak terkontaminasi di antara kedua titik tersebut. Meskipun kawasan permukiman menerima beban dari limbah domestik, sumber ini tidak berkontribusi signifikan terhadap konsentrasi As karena arsenik dalam limbah rumah tangga umumnya hanya berasal dari produk pestisida atau kosmetik tertentu [17]. Adapun lokasi bekas tambang batu bara mencatat konsentrasi As sebesar 0,0212 mg/L lebih tinggi dibandingkan titik PDAM dan PLTU yang mengindikasikan adanya pelindian arsenik residual dari substrat tambang yang telah lama ditinggalkan melalui proses drainase asam tambang, meskipun nilainya masih berada di bawah ambang batas regulasi [18], [19].

Hubungan Konsentrasi As dan Parameter Fisik

Untuk melihat keterkaitan dan hubungan masing-masing parameter fisik yang di ukur dengan konsentrasi As pada masing-masing titik pengambilan sampel dilakukan uji statistik menggunakan korelasi Pearson dengan hasil berikut ini:

Tabel 3. Analisis Pearson Arsenik dan Parameter Fisik Sungai Batang Ombilin

Parameter	r (Pearson)	p-value
DO vs As	0,5144	0,3752
pH vs As	-0,7314	0,1602
Suhu vs As	0,3569	0,5555

Pada Tabel 3 menunjukkan hasil analisis korelasi antara DO dan As menunjukkan hubungan positif dengan kekuatan sedang ($r = 0,5144$) namun nilai $p = 0,3752$ ($> 0,05$) menunjukkan bahwa hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik, yang berarti peningkatan nilai DO cenderung diikuti oleh peningkatan konsentrasi As pada lokasi yang diamati belum memperlihatkan kecenderungan hubungan yang nyata. Arah korelasi ini selaras dengan fenomena kondisi DO tinggi yang memicu pembentukan fase Fe(III) oksihidroksida yang justru cenderung melepaskan As melalui adsorpsi permukaan, sehingga

hubungan positif antara DO dan As yang teramati mencerminkan pengaruh variasi sumber emisi pertambangan dibandingkan hubungan langsung antara kedua parameter tersebut [20], [21].

Korelasi negatif antara pH dan As merupakan yang terkuat di antara ketiga parameter ($r = -0,7314$), meskipun juga belum mencapai signifikansi statistik ($p = 0,1602 > 0,05$). Pola hubungan antara konsentrasi As dan pH yang ditemukan sejalan dengan mekanisme geokimia yang terjadi dalam sistem perairan oksik. Indikasi pH mendekati netral hingga basa membuat arsenik cenderung terikat pada permukaan besi oksihidroksida melalui proses adsorpsi dan ikatan ini semakin kuat seiring naiknya pH. Hal ini terlihat dari data yang diperoleh dengan pH terendah (8,0) di lokasi penambangan justru bersamaan dengan konsentrasi As tertinggi, sementara pH yang lebih tinggi (8,3 - 8,5) di lokasi PLTU dan PDAM berkaitan dengan konsentrasi As yang lebih rendah. Oleh karena itu, pelepasan arsenik dari aktivitas pertambangan dan dinamika adsorpsi desorpsi yang dipengaruhi oleh pH turut memengaruhi bagaimana arsenik terdistribusi secara spasial di sepanjang aliran Sungai Batang Ombilin [2].

Korelasi pada suhu dan konsentrasi As menunjukkan hubungan positif yang lemah ($r = 0,3569$) dan tidak signifikan secara statistik ($p = 0,5555 > 0,05$). Temuan ini mengindikasikan bahwa dalam rentang suhu yang diukur di lokasi penelitian (23,6 - 30,1°C), menunjukkan bukan sebagai faktor pengendali utama distribusi arsenik. Hal ini terjadi karena pengaruh suhu terhadap transpor As di perairan umumnya lebih dominan melalui jalur tidak langsung, yaitu melalui metabolisme anaerobik pada sedimen dasar yang akhirnya memicu reduksi Fe/Mn-oksihidroksida dan pelepasan As ke perairan menjadi signifikan ketika DO memiliki nilai yang rendah dan terjadi variasi suhu yang cukup ekstrem [21], [22].

Tingginya konsentrasi As di lokasi bekas penambangan pasir dan Emas ini erat kaitannya dengan aktivitas penambangan yang mengakibatkan gangguan fisik pada batuan dan mineral, khususnya melalui oksidasi mineral sulfida seperti arsenopirit (FeAsS) yang melepaskan arsenik ke badan air melalui mekanisme drainase asam tambang [5], [23]. Kondisi ini sejalan dengan temuan pada sistem sungai terdampak tambang emas lainnya, di mana aktivitas penggalian dan pembuangan tailing tanpa pengelolaan yang memadai secara konsisten menghasilkan konsentrasi As yang jauh melampaui lokasi-lokasi non-tambang di sekitarnya [24].

4. Kesimpulan

Seluruh parameter fisik di kelima titik sampling Sungai Batang Ombilin masih memenuhi baku mutu air Kelas II PP RI No. 22 Tahun 2021 berdasarkan variasi spasial karakteristik penggunaan lahan masing-masing lokasi. Lalu konsentrasi arsenik berkisar antara 0,0053–0,0745 mg/L, di mana hanya lokasi penambangan pasir dan emas yang melampaui ambang batas 0,05 mg/L (PP RI No. 22 Tahun 2021 Kelas II). Tingginya konsentrasi As di lokasi tersebut dikaitkan dengan karakteristik penggunaan lahan sebagai bekas tambang pasir dan emas, diidentifikasi berasal dari oksidasi arsenopirit dalam tailing tambang melalui mekanisme drainase asam tambang, yang diperparah oleh deforestasi dan erosi permukaan.

Penurunan konsentrasi As ke arah hilir mencerminkan pengenceran alami oleh anak sungai yang tidak terkontaminasi, sementara lokasi bekas tambang batu bara menunjukkan konsentrasi As residual yang masih berada di bawah ambang batas regulasi. Analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa pH memiliki korelasi negatif terkuat terhadap distribusi spasial As ($r = -0,7314$), diikuti DO ($r = 0,5144$) dan suhu ($r = 0,3569$). Namun, ketiga korelasi tersebut belum mencapai signifikansi statistik (seluruh $p > 0,05$) karena keterbatasan ukuran sampel ($n = 5$), sehingga interpretasi mekanistik bersifat tentatif dan perlu dikonfirmasi pada penelitian lanjutan dengan jumlah titik sampling yang lebih banyak.

6. Referensi

- [1] Mulyani ES, N. K. T. Martuti, dan A. Irsadi, "Pola Akumulasi Logam Cu Ikan Bandeng selama Periode Pertumbuhan Di Tambak," *Saintekno J. Sains Tekno.*, vol. 14, no. 2, hlm. 151–158, Des 2016, doi: 10.15294/saintekno.v14i2.8997.
- [2] Sudiyani, Y., Rahayuningwulan, D., & Ardeniswan. (2011). Determinasi Arsen (As) Dan Merkuri (Hg) Dalam Air Dan Sedimen Di Kolam Bekas Tambang Timah (Air Kolong) Di Propinsi Bangka-Belitung, Indonesia.
- [3] Gani, P. R., Abidjulu, J., & Wuntu, A. D. (2017). Analisis Air Limbah Pertambangan Emas Tanpa Izin Desa Bakan Kecamatan Lolayan Kabupaten Bolaang Mongondow. *Jurnal MIPA*, 6(2), 6. <https://doi.org/10.35799/jm.6.2.2017.16927>
- [4] Istarani, F., & Pandebesie, E. S. (2014). Studi Dampak Arsen (As) dan Kadmium (Cd). *Jurnal Teknik POMITS*, 3(1), 1–6. <http://ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/viewFile/5684/1685>

- [5] M. T. Kitong, J. Abidjulu, dan H. S. Koleangan, "Analisis Merkuri (Hg) dan Arsen (As) di Sedimen Sungai Ranoyapo Kecamatan Amurang Sulawesi Utara," *J. MIPA*, vol. 1, no. 1, hlm. 16, Agu 2012, doi: 10.35799/jm.1.1.2012.425.
- [6] Purba I. Y. S., Izmiarti, & Indah Solfiyeni. (2015). Community of Epilithic Algae as Biological Indicator In Ombilin River, West Sumatera. *Jurnal Biologi Universitas Andalas (J. Bio. UA.)*, 4(2), 138–144.
- [7] D. Putri dan A. Afdal, "Identifikasi Pencemaran Logam Berat dan Hubungannya dengan Suseptibilitas Magnetik pada Sedimen Sungai Batang Ombilin Kota Sawahlunto," *J. Fis. Unand*, vol. 6, no. 4, hlm. 341–347, Okt 2017, doi: 10.25077/jfu.6.4.341-347.2017.
- [8] M. Azizah dan M. Maslahat, "Kandungan Logam Berat Timbal (Pb), Kadmium (Cd), dan Merkuri (Hg) di dalam Tubuh Ikan Wader (*Barbodes binotatus*) dan Air Sungai Cikaniki, Kabupaten Bogor," *Limnotek Perair. Darat Trop. Indones.*, vol. 28, no. 2, Des 2021, doi: 10.14203/limnotek.v28i2.331.
- [9] J. G. Skousen, A. Sexstone, dan P. F. Ziemkiewicz, "Acid Mine Drainage Control and Treatment," dalam *Agronomy Monographs*, 1 ed., vol. 41, R. I. Barnhisel, R. G. Darmody, dan W. Lee Daniels, Ed., Wiley, 2000, hlm. 131–168. doi: 10.2134/agronmonogr41.c6.
- [10] M. F. Johnson dkk., "Rising water temperature in rivers: Ecological impacts and future resilience," *WIREs Water*, vol. 11, no. 4, hlm. e1724, Jul 2024, doi: 10.1002/wat2.1724.
- [11] Dan Moore, R., D. L. Spittlehouse, and Anthony Story. "Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review 1." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 41.4 (2005): 813-834.
- [12] Mahyudin, Mahyudin, Soemarno Soemarno, and Tri Budi Prayogo. "Analisis kualitas air dan strategi pengendalian pencemaran air Sungai Metro di Kota Kepanjen Kabupaten Malang." *Jurnal Pembangunan dan Alam Lestari* 6.2 (2015).
- [13] B. Baniya dkk., "Water quality assessment along the segments of Bagmati River in Kathmandu valley, Nepal," *Nepal J. Environ. Sci.*, vol. 7, hlm. 1–10, Des 2019, doi: 10.3126/njes.v7i0.34314.
- [14] P.-J. Chen, C.-H. Su, C.-Y. Tseng, S.-W. Tan, dan C.-H. Cheng, "Toxicity assessments of nanoscale zerovalent iron and its oxidation products in medaka (*Oryzias latipes*) fish," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 63, no. 5–12, hlm. 339–346, 2011, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.02.045.
- [15] F. Zhuang dkk., "Biogeochemical behavior and pollution control of arsenic in mining areas: A review," *Front. Microbiol.*, vol. 14, hlm. 1043024, Mar 2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1043024.
- [16] K. Wantzen dan J. Mol, "Soil Erosion from Agriculture and Mining: A Threat to Tropical Stream Ecosystems," *Agriculture*, vol. 3, no. 4, hlm. 660–683, Sep 2013, doi: 10.3390/agriculture3040660.
- [17] A. Mojiri dkk., "Adsorption methods for arsenic removal in water bodies: a critical evaluation of effectiveness and limitations," *Front. Water*, vol. 6, hlm. 1301648, Feb 2024, doi: 10.3389/frwa.2024.1301648.
- [18] L. Yang, Y. Tang, H. Sun, L. He, dan R. Li, "Hydrochemical characteristics of abandoned coal mines derived acid mine drainage in a typical karst basin (Wuma river basin, Guizhou China)," *Heliyon*, vol. 10, no. 11, hlm. e31963, Jun 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31963.
- [19] Muryadi, Budijono, & Hasbi, M. (2020). Akumulasi Logam Berat Dalam Tiga Organ Ikan Dari Koto Panjang. *Jurnal Sumberdaya Dan Lingkungan Akuatik*, 1(2).
- [20] P. L. Smedley dan D. G. Kinniburgh, "A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters," *Appl. Geochem.*, vol. 17, no. 5, hlm. 517–568, Mei 2002, doi: 10.1016/S0883-2927(02)00018-5.
- [21] L. Zeng, F. Yang, Y. Chen, S. Chen, M. Xu, dan C. Gu, "Temperature and Dissolved Oxygen Drive Arsenic Mobility at the Sediment Water Interface in the Lake Taihu," *Toxics*, vol. 12, no. 7, hlm. 471, Jun 2024, doi: 10.3390/toxics12070471.
- [22] S. G. Johnston, N. Karimian, dan E. D. Burton, "Seasonal Temperature Oscillations Drive Contrasting Arsenic and Antimony Mobilization in a Mining-Impacted River System," *Water Resour. Res.*, vol. 56, no. 10, hlm. e2020WR028196, Okt 2020, doi: 10.1029/2020WR028196.
- [23] S. Paikaray, "Arsenic Geochemistry of Acid Mine Drainage," *Mine Water Environ.*, vol. 34, no. 2, hlm. 181–196, Jun 2015, doi: 10.1007/s10230-014-0286-4.
- [24] Y. Cai, H. Zhang, G. Yuan, dan F. Li, "Sources, speciation and transformation of arsenic in the gold mining impacted Jiehe River, China," *Appl. Geochem.*, vol. 84, hlm. 254–261, Sep 2017, doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.07.001.