



# Geologi dan Analisis Pencemaran Logam Berat Menggunakan Indeks Geoakumulasi di Daerah Tulabolo Timur, Bone Bolango

Nurmasita Dewi Sahido<sup>a</sup>, Yuyu Indriati Arifin<sup>b\*</sup>, Ronal Hutagalung<sup>c</sup>

<sup>abc</sup>Program Studi Teknik Geologi, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, Indonesia

\*email: [yayujahja@gmail.com](mailto:yayujahja@gmail.com)

## ARTICLE INFO

### Sejarah artikel:

Diterima : 15 September 2025

Direvisi : 20 November 2025

Diterima : 31 Desember 2025

**Keywords:** Environmental geology; Heavy metals; Gold mining; Geoaccumulation index

### How to cite this article:

Sahido, N. D., Arifin, Y. I., Hutagalung, R. (2025).

Geologi dan Analisis Pencemaran Logam Berat Menggunakan Indeks Geoakumulasi di Daerah Tulabolo Timur, Bone Bolango. *Journal of Applied Geoscience and Engineering*, 4(2), 163-172.

<https://doi.org/10.34312/Jage.v4i2.37127>

## ABSTRACT

The purpose this study is to assess geological conditions and levels of heavy metal pollution around the artisanal gold mining area in East Tulabolo, East Suwawa District, Bone Bolango Regency, to understand its impact on the environment. This study includes geomorphological, stratigraphic, and geological structural analyses as well as measurements of heavy metal content such as arsenic (As), mercury (Hg), and lead (Pb) in river sediments. The methods used include field surveys, sampling, and laboratory analysis with ICP-MS. While pollution levels were analyzed using the Geoaccumulation Index (Igeo). The result showed that heavy metal concentrations exceeded safe limits, with the highest accumulation found in tailing sediments. The Igeo analysis indicated a mild level of pollution due to the high concentration levels in the control area. This study emphasizes the need for sustainable waste management and ongoing contamination monitoring, including biota and groundwater sampling, to identify risks of bioaccumulation and movement of contaminants into the wider ecosystem.

## 1. PENDAHULUAN

Logam berat merupakan unsur kimia dengan berat atom yang tinggi dan berpotensi mencemari lingkungan karena sifatnya yang toksik dan tidak mudah terurai. Logam berat seperti merkuri, timbal, arsen, kadmium, dan nikel dapat terakumulasi dalam tanah dan air, mengancam kesehatan manusia dan merusak ekosistem di sekitarnya. Keterdapat logam berat di permukaan bumi dapat terjadi melalui aktivitas antropogenik seperti kegiatan pertambangan, yang masih menggunakan alat dan teknologi sederhana seperti penggunaan merkuri (Hg) sebagai pengikat emas dalam proses amalgamasi.

Selain melalui aktivitas antropogenik seperti pertambangan, logam berat secara alami dapat ditemukan di alam melalui aktivitas geologi seperti pengendapan, vulkanisme, pelapukan, aerasi atau oksidasi, serta mineralisasi hidrotermal. Menurut Simbolon, dkk., (2010) logam berat seperti Pb tidak hanya terdapat dalam perairan tetapi juga dapat terakumulasi dalam sedimen dengan seiring berjalannya waktu, kadarnya akan terus meningkat.

Daerah Tulabolo Timur termasuk pada Kecamatan Suwawa Timur, Kabupaten Bone Bolango, diketahui memiliki aktivitas tambang rakyat yang sudah ada sejak lama dengan proses pertambangannya masih dilakukan dengan cara tradisional. Kegiatan penambangan yang dilakukan dengan cara tradisional seringkali tidak memperhatikan aspek lingkungan, sehingga dapat menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan, khususnya pencemaran logam berat.

Telah terdapat beberapa studi yang berkaitan dengan tentang pencemaran logam berat terutama merkuri di wilayah sekitar tambang emas rakyat di Daerah Gorontalo dan sekitarnya, yang hasilnya menunjukkan bahwa telah terjadi pencemaran yang mengkhawatirkan. Penelitian tersebut dilakukan di daerah Bone Bolango, Kabupaten Gorontalo, Kabupaten Gorontalo Utara, dan Bolaang Mongondow (Arifin dkk., 2014,2015,2017; Arifin, Sakakibara, Sera, dkk., 2020; Arifin, Sakakibara, Takakura, dkk., 2020; Gafur dkk., 2020; Arifin dkk., 2017; Kimijimad kk., 2022)

Oleh karena permasalahan yang telah disebutkan, maka penelitian ini perlu dilakukan untuk mengetahui kandungan logam di lingkungan terutama sedimen sungai daerah Tulabolo Timur, Kabupaten Bone Bolango.

## 2. METODE

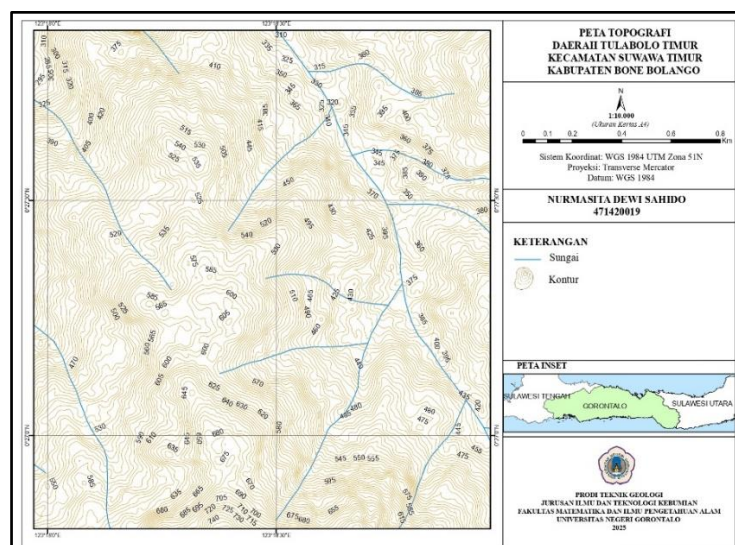
Pada penelitian ini, metode yang terbagi menjadi 2 yaitu metode survei lapangan dan metode analisis laboratorium. Metode survei lapangan dilakukan untuk mengetahui jenis litologi batuan penyusun daerah penelitian serta untuk mengamati kondisi lingkungan sekitar daerah penelitian terutama area aliran sungai yang terdapat aktivitas pertambangan emas rakyat. Metode analisis laboratorium dilakukan guna mengetahui kadar logam berat As, Hg dan Pb pada sampel sedimen sungai pada daerah penelitian. Analisis ini menggunakan metode ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*). Berdasarkan hasil analisis yang telah diperoleh, kemudian dibuat peta zonasi penyebaran logam berat merkuri (Hg), Arsenik (As) dan timbal (Pb). Selanjutnya dilakukan perhitungan Indeks Geoakumulasi untuk mengkaji tingkat pencemaran.

## 3. HASIL DAN DISKUSI

### 3.1. Geomorfologi

Secara fisiografis, lokasi penelitian termasuk pada Zona Pegunungan Utara yang mana dicirikan oleh derajat kemiringan lereng yang terjal atau curam hingga sangat curam. Hal ini sangat mempengaruhi kondisi morfologi daerah penelitian, yang mana terbukti pada daerah penelitian memiliki bentuk topografi dengan kerapatan kontur yang didominasi oleh lereng yang curam hingga sangat curam, mengikuti sistem klasifikasi lereng (Van Zuidam, 1983).

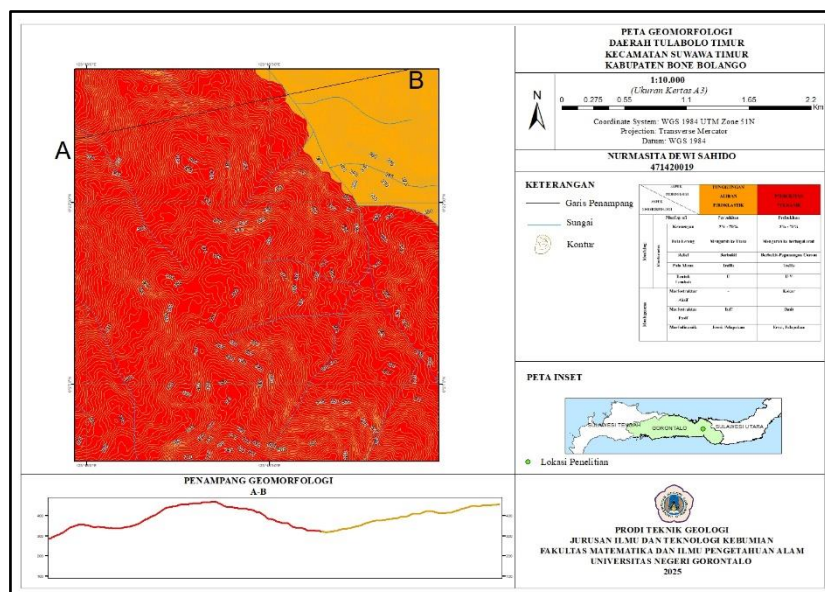
Geomorfologi pada daerah penelitian ditentukan menggunakan klasifikasi yang mengacu pada Brahmantyo dan Bandonu (2006). Dalam menentukan morfometri, morfologi dan morfogenesis pada daerah penelitian, peneliti melakukan pengamatan langsung di lapangan serta melakukan interpretasi kontur pada peta. Geomorfologi daerah penelitian, dibagi menjadi dua satuan bentuk muka bumi, yaitu Perbukitan Vulkanik dan Punggungan Aliran Piroklastik (Tabel 1).



Gambar 1. Peta Topografi Daerah Penelitian

Tabel 1. Aspek Geomorfologi Daerah Penelitian

ASPEK MORFOLOGI ASPEK GEOMORFOLOGI		PUNGGUNGAN		
		ALIRAN PIROKLASTIK	PERBUKITAN VULKANIK	
Morfologi	Morfografi	Perbukitan	Perbukitan	
	Morfometri	Kelerengan	5% - 70%	5% - 70%
		Pola Lereng	Mengarah ke Utara	Mengarah ke berbagai arah
		Relief	Berbukit	Berbukit-Pegunungan Curam
		Pola Aliran	Trellis	Trellis
Bentuk Lembah	U	U-V		
Morfogenesis	Morfostruktur Aktif	-	Kekar	
	Morfostruktur Pasif	Tuff	Dasit	
	Morfodinamik	Erosi, Pelapukan	Erosi, Pelapukan	



Gambar 2. Peta Geomorfologi Daerah Penelitian

Satuan geomorfologi perbukitan vulkanik terletak di bagian Selatan hingga Barat Laut wilayah penelitian, mencakup sekitar 6,52 Km dari 7,82 Km wilayah penelitian (Gambar 3). Secara morfografis, satuan ini ditandai oleh dengan pola kontur yang sangat rapat, yang mencerminkan kemiringan lereng antara 5<sup>0</sup> hingga 70<sup>0</sup>, dengan pola aliran sungai trellis dan Lembah-lembah membentuk pola V dan U. Litologi penyusun pada satuan ini adalah batuan Dasit.

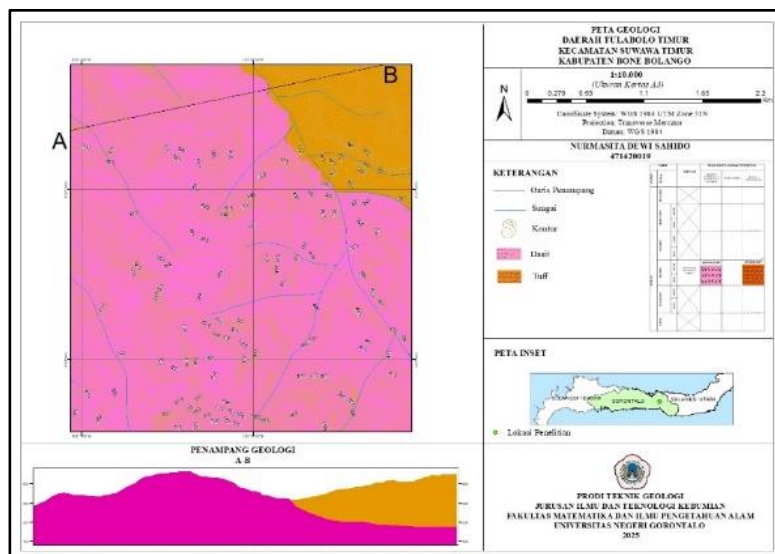
Satuan Geomorfologi punggung aliran piroklastik terletak dibagian Timur Laut daerah penelitian mencakup sekitar 1,35 Km dari 7,87 Km luas wilayah penelitian (Gambar 4). Secara morfografis, satuan ini menunjukkan pola kontur yang sedang hingga rapat, mencerminkan kemiringan lereng 5<sup>0</sup> hingga 70<sup>0</sup>. Variasi tersebut menunjukkan dinamika topografi yang beragam akibat proses geomorfologi di wilayah tersebut, dengan pola aliran sungai trellis, dan sungai bermuara ke Sungai Utama Bula. Lembah-lembah sungai membentuk pola U. Litologi yang menyusun satuan ini adalah batuan Tuff.



Gambar 3. Bentuk Lahan Perbukitan Vulkanik



Gambar 4. Bentuk Lahan Punggungan Aliran Piroklastik



Gambar 5. Peta Geologi Daerah Penelitian

### 3.2. Stratigrafi

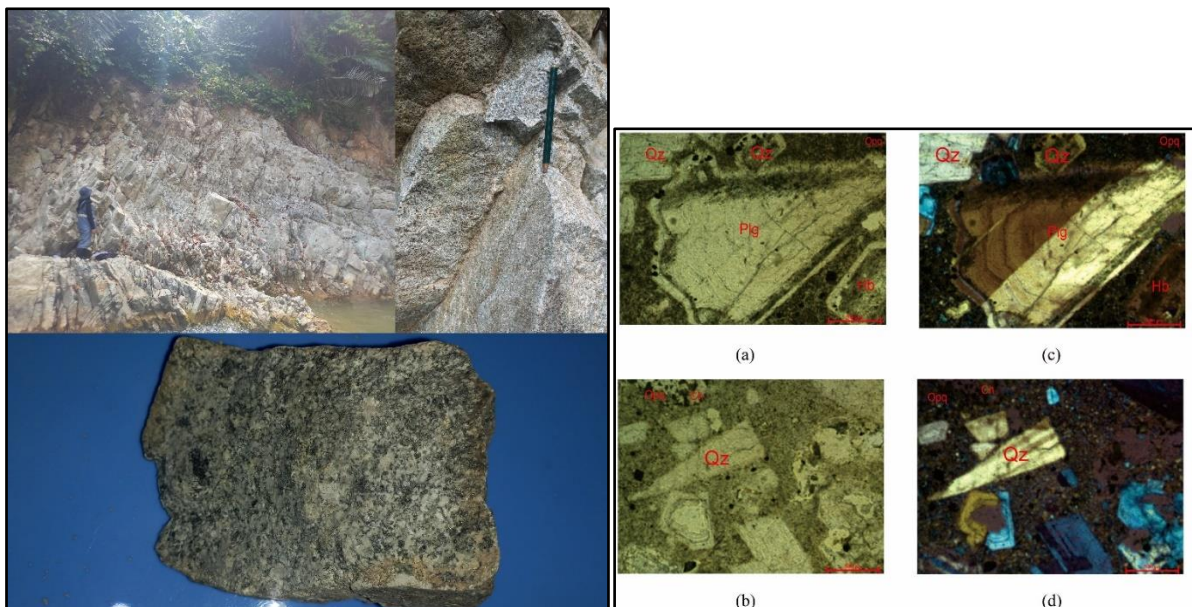
Penamaan satuan stratigrafi di daerah penelitian ini didasarkan pada pedoman Sandi Stratigrafi Indonesia tahun 1996, dengan menggunakan sistem penamaan litostratigrafi yang bersifat tidak resmi. Metode ini memungkinkan pengelompokan unit-unit litologi berdasarkan karakteristik litologi yang dapat diidentifikasi langsung di lapangan, seperti jenis litologi, keberagaman batuan, serta kondisi-kondisi lapangan lainnya yang memberikan informasi mengenai komposisi dan tekstur batuan. Dengan demikian, secara umum daerah penelitian terdiri atas dua satuan litologi yang diurutkan berdasarkan usia relatif, yaitu satuan dasit dan tuff (Gambar 5).

#### 1) Satuan Dasit

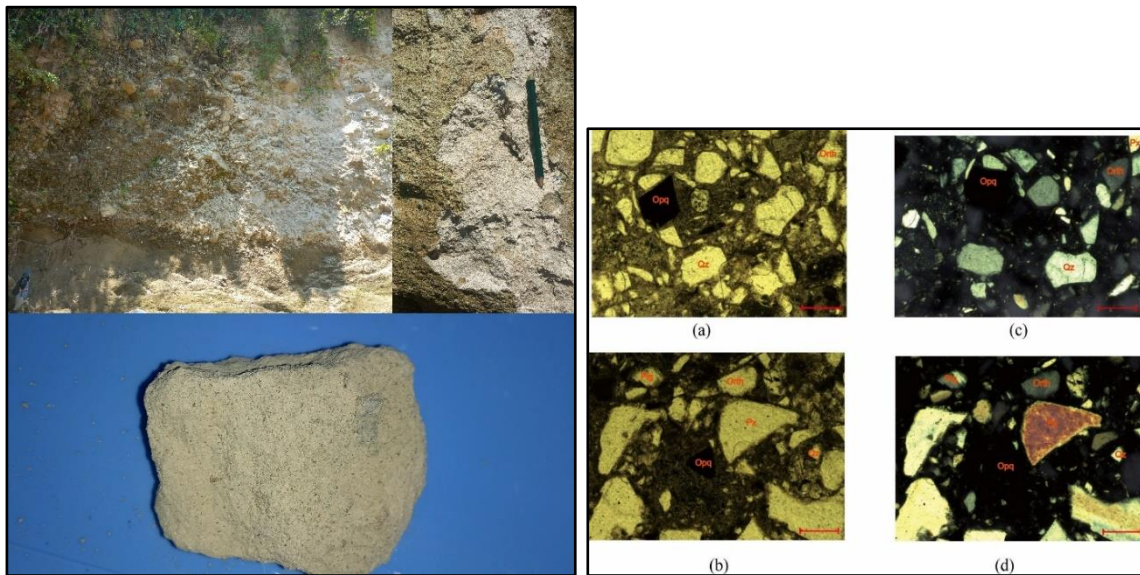
Dalam hal penyebaran litologi, Satuan Dasit menempati sekitar 70% dari total luas wilayah penelitian atau sekitar 6,52 km<sup>2</sup>. Penyebaran ini memberikan gambaran bahwa Satuan Dasit memiliki distribusi yang cukup luas, menjadikannya satuan litologi paling dominan di daerah ini. Pada peta geologi, Satuan Porfiri Dasit ini diberi warna merah muda dan menempati bagian Selatan wilayah penelitian, yang menunjukkan distribusi geografisnya yang luas dan konsisten (Gambar 6).

Satuan dasit di daerah penelitian memiliki ciri litologi yang khas, teridentifikasi melalui pengamatan petrologi. Secara umum, batuan pada satuan ini berwarna abu-abu gelap dengan tekstur porfiritik, yang menunjukkan adanya kristal-kristal besar yang terdispersi dalam massa dasar yang lebih halus. Dari segi komposisi, porfiri dasit ini mengandung hornblend, plagioklas, dan kuarsa, yang berpadu dalam struktur holokristalin serta memiliki keseragaman inequigranular.

Pada pengamatan petrografi sayatan tipis batuan dasit berwarna kecoklatan pada PPL dan berwarna gelap pada XPL, mineral penyusun memiliki bentuk euhedral hingga subhedral, dengan komposisi utama berupa plagioklas, kuarsa, hornblende, klorit dan massa dasar, serta mengandung mineral opak.



**Gambar 6.** Singkapan Batuan Dasit dan Handspecimen Batuan Dasit dan Sayatan Tipis Batuan Dasit dengan Perbesaran 5x



**Gambar 7.** Singkapan Batuan Tuff dan Handspacimen Batuan Tuff dan Sayatan Tipis Batuan Tuff dengan Perbesaran 5x

## 2) Satuan Tuff

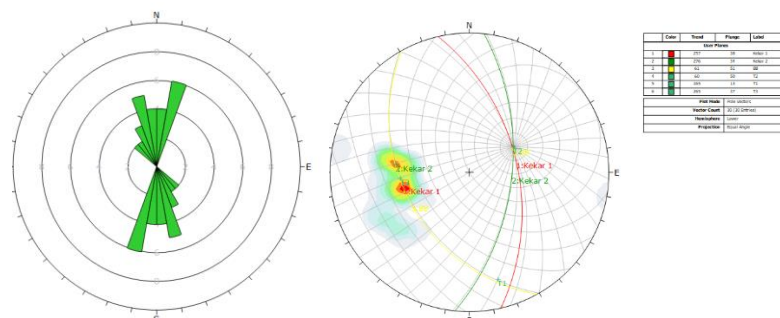
Pada peta geologi, Satuan Tuff digambarkan dengan warna orange dan tersebar terutama dibagian utara wilayah penelitian. Satuan ini mencakup sekitar 30% luas wilayah penelitian atau sekitar 1,35 km<sup>2</sup>. Penyebaran ini memberikan gambaran bahwa Satuan Tuff memiliki distribusi yang sedikit pada daerah penelitian.

Satuan Tuff yang ditemukan di daerah penelitian memiliki ciri yang menonjol, yang teridentifikasi melalui pengamatan petrologis. Secara umum, satuan ini didominasi oleh warna putih keabuan, dengan komposisi mineral utama berupa kuarsa dan sedikit K-felspar. Tekstur batuan ini memiliki kemas tertutup, derajat pemilihan baik, ukuran butir 0,2 mm. Tekstur ini dapat diamati pada kenampakan makroskopis.

Pada pengamatan petrografi sayatan tipis batuan Tuff berwarna kecoklatan pada PPL dan berwarna gelap pada XPL, mineral penyusun memiliki bentuk euhedral hingga subhedral, dengan komposisi utama berupa kuarsa, orthopiroksen, orthoklas, plagioklas, dan massa dasar, serta mengandung mineral opak.



**Gambar 9.** Kenampakan *tension joint* pada St.12



Gambar 10. Hasil Analisis Data Struktur pada St. 12

### 3.3. Struktur Geologi

Struktur geologi yang teramati di lapangan menunjukkan bahwa di lokasi penelitian terdapat struktur berupa kekar retakan (*tension joint*) terbentuk sebagai akibat dari aktivitas gaya tektonik. Kekar-kekar ini berkembang pada satuan dasit.

Pengukuran kekar dilakukan pada stasiun St. 12 (Gambar 9). Hasil pengolahan data kekar pada St. 12 didapatkan arah umum relative timur laut-barat daya dengan tegasan maksimum N 165° E/13° SE, tegasan menengah N 60° E/50° NW, tegasan minimum N 265° E/37° SW.

### 3.4. Hasil Pengukuran Kandungan Logam Berat

Pengukuran kandungan logam berat arsenic, merkuri, dan timbal menggunakan metode ICP-MS. Tabel 1 Menyajikan hasil pengukuran konsentrasi logam berat dalam satuan ppm pada beberapa titik pengambilan sampel yang berupa media sedimen sungai area control (SS.1), sedimen *tailling* (SS.0), sedimen sungai di sekitar lokasi tambang (SS. 2 dan SS.3), dan batuan rep (St. rep).

Kode Sampel	Keterangan	As (ppm)	Hg (ppm)	Pb (ppm)	Au (ppm)
SS. 0	Sedimen <i>Tailling</i>	4541	4.09	1723	0
SS. 1	Sedimen Sungai (Control Area)	847	1.49	267	0
SS. 2	Sedimen Sungai	1752	4.32	580	0
SS. 3	Sedimen Sungai	3042	2.15	977	0
St. Rep	Batuan Rep	197	2.85	1616	32

### 3.5. Analisis Tingkat Pencemaran Berdasarkan Indeks Geoakumulasi

Metode yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi logam berat dalam penelitian ini adalah Indeks Geoakumulasi (Igeo), yang mengukur akumulasi logam berat dalam sedimen dengan mempertimbangkan latar belakang alami dari logam tersebut yang dianggap tidak terkontaminasi.

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (1.5 * B_n)] \tag{1}$$

Berdasarkan skala Igeo, tingkat pencemaran logam berat diklasifikasikan sebagai berikut:

$I_{geo} < 0$ : Tidak tercemar

$0 \leq I_{geo} < 1$ : Tercemar ringan

$1 \leq I_{geo} < 2$ : Tercemar sedang

$2 \leq I_{geo} < 3$ : Tercemar sedang hingga tinggi

$3 \leq I_{geo} < 4$ : Tercemar tinggi

$4 \leq I_{geo} < 5$ : Tercemar sangat tinggi

$I_{geo} \geq 5$ : Sangat tercemar

Berdasarkan hasil perhitungan, tingkat kontaminasi logam berat berbeda-beda di setiap sampel sedimen. Berikut adalah hasil perhitungan Igeo untuk masing masing logam berat di sedimen lokasi penelitian.

1) Arsenik

SS. 0 :  $I_{geo} \approx 1.83$  (tercemar sedang)

SS. 2 :  $I_{geo} \approx 0.45$  (tercemar ringan)

SS. 3 :  $I_{geo} \approx 1.25$  (tercemar sedang)

2) Merkuri

SS. 0 :  $I_{geo} \approx 0.86$  (tercemar ringan)

SS. 2 :  $I_{geo} \approx 0.94$  (tercemar ringan)

SS. 3 :  $I_{geo} \approx -0.05$  (tidak tercemar)

3) Timbal

SS. 0 :  $I_{geo} \approx 2.10$  (tercemar sedang hingga tinggi)

SS. 2 :  $I_{geo} \approx 0.52$  (tercemar ringan)

SS. 3 :  $I_{geo} \approx 1.28$  (tercemar sedang)

Arsenik (As) menunjukkan tingkat kontaminasi yang sangat tinggi baik pada sedimen *tailing* dan sedimen sungai sekitar area tambang maupun sedimen area kontrol. Pada perhitungan Indeks Geoakumulasi, seluruh titik pengambilan sampel dalam kondisi tercemar ringan hingga sedang dengan nilai Igeo 0.45 sampai 1.83. Meskipun hasil perhitungan Igeo menunjukkan tingkat kontaminasi yang rendah, tetapi kadar konsentrasi arsenik pada daerah penelitian telah melampaui batas ambang yang telah ditentukan.

Merkuri (Hg) terakumulasi pada seluruh titik pengambilan sampel, baik pada sedimen *tailing* hingga pada sedimen area kontrol, dengan nilai Igeo -0.05 hingga 0.94 dengan kondisi tidak tercemar hingga tercemar ringan. Meskipun hasil perhitungan Igeo menunjukkan tingkat kontaminasi yang rendah, tetapi kadar konsentrasi merkuri pada daerah penelitian telah melampaui batas ambang yang telah ditentukan.

Timbal (Pb) memiliki tingkat kontaminasi yang sangat tinggi pada seluruh titik pengambilan sampel. Nilai Igeo sebesar 0.52 hingga 2.10, dengan tingkat pencemaran tercemar ringan hingga tinggi. Meskipun pada hasil perhitungan indeks geoakumulasi menunjukkan kondisi tercemar ringan, tetapi kadar konsentrasi timbal pada daerah penelitian menunjukkan masing masing 267 ppm hingga 1723 ppm, yang telah melampaui batas ambang sesuai ketentuan.

Berdasarkan analisis indeks geoakumulasi, nilai Igeo yang menunjukkan keadaan yang tidak tercemar dikarenakan nilai kadar logam berat pada sedimen area kontrol sangat tinggi, dengan nilai masing-masing As (847 ppm), Hg (1.49 ppm) dan Pb (267 ppm) yang mana kadar seluruh logam berat melewati nilai batas ambang ketentuan. Melihat kadar konsentrasi seluruh logam berat, menunjukkan bahwa aktivitas tambang emas di lokasi penelitian telah menyebabkan kontaminasi logam berat yang signifikan pada sedimen sekitar area pertambangan. Sedimen *tailling* menjadi sumber utama akumulasi logam berat ini, mengindikasikan bahwa aktivitas tambang berperan penting dalam pencemaran lingkungan sekitar.

#### 4. KESIMPULAN

Geomorfologi pada lokasi penelitian terdiri atas Satuan Perbukitan Vulkanik dan Satuan Punggungan Aliran Piroklastik. Berdasarkan stratigrafi, litologi penyusun pada lokasi penelitian si urutan dari satuan umur yaitu Satuan Dasit dan Satuan Tuff dengan umur miosen awal-akhir. Struktur geologi pada daerah penelitian adalah kekar retakan (tension joint) dengan orientasi umum relative timur laut-barat daya.

Berdasarkan analisis Indeks Geoakumulasi (Igeo), ditemukan bahwa sedimen sungai di lokasi penelitian memiliki tingkat pencemaran rendah hingga tinggi pada logam berat As, Hg dan Pb. Sedimen *tailling* menunjukkan nilai Indeks Geoakumulasi yang cukup tinggi, mengindikasikan bahwa aktivitas tambang emas rakyat di daerah ini telah memberikan dampak pencemaran yang serius pada lingkungan sekitar. Logam berat tersebut berpotensi mencemari ekosistem air dan tanah di sekitar area tambang, menimbulkan risiko ekotoksikologi yang perlu mendapat perhatian lebih lanjut.

#### 5. REFERENSI

- Arifin, Y. I., Rauf, J., Akase, N., Djibran, F. R., Nurfaika., Lakilo, A., Jahja, M., Sakakibara, M. (2025). Integrated geological mapping and spatial distribution of heavy metal contamination with geoaccumulation index assessment in Juriya's artisanal gold mining region, Gorontalo, Indonesia. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 19(2025), 100861
- Arifin, Y. I., Sakakibara, M., & Sera, K. (2015). Impacts of artisanal and smallscale gold mining (ASGM) on environment and human health of Gorontalo Utara Regency, Gorontalo Province, Indonesia. *Geosciences*, 5(2), 160-176
- Arifin, Y. I., Sakakibara, M., & Sera, K. (2017) . Heavy metals concentrations in scalp hairs of ASGM miners and inhabitants of the Gorontalo Utara regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 71(1), 012028
- Arifin, Y. I., Sakakibara, M., Sera, K. (2014) . Arsenikic, lead, and mercury concentrations of scalp hairs ini ASGM miners and inhabitants of Gorontalo Utara regency, Gorontalo province, Indonesia. *NMCC Ann. Rep*, 21, 133-138
- Arifin, Y. I., Sakakibara, M., Sera, K., Usman, P. F., & Lihawa, F. (2020) . Mercury exposure from small scale gold mining activities and neurological symptoms on inhabitants and miners: A case study in Bolaang Mongondow, North Sulawesi Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 598(1), 012013.
- Arifin, Y. I., Sakakibara, M., Takakura, S., Jahja, M., Lihawa, F., & Sera, K. (2020) . Artisanal and small-scale gold mining activities and mercury exposure in Gorontalo Utara Regency, Indonesia. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 102(10), 521-542
- Apandi, T. & Bachri, S., 1997. Geological map of the Kotamobagu sheet. Sulawesi Map.
- Brahmantyo, B. (2009). Ekspedisi Geografi Indonesia 2009 Gorontalo. Bakosurtanal

- 
- Bemmelen, R . W . Van. (1949) . *The Geology of Indonesia*. Vol.1A, 732 PP., *Government Printing Office, The Hague*.
- Gafur, N. A., Sakakibara, M., Sera, K., & Arifin, Y. I., (2020). Toxic Metal Concentrations of Human Hair in Downstream of ASGM Sites in Bone Bolango Regency, Gorontalo Province, Indonesia. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 536(1), 012006
- Hall, R., & Wilson, M. E. J. (2000). Neogene sutures in eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 781-808
- Kimjima, S., Sakakibara, M., Pateda, S. M., & Sera, K. (2022) . Contamination Level in Geo-Accumulation Index of River Sediments at Artisanal and Small Scale Gold Mining Area in Gorontalo Province, Indonesia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1), 6094
- Muller, G. (1969). Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2, 108–118.
- Simbolon, D., Surya, S.M., Winsa, S.Y. (2010). Kandungan Merkuri dan Sianida Pada Ikan yang Tertangkap dari Teluk Kao, Halmahera Utara. *Ilmu Kelautan*, Vol. 5 No. 3.
- Van Zuidam, R. A. (1983). *Guide To Geomorphologic Aerial Photographic Interpretation and Mapping*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede: The Netherlands.