

## Penilaian Kualitas Lingkungan Perairan Berbasis Bioindikator (Gastropoda) di Area Dampak Pertambangan Nikel Kecamatan Pomalaa, Sulawesi Tenggara

Muhammad Fajar Purnama<sup>1,2\*</sup>, Agus Suprihanto<sup>1</sup>, Hadiyanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,  
 Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

<sup>2</sup>Jurusan Manajemen Sumberdaya Perairan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Halu Oleo,  
 Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia 93232

\*Corresponding author: muhammadfajarpurnama@gmail.com

(Received: January 3, 2025; Accepted: February 5, 2025)

### Abstract

*Assessment of the Quality of Aquatic Environment Based on Bioindicators (Gastropoda) in the Nickel Mining Impact Area of Pomalaa District, Southeast Sulawesi. This study aims to evaluate the impact of nickel mining on aquatic ecosystems in Pomalaa District, Southeast Sulawesi. The method used is gastropod sampling as a bioindicator of water quality at several points affected by mining activities. The selection of gastropods as an indicator is based on the sensitivity of these organisms to changes in aquatic environmental conditions. Sampling was carried out at various locations, including control areas that were relatively undisturbed by mining activities. Water physicochemical parameters were also measured to provide supporting data. The results of the analysis showed changes in the composition and abundance of gastropods in the affected area (7 species) compared to the control area (39 species). These changes include a decrease in species diversity ( $H'$  control 3.10 (high) and declined in the impact area to 1.73), the dominance of several types of gastropods that are tolerant to pollution ( $C = 0.52$ ), and the loss of several species that are sensitive to changes in water quality (*Sphaerassiminea miniata*). In addition, a correlation was found between the level of heavy metal pollution in the waters and changes in the structure of the gastropod community. These findings indicate that nickel mining activities in Pomalaa District have a significant impact on the health of the surrounding aquatic ecosystem. The implications of this study include the importance of stricter environmental management in mining areas, as well as the need for ongoing monitoring of the quality of aquatic ecosystems in the area.*

**Keywords:** assessment, environmental health, bioindicators, nickel mining

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak pertambangan nikel terhadap ekosistem perairan di Kecamatan Pomalaa, Sulawesi Tenggara. Metode yang digunakan adalah pengambilan sampel gastropoda sebagai bioindikator kualitas air di beberapa titik yang terkena dampak aktivitas pertambangan. Pemilihan gastropoda sebagai indikator didasarkan pada sensitivitas organisme ini terhadap perubahan kondisi lingkungan perairan. Pengambilan sampel dilakukan di berbagai lokasi, termasuk area kontrol yang relatif tidak terganggu oleh aktivitas pertambangan. Parameter fisika-kimia air juga diukur untuk memberikan data pendukung. Hasil analisis menunjukkan adanya perubahan komposisi dan kelimpahan gastropoda di area yang terkena dampak (7 spesies) dibandingkan dengan area kontrol (39 spesies). Perubahan ini meliputi penurunan keanekaragaman spesies ( $H'$  kontrol 3,10 (tinggi) dan terdeklinasi di area dampak menjadi 1,73), dominasi beberapa jenis gastropoda yang toleran terhadap polusi ( $C = 0,52$ ), serta hilangnya beberapa spesies yang sensitif terhadap perubahan kualitas air (*Sphaerassiminea miniata*). Selain itu, ditemukan

korelasi antara tingkat pencemaran logam berat di perairan dengan perubahan struktur komunitas gastropoda. Temuan ini mengindikasikan bahwa aktivitas pertambangan nikel di Kecamatan Pomalaa memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan ekosistem perairan di sekitarnya. Implikasi dari penelitian ini mencakup pentingnya pengelolaan lingkungan yang lebih ketat di area pertambangan, serta kebutuhan untuk melakukan pemantauan berkelanjutan terhadap kualitas ekosistem perairan di wilayah tersebut.

**Kata kunci:** *assesment, kesehatan lingkungan, bioindikator, pertambangan nikel*

**How to Cite This Article:** Purnama, M. F., Suprihanto, A. & Hadiyanto, H. (2025). Penilaian Kualitas Lingkungan Perairan Berbasis Bioindikator (Gastropoda) di Area Dampak Pertambangan Nikel Kecamatan Pomalaa, Sulawesi Tenggara. *JPII*, 2(6), 359-370. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2024.24930>

## PENDAHULUAN

Kualitas lingkungan perairan menjadi salah satu aspek penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem, terutama di daerah yang terkena dampak aktivitas pertambangan (Singer & Battin, 2007; Norris & Thoms, 1999; Dzioc et al., 2006). Di Kecamatan Pomalaa, Sulawesi Tenggara, pertambangan nikel telah menimbulkan berbagai tantangan bagi kualitas air dan keanekaragaman hayati, salah satunya adalah masukan limbah *overburden* atau polutan lumpur asam tambang yang berasal dari aktivitas *open pit* atau pengelupasan tanah atas (*top soil*) sebagai tahap awal dalam kegiatan eksploitasi sumber daya nikel (Purnama et al., 2024a, 2024b; Hamzah et al., 2015; Hamzah, 2009; Zubayr, 2009; Erfina & Sjarmidi, 2019). Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menilai kualitas lingkungan perairan adalah melalui penggunaan bioindikator (Dzioc et al., 2006; Srihastuti et al., 2022; Timm et al., 2001), khususnya gastropoda (invertebrata: moluska) (Purnama et al., 2024a, 2024b; Chukaeva & Petrov, 2023; Menon et al., 2023; Fitria et al., 2023; Saleki et al., 2023; Gitarama et al., 2016). Gastropoda merupakan organisme akuatik yang sensitif terhadap perubahan kualitas air dan dapat memberikan informasi berharga mengenai kondisi ekosistem perairan (Mukhtorova et al., 2023; Campoy-Diaz et al., 2023; Saleki et al., 2023; Fitria et al., 2023; Chukaeva & Petrov, 2023). Dengan memahami peran gastropoda sebagai bioindikator, kita dapat lebih baik mengevaluasi dampak negatif dari pertambangan nikel terhadap ekosistem perairan di wilayah ini.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa aktivitas penambangan dapat menyebabkan pencemaran dan kerusakan habitat yang signifikan (Harahap, 2024; Hamzah, 2024). Dampak tersebut tidak hanya memengaruhi kehidupan akuatik tetapi juga bisa berdampak luas pada masyarakat lokal yang bergantung pada sumber daya alam tersebut. Oleh karena itu, analisis mendalam tentang interaksi antara gastropoda dan kualitas air di area pertambangan sangat penting untuk menciptakan strategi mitigasi yang efektif serta meningkatkan kesadaran akan perlunya perlindungan lingkungan dalam konteks kegiatan industri.

Pertambangan nikel memiliki potensi untuk mengakibatkan perubahan signifikan pada ekosistem

perairan di sekitarnya, karena dapat menyebabkan degradasi habitat melalui fenomena sedimentasi (*overburden*) (Purnama et al., 2024a, 2024b). Penggunaan gastropoda sebagai bioindikator dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang kondisi lingkungan perairan dibandingkan dengan pengukuran parameter fisik-kimia semata (Timm et al., 2001; Purnama et al., 2024a, 2024b). Evaluasi kualitas lingkungan perairan di area dampak pertambangan nikel menjadi penting untuk memantau dan mengelola dampak lingkungan serta menjaga keberlanjutan ekosistem akuatik di wilayah tersebut. Evaluasi kualitas lingkungan perairan menjadi sangat penting untuk memahami dampak aktivitas manusia terhadap ekosistem akuatik.

Pendekatan ini tidak hanya membantu dalam mengidentifikasi perubahan lingkungan akibat kegiatan pertambangan, tetapi juga dapat menjadi dasar untuk pengambilan keputusan dalam upaya konservasi dan pengelolaan sumber daya perairan yang berkelanjutan. Evaluasi kualitas lingkungan perairan menggunakan bioindikator seperti gastropoda secara empirik mampu mendeterminasi kondisi ekosistem dan tingkat pencemaran yang terjadi (Purnama et al., 2024a, 2024b). Penggunaan metode ini penting untuk memantau dan mengelola dampak lingkungan dari aktivitas pertambangan nikel, serta untuk menjaga keseimbangan ekosistem perairan di wilayah Pomalaa, Sulawesi Tenggara. Fokus utama atau tujuan penelitian ini adalah menganalisis perubahan lingkungan akuatik khususnya di ekosistem mangrove yang disebabkan oleh aktivitas ekstraksi dan pengolahan nikel di wilayah tersebut.

## METODE PENELITIAN

### Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan April-September 2024 (periode musim hujan, April-Juni dan kemarau, Juli-September) di Kecamatan Pomalaa Kabupaten Kolaka Provinsi Sulawesi Tenggara, tepatnya pada ekosistem mangrove atau wilayah muara sungai Dawi-Dawi yang terkoneksi langsung dengan aliran hulu (daerah eksisting penambangan nikel) yang membawa limbah *overburden* (sedimentasi) dan situs rujukan (*reference site*) atau area yang tidak dipengaruhi langsung oleh aktivitas pertambangan nikel, tepatnya di kawasan

mangrove Desa Totobo (Gambar 2). Lokasi penelitian ditransformasi ke dalam dimensi stasiun, sebanyak 4 area contoh dan tersebar di Kawasan ekosistem mangrove Desa Totobo (2 stasiun) dan Kelurahan Dawi-Dawi (2 stasiun). Ke-4 stasiun tersebut merupakan keterwakilan dari seluruh luasan ekosistem mangrove di lokasi penelitian. Lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1 berikut.



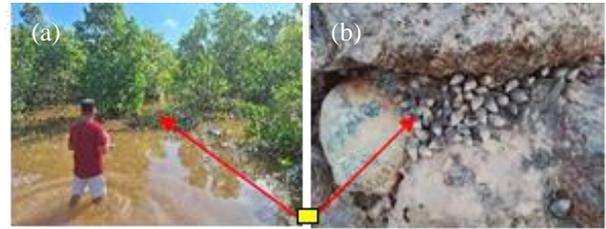
**Gambar 1.** Lokasi penelitian (*sampling stations*). Rona lingkungan yang berbeda antara wilayah terdampak (a) dan situs rujukan (*reference site*) (b, c) (Purnama, 2024)



**Gambar 2.** Peta lokasi penelitian (Sumber : Google earth, 2024)

### Objek Penelitian

Objek riset yang telah ditetapkan pada penelitian ini terdiri atas 2 bagian yaitu ekosistem perairan sebagai habitat gastropoda (a) dan biota indikator atau invertebrata (b) yang dikaji. Secara spesifik ekosistem perairan yang menjadi lokus penelitian ini berpusat pada ekosistem mangrove (*mangrove forest*) atau biasa dikenal hutan rawa payau yang terletak di wilayah pesisir (*coastal zone*) dan sangat dipengaruhi oleh aktivitas pasang-surut air laut (*intertidal zone*), di mana saat kondisi perairan pasang (*high tide*) hutan mangrove terpapar air dan ketika perairan surut (*low tide*) hutan mangrove terpapar udara. Sedangkan organisme indikator dalam hal ini kelompok organisme invertebrata yang dipilih sebagai interpretasi kelompok makroinvertebrata terbesar di ekosistem mangrove adalah komunitas gastropoda (Gambar 3).



**Gambar 3.** Ekosistem mangrove (a) dan komunitas gastropoda (b) (Purnama, 2024)

### Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah aquades dan alkohol 70% (mengawetkan sampel). Sedangkan alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah transek kuadrat, *gloves*, *hand scoop*, plastik sampel, basket sampel dan kertas label. Beberapa peralatan tersebut merupakan instrumen dalam pengambilan sampel di lapangan.

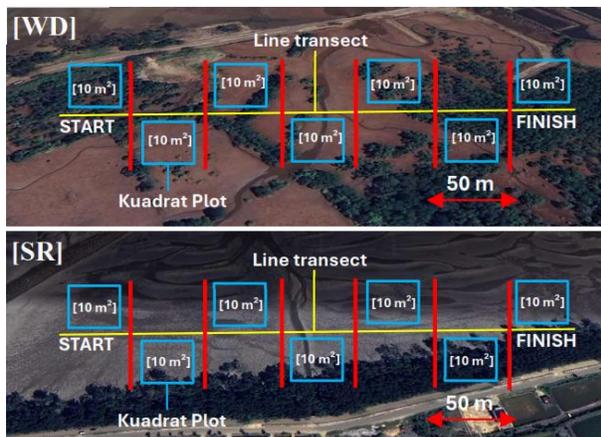
### Pengumpulan dan Analisis Sampel

Pengambilan sampel gastropoda dilakukan menggunakan metode *purposive sampling* dengan teknik *handpicking* atau pengambilan secara langsung (manual) pada beberapa titik yang telah ditentukan di kawasan ekosistem mangrove Kecamatan Pomalaa, tepatnya di Desa Totobo untuk area yang tidak dipengaruhi oleh aktivitas pertambangan atau situs rujukan (*reference site*) dan Kelurahan Dawi-Dawi sebagai area dampak aktivitas pertambangan nikel (Gambar 3). Pengumpulan sampel gastropoda di lapangan menggunakan alat bantu *gloves* dan *sieving shaker*. Pengambilan sampel dilakukan secara sistematis dengan menggunakan transek kuadrat (1 m<sup>2</sup>) untuk memastikan representasi yang akurat dari komunitas gastropoda di berbagai habitat perairan. Sampel gastropoda diambil dari berbagai mikrohabitat pada ekosistem mangrove seperti substrat berbatu, berpasir atau bervegetasi untuk memastikan representasi yang komprehensif dari komunitas akuatik.

Pengambilan sampel dilakukan secara berkala, setiap bulan atau musiman, untuk menangkap variasi temporal dalam populasi gastropoda. Selanjutnya, sampel gastropoda yang telah dikumpulkan disortir dan diawetkan dalam larutan alkohol 70% kemudian diidentifikasi lebih lanjut di laboratorium. Setelah itu, dilakukan proses determinasi taksa gastropoda hingga tingkat taksonomi yang sesuai atau taksonomi terendah yang memungkinkan, biasanya hingga tingkat spesies menggunakan kunci identifikasi yang tepat dan terstandar seperti, Worms “*World Register of Marine Species*” (<https://www.marinespecies.org>), *Molluscabase* (<https://www.molluscabase.org>) dan *Collection of Worldwide Seashells (Collection of worldwide seashells* ([idscaro.net](http://idscaro.net))), serta beberapa jurnal dan *textbook* terpercaya antara lain: Dharma (1992), (1998), (2005); Pramudji, 2001; Arbi, 2014; Capenberg et al., 2006; Dolorosa & Galon, 2014; Ruppert et al., 2004; Strong et

al., 2008; Zvonareva & Kantor, 2015; Zvonareva et al., 2015; Yadav et al., 2019. Selain itu, penelitian ini juga mencakup analisis faktor-faktor lingkungan yang memengaruhi distribusi dan kelimpahan gastropoda di area studi seperti suhu air, pH air, pH substrat, salinitas, kadar oksigen terlarut dan beberapa parameter lainnya yang dapat memengaruhi keberadaan gastropoda.

Secara rinci tahapan-tahapan dalam penelitian ini terdiri atas 4 bagian besar yaitu: (1) Observasi lapang atau penelitian pendahuluan (pengambilan data primer awal sebagai landasan dalam determinasi lokasi/stasiun penelitian secara spesifik) (2) Penelitian lapangan (pengambilan data primer) (3) Analisis laboratorium (4) Analisis data dan pelaporan (*drafting* dan *finishing* artikel/tugas akhir).



**Gambar 4.** Denah lokasi pengambilan sampel gastropoda dan pengukuran kualitas perairan di wilayah dampak (WD) dan situs rujukan (SR)

**Analisis Data**

Analisis data meliputi perhitungan struktur komunitas (*ecological index*) seperti indeks keanekaragaman, keseragaman dan dominansi untuk mengevaluasi kondisi ekologi perairan. Hasil analisis ini kemudian diinterpretasikan untuk menilai dampak pertambangan nikel terhadap kualitas lingkungan perairan di lokasi penelitian. Analisis sampel mencakup identifikasi taksonomi hingga tingkat spesies, serta penghitungan jumlah individu untuk menilai keanekaragaman dan kelimpahan spesies indikator. Beberapa analisis tersebut diuraikan secara detail dan sistematis di bawah ini. Data yang diperoleh dari hasil *sampling*, selanjutnya dianalisis menggunakan beberapa formulasi indeks ekologi berikut.

- 1) Kerapatan mangrove dianalisis merujuk pada formula menurut Bengen (2003), dengan rumus sebagai berikut.

$$Density = \frac{Number\ of\ Individuals}{Sample\ Plot\ Area} \quad (1)$$

Kriteria Baku Kerusakan Mangrove merujuk pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 201 Tahun 2004 yang disajikan pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 1.** Kriteria baku tentang kerusakan mangrove berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 201 Tahun 2004

Kriteria	Penutupan (%)	Kerapatan (Pohon/Ha)
Baik	Sangat Padat	>1500
	Sedang	>1000-<1500
	Jarang	<1000

- 2) Kelimpahan jenis gastropoda dianalisis menggunakan formulasi Yasman (1998).

$$A = \frac{xi}{ni} \quad (2)$$

di mana *A* adalah kelimpahan (ind./m<sup>2</sup>), *xi* adalah jumlah individu (ind.) dan *ni* adalah plot contoh (m<sup>2</sup>).

- 3) Analisis keanekaragaman (*diversity*) jenis menggunakan indeks keanekaragaman Shannon-Weaner (Odum, 1993), dengan rumus:

$$H' = - \sum_{i=1}^s \left[ \left( \frac{ni}{N} \right) \times \ln \left( \frac{ni}{N} \right) \right] \quad (3)$$

di mana *H'* adalah indeks keanekaragaman, *Ni* adalah jumlah individu spesies ke-*i* dan *N* jumlah total individu.

Menurut Wilhm (1975) kriteria indeks keanekaragaman dibagi menjadi 3, yaitu:

- H'* < 1,0 = keanekaragaman jenis rendah
- 1,0 < *H'* < 3 = keanekaragaman jenis sedang
- H'* > 3 = keanekaragaman jenis tinggi

- 4) Indeks keseragaman dianalisis menggunakan rumus menurut Odum (1993) yaitu:

$$E = \frac{H'}{\ln S} \quad (4)$$

di mana *E* adalah indeks keseragaman, *H'* adalah indeks keanekaragaman dan *S* adalah jumlah jenis. Kriteria nilai indeks keseragaman jenis adalah sebagai berikut:

- E* < 0,31 = tingkat keseragaman jenis rendah
- 0,31 > *E* > 1 = tingkat keseragaman jenis sedang
- E* > 1 = tingkat keseragaman jenis tinggi

- 5) Indeks kekayaan jenis (*margalef index*) dianalisis berdasarkan formulasi rumus menurut Ludwig & Reynolds (1988) yaitu:

$$R = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (5)$$

di mana *S* adalah jumlah spesies dan *N* adalah jumlah individu.

Kriteria nilai indeks kekayaan jenis margalef adalah sebagai berikut:

- D* < 2,5 = tingkat kekayaan jenis rendah
- 2,5 > *D* > 4 = tingkat kekayaan jenis sedang
- D* > 4 = tingkat kekayaan jenis tinggi

- 6) Indeks dominansi dihitung menggunakan formulasi menurut Odum (1993) yaitu:

$$C = \sum \left( \frac{Ni}{N} \right)^2 \quad (6)$$

dimana *ni* adalah jumlah individu ke-*i* dan *N* adalah total jumlah individu seluruh spesies.

Kriteria indeks dominansi terdiri atas :

0 < C < 0,5 = tidak ada jenis yang mendominasi

0,5 < C < 1 = terdapat jenis yang mendominasi

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

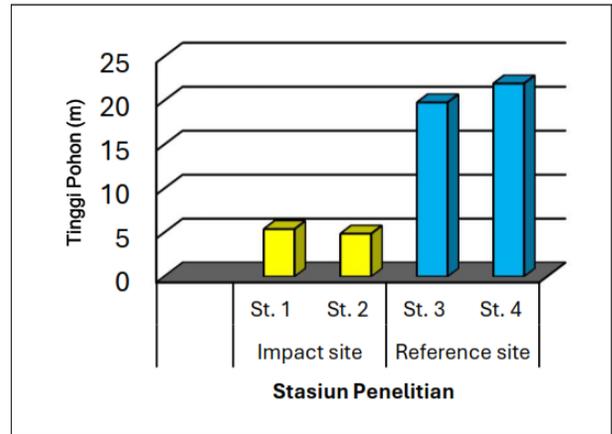
Beberapa aspek lingkungan yang diperlukan menilai kesehatan atau keseimbangan suatu ekosistem di antaranya adalah tingkat keanekaragaman hayati dalam ekosistem tersebut, termasuk jumlah dan variasi spesies yang ada. kualitas perairan (parameter kunci) dan tanah di area tersebut, yang dapat memengaruhi kelangsungan hidup organisme. Keberadaan dan kondisi habitat alami serta interaksi antar spesies dalam rantai makanan ekosistem (indeks ekologi). Parameter-parameter yang digunakan dalam penilaian kualitas lingkungan di area dampak pertambangan nikel Kecamatan Pomalaa, Sulawesi Tenggara diuraikan secara detail dan sistematis di bawah ini (Tabel 2 dan Gambar 5). Berikut adalah kepadatan mangrove di lokasi penelitian (Tabel 2).

**Tabel 2.** Kerapatan mangrove di lokasi penelitian

No.	Stasiun Penelitian	Kepadatan Mangrove (Tegakan/ha)	Kategori
1.	Stasiun 1	3000	Padat
	Stasiun 2	3250	Padat
2.	Stasiun 3	20500	Sangat Padat
	Stasiun 4	21750	Sangat Padat

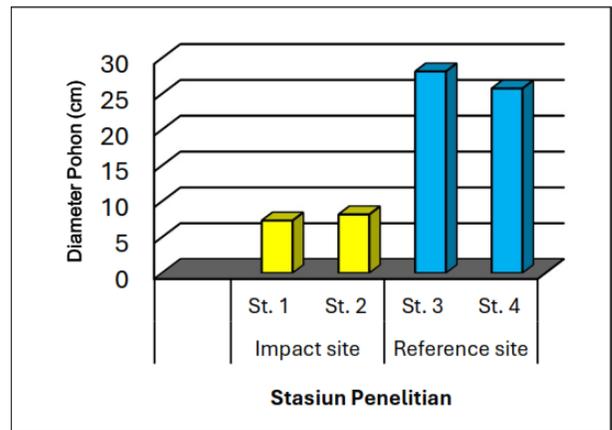
Keterangan: [1] area terdampak (Stasiun 1, 2) dan [2] situs rujukan (Stasiun 3, 4)

Hasil penelitian menunjukkan variasi yang signifikan dalam kepadatan mangrove di antara stasiun-stasiun yang diamati. Stasiun 3 dan 4 memiliki kepadatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan Stasiun 1 dan 2, menunjukkan adanya perbedaan kondisi lingkungan atau faktor-faktor lain yang memengaruhi pertumbuhan mangrove di lokasi-lokasi tersebut. Sifat vegetasi di wilayah dampak cenderung terkonsentrasi di satu tempat, sementara di area lainnya tidak ditumbuhi vegetasi mangrove atau hanya ditemukan pohon-pohon mangrove yang telah mati. Selain itu, ketinggian pohon di area dampak cenderung stagnan dikisaran 5-8 m (umur vegetasi relatif sama dengan di situs rujukan). Sedangkan di situs rujukan keseluruhan areanya ditumbuhi oleh vegetasi mangrove yang sangat rapat dengan tinggi pohon rata-rata berkisar 18-21 m, bahkan terdapat beberapa pohon yang memiliki ketinggian di atas 25 m.



**Gambar 5.** Rerata tinggi tegakan mangrove di area terdampak (Stasiun 1, 2) dan situs rujukan (Stasiun 3, 4)

Temuan ini menyoroti variasi signifikan pada tinggi tegakan di berbagai stasiun penelitian. Perbedaan mencolok antara nilai yang lebih rendah di Stasiun 1 dan 2 dibandingkan dengan pengukuran yang jauh lebih tinggi di Stasiun 3 dan 4 menunjukkan adanya potensi faktor lingkungan atau pengelolaan yang memengaruhi pertumbuhan pohon. Kondisi yang sama juga terdapat pada parameter diameter tegakan (Gambar 6).



**Gambar 6.** Perbedaan rerata diameter batang tegakan mangrove di area terdampak (Stasiun 1, 2) dan situs rujukan (Stasiun 3, 4)

Data yang disajikan menunjukkan variasi dalam pengukuran diameter tegakan di berbagai stasiun penelitian. Diameter tegakan pohon bervariasi secara signifikan di berbagai stasiun penelitian, dengan Stasiun 3 menunjukkan diameter rata-rata terbesar sebesar 28,1 cm. Stasiun 4 mengikuti dengan diameter rata-rata 25,75 cm, sementara Stasiun 1 dan Stasiun 2 menunjukkan diameter yang jauh lebih kecil yaitu masing-masing 7,32 dan 8,18 cm. Variasi diameter tegakan pohon ini dapat menjadi indikasi perbedaan kondisi lingkungan di seluruh stasiun penelitian. Selain kondisi vegetasi yang

sangat jauh berbeda, struktur komunitas atau indeks ekologi juga sangat berbeda (Tabel 3 dan 4).

**Tabel 3.** Indeks ekologi gastropoda di situs rujukan

No.	Indeks Ekologi	Nilai	Kategori
1	Diversity (H')	3,10	Tinggi
2	Kekayaan jenis (R)	6,97	Tinggi
3	Keseragaman (E)	0,85	Sedang
4	Dominasi (C)	0,52	Tidak ada jenis yang mendominasi

Indeks ekologi dapat memberikan informasi lebih mendalam tentang struktur dan stabilitas komunitas yang diteliti. Nilai indeks keanekaragaman dan kekayaan jenis yang tinggi menunjukkan bahwa komunitas tersebut memiliki variasi spesies yang baik, sementara nilai keseragaman yang sedang mengindikasikan distribusi individu antar spesies yang cukup merata. Dominansi yang relatif rendah menguatkan gagasan bahwa tidak ada spesies tunggal yang mendominasi secara berlebihan dalam komunitas ini.

**Tabel 4.** Indeks ekologi gastropoda di wilayah terdampak pertambangan nikel

No.	Indeks Ekologi	Nilai	Kategori
1	Diversity (H')	1,73	Rendah
2	Kekayaan jenis (R)	1,63	Rendah
3	Keseragaman (E)	0,96	Sedang
4	Dominasi (C)	0,52	Tidak ada jenis yang mendominasi

Hasil analisis indeks ekologi menunjukkan bahwa komunitas tersebut memiliki keanekaragaman dan kekayaan jenis yang rendah. Meskipun keseragaman berada pada tingkat sedang, terdapat indikasi adanya dominansi oleh satu atau beberapa jenis tertentu. Kondisi ini dapat mengindikasikan adanya tekanan ekologis atau faktor lingkungan yang memengaruhi struktur komunitas tersebut atau gangguan yang memengaruhi keseimbangan dan distribusi spesies. Nilai indeks diversitas dan kekayaan jenis yang rendah secara empirik merupakan interpretasi dari minimnya kehadiran taksa gastropoda di area dampak, di mana hanya ditemukan 7 spesies dan dari ke-7 spesies tersebut terdapat 2 jenis (*T. sulcata* dan *T. palustris*) yang mendominasi ruang ekologi di area dampak, ditambah lagi kualitas lingkungan di stasiun tersebut sangat tidak mendukung spesies-spesies yang tergolong sensitif untuk bertahan hidup. Komposisi jenis gastropoda yang ditemukan di lokasi penelitian disajikan pada Tabel 5 berikut.

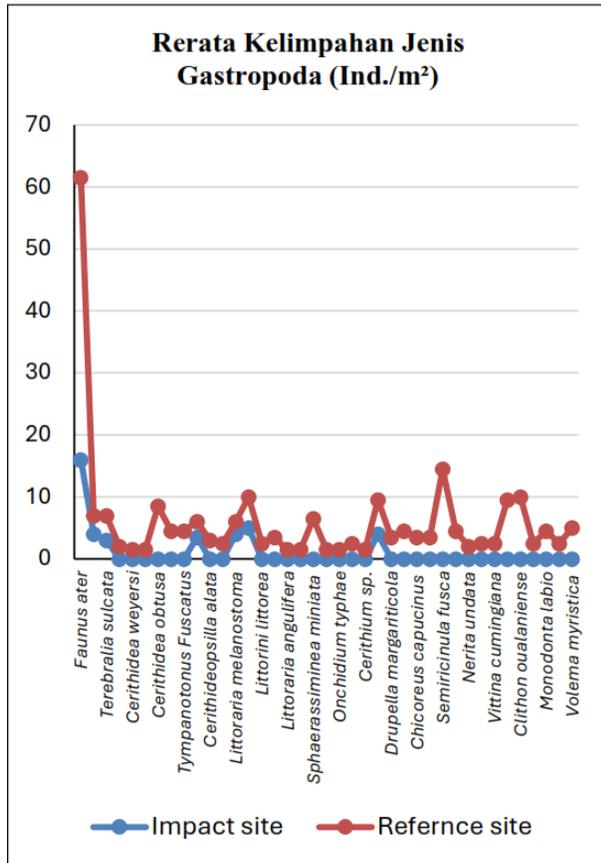
**Tabel 5.** Komposisi jenis gastropoda di situs rujukan dan wilayah dampak

Spesies Gastropoda	Impact site	Reference site
<i>F. ater</i>	✓	✓
<i>T. palustris</i>	✓	✓
<i>T. sulcata</i>	✓	✓
<i>C. ornata</i>	×	✓
<i>C. weyersi</i>	×	✓
<i>C. cingulata</i>	×	✓
<i>C. obtusa</i>	×	✓
<i>C. quadrata</i>	×	✓
<i>T. fuscatus</i>	×	✓
<i>T. telescopium</i>	✓	✓
<i>C. alata</i>	×	✓
<i>C. djadjariensis</i>	×	✓
<i>L. melanostoma</i>	✓	✓
<i>L. scabra</i>	✓	✓
<i>L. littorea</i>	×	✓
<i>L. undulata</i>	×	✓
<i>L. angulifera</i>	×	✓
<i>P. sulcatus</i>	×	✓
<i>S. miniata</i>	×	✓
<i>O. griseum</i>	×	✓
<i>O. typhae</i>	×	✓
<i>C. pellucida</i>	×	✓
<i>Cerithium sp.</i>	×	✓
<i>H. nigra</i>	✓	✓
<i>D. margariticola</i>	×	✓
<i>S. muricoides</i>	×	✓
<i>C. capucinus</i>	×	✓
<i>T. granulata</i>	×	✓
<i>S. fusca</i>	×	✓
<i>N. lineata</i>	×	✓
<i>N. undata</i>	×	✓
<i>V. coromandeliana</i>	×	✓
<i>V. cumingiana</i>	×	✓
<i>C. castaneus</i>	×	✓
<i>C. oualaniense</i>	×	✓
<i>E. aurisjudae</i>	×	✓
<i>M. labio</i>	×	✓
<i>Conus sp.</i>	×	✓
<i>V. myristica</i>	×	✓
Total	7 spesies	39 spesies

\*Keterangan: Tanda [✓] = ada (*exist*), dan Tanda [×] = tidak ada (*not exist*)

Perbedaan jumlah spesies antara area terdampak dan lokasi referensi menunjukkan adanya potensi gangguan ekologi atau tekanan lingkungan (perubahan) di area terdampak. Jumlah spesies yang jauh lebih rendah di area terdampak (*impact site*) dapat mengindikasikan berkurangnya keanekaragaman hayati, karena fenomena sedimentasi aktivitas pertambangan nikel (industri) dan faktor antropogenik lainnya atau ketimpangan kekayaan spesies ini dapat menjadi indikasi berbagai faktor ekologi, seperti degradasi habitat, polusi, atau perubahan

kondisi lingkungan setempat (Gambar 8). Kelimpahan jenis gastropoda di lokasi penelitian ditemukan beranekaragam dengan kekayaan jenis (*species richness*) yang tinggi di situs rujukan dan berbanding terbalik dengan wilayah terdampak aktivitas pertambangan nikel yang hanya ditemukan 7 spesies.



**Gambar 7.** Rerata kelimpahan jenis gastropoda pada situs rujukan dan wilayah dampak

Kualitas perairan di area dampak (*impact area*) pertambangan nikel dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti sedimentasi, perubahan pH dan kontaminasi logam berat. Kegiatan pertambangan dapat meningkatkan erosi tanah dan mengubah pola aliran air, yang berdampak pada ekosistem perairan sekitar. Selain itu, pembuangan limbah pertambangan yang tidak terkendali dapat menyebabkan pencemaran air yang serius dan mengancam kehidupan akuatik di wilayah tersebut. Kualitas perairan tidak hanya memengaruhi kesehatan dan kelangsungan hidup organisme akuatik, tetapi juga berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem perairan secara keseluruhan. Perubahan pada parameter kualitas air seperti suhu, pH dan oksigen terlarut berdampak signifikan terhadap distribusi, pertumbuhan dan reproduksi berbagai spesies akuatik. Oleh karena itu, pemantauan dan pengelolaan kualitas perairan yang berkelanjutan sangat penting

untuk melestarikan keanekaragaman hayati akuatik dan memastikan keberlanjutan sumber daya perairan. Hasil pengukuran beberapa parameter kualitas perairan kunci di lokasi penelitian, baik di situs rujukan maupun wilayah dampak ditampilkan pada Tabel 6 berikut.

**Tabel 6.** Rerata hasil pengukuran parameter kualitas perairan kunci di lokasi penelitian

Parameter	Hasil pengukuran	Stasiun	Kategori (baku mutu)
	100%	RS	Jernih
Kecerahan	26,5 cm (ked. 157 cm)	IS	Keruh
TSS	20,00 mg/L	RS	Belum tercemar
	363,00 mg/L	IS	Tercemar
TDS	28,07 mg/L	RS	Belum tercemar
	42,08 mg/L	IS	Belum tercemar
COD	19,80 mg/L	RS	Belum tercemar
	116,50 mg/L	IS	Tercemar
Warna air	60 Pt-Co	RS	Belum tercemar
	500 Pt-Co	IS	Tercemar
Turbidity	7.95 NTU	RS	Belum tercemar
	159,80 NTU	IS	Tercemar
Ni substrat	0,0185 mg/kg	RS	Belum tercemar
	0,9281 mg/kg	IS	Tercemar
Ni biota	0,0066 mg/kg	RS	Belum tercemar
	0,3750 mg/kg	IS	Tercemar
Ni air	0,0033 mg/L	RS	Belum tercemar
	0,0868 mg/L	IS	Tercemar

\*Keterangan: RS = *Reference site*, dan IS = *Impact site*

Hasil pengukuran dan analisis beberapa parameter kunci di atas (Tabel 6) menunjukkan bahwa di area terdampak pertambangan nikel seluruh parameternya memiliki konsentrasi yang melewati ambang batas baku mutu air (kecuali TDS) berdasarkan standar baku mutu air Kepmen LH No. 51 Tahun 2004 tentang baku mutu air laut untuk biota. Dengan kata lain, wilayah dampak (*impact site*) dalam kondisi tercemar oleh bahan organik (kecerahan, TSS, dan *turbidity*) dan logam nikel dari aktivitas pertambangan nikel di sekitarnya. Berbanding terbalik dengan situs rujukan (*reference site*) yang kondisi kualitas perairannya dalam kisaran optimal atau sesuai baku mutu. Berikut adalah hasil penilaian kualitas lingkungan perairan (ekosistem mangrove) Pomalaa, Sulawesi Tenggara berbasis bioindikator (Tabel 7).

**Tabel 7.** Matriks penilaian kualitas lingkungan lingkungan perairan (ekosistem mangrove) kaitannya dengan interaksi metrik fisik, kimia, dan biologi

Stasiun	Metrik	Status Penilaian
RS	Kepadatan vegetasi mangrove	Sangat padat
IS		Padat
RS	Rerata tinggi tegakan mangrove	19,8-21,9 m
IS		4,9-5,4 m
RS	Rerata diameter tegakan mangrove	25,7-28,1 cm
IS		7,3-8,2 cm
RS	Rerata Kelimpahan gastropoda	Tinggi
IS		Rendah
RS	Jumlah jenis gastropoda	39 Spesies
IS		7 Spesies
RS	Indeks Keanekaragaman	Tinggi
IS		Rendah
RS	Indeks Keseragaman	Sedang
IS		Sedang
RS	Kekayaan Jenis	Tinggi
IS		Rendah
RS	Indeks Dominansi	Tidak ada dominasi
IS		Terdapat spesies yang mendominasi
RS	Parameter fisik kimia	Optimal
IS		Tercemar

\*Keterangan: RS = *Reference site*, dan IS = *Impact site*

Tabel ini menyajikan perbandingan komprehensif parameter bioekologi (aspek penilaian kualitas lingkungan perairan) antara dua stasiun, IS dan RS. Tabel ini menyoroti perbedaan signifikan dalam kerapatan vegetasi, tinggi dan diameter pohon, kelimpahan dan keanekaragaman gastropoda, dan parameter kualitas air. Data tersebut menunjukkan bahwa stasiun RS secara umum memiliki kondisi ekologi yang lebih baik dibandingkan dengan stasiun IS, dengan kerapatan vegetasi yang lebih tinggi, pohon yang lebih besar, keanekaragaman hayati yang lebih besar dan kualitas air yang lebih baik. Variasi ini menunjukkan kondisi ekologi yang berbeda dan potensi stresor lingkungan yang memengaruhi stasiun IS dibandingkan dengan stasiun RS. Kondisi ini menunjukkan bahwa komunitas ekologi RS yang lebih sehat dan lebih kompleks.

### Deskripsi Karakteristik Gastropoda

Karakteristik umum gastropoda (invertebrata: moluska) yang ditemukan di lokasi penelitian meliputi ukuran tubuh yang relatif kecil, kemampuan beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang terganggu, serta toleransi terhadap tingkat polusi tertentu. Beberapa spesies yang ditemukan memiliki ciri khas seperti eksoskeleton yang keras, organ pernapasan khusus untuk hidup di perairan dan strategi reproduksi yang memungkinkan mereka bertahan dalam kondisi

lingkungan yang berubah-ubah (Purnama et al., 2024a, 2024b).

Keberadaan dan komposisi spesies gastropoda ini dapat menjadi indikator biologis yang penting untuk menilai dampak pertambangan nikel terhadap ekosistem perairan di kawasan tersebut. Gastropoda yang ditemukan di kawasan dampak pertambangan nikel memiliki ciri khas adaptasi terhadap lingkungan yang terkena polusi logam berat. Beberapa spesies menunjukkan toleransi yang tinggi terhadap kadar nikel dalam air dan sedimen seperti *T. sulcata*, *T. palustris*, *T. telescopium*, *H. Nigra*, *L. scabra*, *L. melanostoma* dan *F. ater*, sementara yang lain mengalami penurunan populasi bahkan hilang atau mengalami kematian. Ketujuh spesies gastropoda tersebut pada dasarnya merupakan jenis-jenis yang resisten terhadap perubahan kualitas perairan (Arbi, 2014; Cappenberg et al., 2006).

Sementara 32 spesies lainnya (Tabel 5) tidak ditemukan di wilayah dampak (*impact site*). Hal ini erat kaitannya dengan sensitivitas jenis-jenis gastropoda tersebut terhadap perubahan penampang substrat perairan sebagai relung hidupnya akibat fenomena sedimentasi yang secara terus-menerus terjadi. Karakteristik morfologi dan fisiologi gastropoda tersebut dapat menjadi indikator biologis yang baik untuk menilai tingkat pencemaran dan dampak ekologis dari aktivitas pertambangan nikel. Gastropoda yang ditemukan di kawasan dampak pertambangan nikel umumnya memiliki adaptasi khusus terhadap kondisi lingkungan yang tercemar. Beberapa karakteristik yang sering dijumpai antara lain toleransi tinggi terhadap logam berat, kemampuan bioakumulasi dan sistem pernapasan yang terspesialisasi (Mukhtorova et al., 2023; Campoy-Diaz et al., 2023). Spesies-spesies ini juga cenderung memiliki ukuran tubuh yang lebih kecil dan siklus hidup yang lebih pendek dibandingkan dengan gastropoda di habitat yang tidak terganggu. Adaptasi tersebut memungkinkan gastropoda untuk bertahan hidup dan bahkan berkembang biak dalam kondisi yang tidak menguntungkan. Namun, perubahan komposisi spesies dan kelimpahan relatif gastropoda dapat mencerminkan tingkat gangguan ekosistem akibat aktivitas pertambangan nikel (Tabel 3, 4 dan Gambar5).

Selain itu, gastropoda di lingkungan pertambangan nikel sering menunjukkan perubahan perilaku dan strategi mencari makan untuk menghindari paparan berlebihan terhadap kontaminan dengan beradaptasi sebagai *tree fauna* atau organisme *benthos* yang *habitual action*-nya memanjat akar, batang dan daun mangrove. Selain itu, diduga ketujuh spesies yang ditemukan di wilayah dampak (Tabel 5) bahkan mampu mengembangkan mekanisme detoksifikasi khusus untuk mengatasi akumulasi logam berat dalam jaringan tubuh mereka, dikarenakan area tersebut memiliki kadar logam nikel yang melewati ambang baku mutu air (Chukaeva & Petrov, 2023; Chakrabarty & Das, 2006; Erfina &

Sjarmidi, 2019; Mukhtorova et al., 2023; Campoy-Diaz et al., 2023; Saleki et al., 2023; Fitria et al., 2023). Studi tentang variasi genetik populasi gastropoda di area pertambangan nikel juga dapat mengungkapkan proses adaptasi evolusioner yang terjadi sebagai respons terhadap tekanan lingkungan jangka panjang.

### Penilaian Kualitas Lingkungan Perairan

Analisis kualitas lingkungan perairan berbasis bioindikator gastropoda dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai dampak jangka panjang pertambangan nikel terhadap ekosistem akuatik. Indeks keanekaragaman dan kelimpahan relatif spesies gastropoda toleran polusi dapat digunakan sebagai parameter untuk mengukur tingkat degradasi habitat. Selain itu, pengamatan perubahan struktur komunitas gastropoda di sekitar area pertambangan nikel (ekosistem mangrove) secara langsung dapat mengungkapkan pola sebaran pencemaran dan zona pemulihan ekosistem. Hal tersebut terlihat dari kehadiran atau ketidakhadiran spesies-spesies tertentu seperti *S. miniata* yang notabene merupakan spesies asli ekosistem mangrove. *S. miniata* merupakan salah satu jenis gastropoda ukuran kecil ( $\pm 1$  mm) dengan jumlah populasi terbesar yang menghuni lantai dasar ekosistem mangrove (Purnama et al., 2024a, 2024b), sehingga ketiadaan spesies ini menjadi indikasi utama terjadinya perubahan di area lantai dasar (substrat) ekosistem mangrove atau telah terjadi degradasi di area mangrove (sedimentasi) oleh aktivitas eksplorasi dan ekstraksi pertambangan nikel di area *upland* (pegunungan) (Purnama et al., 2024b; Erfina & Sjarmidi, 2019).

Perubahan dalam komposisi komunitas gastropoda juga terjadi secara signifikan di area dampak dan hal tersebut mengindikasikan pengaruh yang besar aktivitas pertambangan yang tinggi melalui buangan sedimen (*overburden*) yang mengalir hingga ke muara dan menutupi substrat asli ekosistem mangrove yang merupakan habitat dari berbagai jenis makroinvertebrata. Kondisi ini tercermin dari nilai indeks keanekaragaman dan keseragaman komunitas gastropoda di area dampak yang memiliki kecenderungan sangat rendah dan sedang. Kondisi demikian menjadi tolok ukur tingginya tekanan lingkungan atau degradasi terhadap habitat gastropoda di ekosistem mangrove. Pernyataan tersebut sejalan dengan Masykur et al. (2018); Dziock et al. (2006); Srihastuti et al. (2022); Timm et al. (2001) yang menyatakan bahwa indeks ekologi dapat digunakan sebagai metrik untuk mengevaluasi kesehatan ekosistem perairan. Selain itu, bioakumulasi logam berat pada gastropoda, air dan sedimen (Tabel 6) juga memperkuat justifikasi kontaminan melalui rantai makanan akuatik yang bersumber dari sistem ekologi yang memiliki interaksi langsung dengan faktor-faktor antropogenik, salah satunya adalah industri pertambangan nikel.

Penelitian ini juga mengidentifikasi spesies gastropoda yang berpotensi sebagai bioindikator spesifik untuk pencemaran akibat pertambangan nikel, salah satunya yaitu dari famili *Assimineidae*, genus *Sphaerassiminea*, spesies *S. miniata*. Gastropoda jenis ini tergolong sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan perairan khususnya di area substrat. Merujuk pada temuan dalam riset ini (Tabel 5) *S. miniata* tidak ditemukan di area dampak pertambangan nikel, substrat alami sebagai relung hidup *S. miniata* telah tertutupi oleh limbah sedimen *overburden* ( $\pm 45$  cm). Kondisi tersebut terjadi karena fenomena sedimentasi di ekosistem mangrove dan membentuk area-area gundukan atau akresi (*overburden* atau sedimen berwarna orange-kemerahan) yang berasal dari kegiatan eksploitasi nikel di daerah hulu (pegunungan). Limbah *overburden* merupakan limbah berupa lumpur asam tambang (ARD) yang mengandung mineral rendah yang berasal dari aktivitas *open pit* dan pengupasan tanah atas atau *top soil* sebagai proses awal dalam eksploitasi sumberdaya nikel (Hamzah et al., 2015; Hamzah, 2009; Zubayr, 2009; Erfina & Sjarmidi, 2019).

Hasil penelitian ini juga merupakan studi komparatif antara komunitas gastropoda di kawasan yang terkena dampak pertambangan dan kawasan alami yang tidak terganggu (Tabel 5). Kedua area tersebut menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan, baik dari sisi kondisi struktur komunitas gastropoda, maupun hasil pengukuran kualitas perairannya (Tabel 6). Berdasarkan instrumen dan metrik penilaian kualitas lingkungan yang ditampilkan pada Tabel 7 maka dapat disimpulkan bahwa kualitas lingkungan di area terdampak pertambangan nikel sangat rendah atau kesehatan lingkungan perairan pada area terdampak (*impact site*) berkategori buruk. Hal ini didasarkan pada hasil analisis struktur komunitas (indeks ekologi) gastropoda, pengukuran dan analisis beberapa parameter kualitas perairan kunci, maupun kondisi vegetasinya. Begitu pula hubungan antara karakteristik fisik-kimia air dan distribusi spesies gastropoda tertentu dalam kaitannya terhadap pengembangan bioindikator yang lebih spesifik terhadap pencemaran akibat pertambangan nikel. Studi jangka panjang mengenai perubahan komunitas gastropoda dapat memberikan wawasan tentang kemampuan pemulihan ekosistem setelah upaya remediasi dilakukan. Selain itu, analisis isotop stabil pada jaringan gastropoda dapat membantu melacak aliran energi dan transfer kontaminan dalam jaring-jaring makanan akuatik di kawasan yang terdampak pertambangan.

### Dampak Pertambangan Nikel

Aktivitas pertambangan nikel di Pomalaa, memberikan dampak sistemik bagi homeostasis integritas ekologi organisme gastropoda (moluska: gastropoda). Secara umum komunitas gastropoda

tergolong organisme yang hidup menetap di dasar perairan (*benthos*). Sementara, industri pertambangan nikel sendiri diketahui menjadi salah satu penyebab terjadinya sedimentasi (*overburden*) (Hamzah et al., 2015; Hamzah, 2009; Zubayr, 2009). Terdapat beberapa dampak krusial aktivitas pertambangan nikel di perairan, tidak hanya bahaya kontaminasi logam berat (Hg, Cr, Cd, Pb, Ni, Fe dan lainnya) pada sedimen, air dan biota (kecendrungan biota mampu mengakumulasi) (Erfina & Sjarmidi, 2019; Allaoui et al., 2022; Bae Jum et al., 2021; Hamzah, 2009; Zubayr, 2009) namun polutan utama yang secara fisik merubah rona lingkungan suatu ekosistem (dampak yang terlihat) (Gambar 6) dan menjadi ancaman kelestarian dan keberlanjutan ekosistem akuatik adalah “fenomena sedimentasi (*overburden*)”. Tidak hanya mendegradasi ekosistem sungai dan turunannya, juga mendegradasi ekosistem pesisir penting seperti, hutan mangrove, padang lamun (*seagrass*) dan terumbu karang (*coral reef*). Hal inilah yang terjadi saat ini di ekosistem mangrove Kelurahan Dawi-Dawi (*impact site*) (Purnama et al., 2024a, 2024b).

Kedepan dapat dikembangkan analisis isotop stabil pada jaringan gastropoda yang dapat membantu melacak sumber dan jalur masuknya kontaminan ke dalam rantai makanan akuatik. Penggunaan teknik biomonitoring berbasis DNA lingkungan (eDNA) juga dapat meningkatkan sensitivitas dan efisiensi dalam mendeteksi perubahan komunitas gastropoda akibat aktivitas pertambangan nikel. Studi longitudinal yang memantau perubahan komunitas gastropoda sebelum, selama dan setelah kegiatan pertambangan nikel dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang dampak jangka panjang dan potensi pemulihan ekosistem.

Selain itu, rekomendasi teknis dari dampak yang ditimbulkan oleh aktivitas pertambangan nikel merujuk pada hasil penelitian ini diantaranya yaitu (1) pengembangan *natural berier* berbasis vegetasi melalui penanaman atau rehabilitasi vegetasi mangrove dan vegetasi-vegetasi penunjang di area muara berdasarkan karakteristik zonasi ekosistem mangrove serta reboisasi atau penghijauan kembali vegetasi riparian di sepanjang aliran sungai menuju muara untuk memperkokoh area bantaran dan mengembalikan optimalitas integritas ekologi di area sungai (2) pengembangan teknologi filtrasi atau media saringan/filter yang memiliki ukuran pori-pori lebih kecil dari partikel tersuspensi yang mampu menangkap sedimen, di mana penempatannya mengikuti kontur/morfologi sungai yang berfungsi sebagai *trapping berier* atau penjebak sedimen, pengaturan prototipe peralatan filtrasi ini diletakkan pada instalasi *water treatment* di area hulu, sehingga air yang mengalir menuju hilir dan muara bebas dari material-material tersuspensi yang berasal dari limbah *overburden*. Pengembangan teknologi ini secara efisien mampu mencegah fenomena sedimentasi di wilayah

pesisir secara menyeluruh. Rekomendasi ketiga yang dapat disarankan untuk dilakukan oleh perusahaan pertambangan nikel adalah implementasi sistem pemantauan dan evaluasi berkelanjutan terhadap kualitas air dan sedimen di sepanjang aliran sungai hingga muara. Sistem ini dapat melibatkan penggunaan teknologi sensor *real-time* dan analisis data berkala untuk mendeteksi perubahan parameter lingkungan secara cepat dan akurat. Dengan pemantauan yang ketat, perusahaan dapat mengambil tindakan preventif dan korektif secara tepat waktu, sehingga meminimalkan dampak negatif aktivitas pertambangan terhadap ekosistem perairan dan pesisir.



**Gambar 8.** Perbedaan rona lingkungan di situs rujukan dan area dampak (substrat berwarna orange-kemerahan) (Purnama, 2024)

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penilaian beberapa metrik biologi dan kualitas fisika-kimia perairan di area dampak (*impact site*) dapat disimpulkan bahwa aktivitas pertambangan nikel di Kecamatan Pomalaa, Sulawesi Tenggara memiliki dampak signifikan dalam mendegradasi kualitas lingkungan (kesehatan ekosistem) perairan di area dampak (*impact site*), sehingga pentingnya pengelolaan lingkungan yang lebih ketat di area dampak pertambangan dan di sekitarnya, serta kebutuhan untuk melakukan pemantauan berkelanjutan terhadap kualitas ekosistem perairan di wilayah tersebut.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada “Tim teknis lapangan” sdr. Muh. Bima Sakti RA., S.T., Irmalasandri Putri, S.T., M.PWK., dan Virzikrillah yang telah membantu dalam pengambilan data-data dan dokumentasi penelitian di lokasi riset, dari awal hingga akhir penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Allaoui, T., Sufa, N. A., Lemnaouar, A., Verlet, J., Priya, B. K., & Abadias, M. (2022). Bioindicator potential of annelids for evaluating heavy metal pollution: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(47), 71383–71397.
- Arbi, U. Y. (2014). *Taksonomi dan Filogeni Keong Famili Potamididae (Gastropoda: Mollusca) di Indonesia Berdasarkan Karakter Morfologi*.

- Bae Jum, H., Uspensky, I., Sadkipova, L., Perkal, V., Wang, Z., Adatian, S., Pradeep, H., Starschnell, K., De Spiegeleer, B., & Shramko, V. (2021). *Social impact of transitional mineral exploration and mining implication (Case study, RWANDA)*.
- Bengen, D. G. (2003). *Pedoman teknis: Pengenalan dan pengelolaan ekosistem mangrove*. PKSPLIPB. Bogor.
- Campoy-Diaz, A. D., Malanga, G., Giraud-Billoud, M., & Vega, I.A. (2023). Changes in the oxidative status and damage by non-essential elements in the digestive gland of the gastropod *Pomacea canaliculata*. *Frontiers in Physiology*, 14, 1123977.
- Cappenberg, H. A. W., Aziz, A., dan Aswandy, I. (2006). Komunitas Moluska di Perairan Teluk Gilimanuk, Bali Barat. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 40(1): 53-64.
- Chakrabarty, D., Das. S. K. (2006). Alteration of Macroinvertebrate Community in Tropical Lentic Systems in Context of Sediment Redox Potential and Organic Pollution. *Biological Rhythm Research*. 37(3): 213-222.
- Chukaeva, M., Petrov, D. (2023). Assessment and analysis of metal bioaccumulation in freshwater gastropods of urban river habitats, Saint Petersburg (Russia). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 7162-7172. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21955-8>.
- Dharma, B. (1992). *Siput dan Kerang Indonesia II*. Jakarta: PT. Sarana Graha.
- Dharma, B. (1998). *Siput dan Kerang Indonesia I*. Jakarta: PT. Sarana Graha.
- Dharma, B. (2005). *Recent and Fossil Indonesian Shell*. Germany: Conchbook.
- Dolorosa, R. G. & Galon, F. (2014). Species Richness of Bivalves and Gastropods in Iwahing River-Estuary, Palawan, the Philippines. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 2(1): 207-215.
- Dziock, F., Henle, K., Foeckler, F., Follner, K., Scholz M. (2006). Biological Indicator Systems in Floodplains. a Review. *International Review of Hydrobiology*, 91 (4): 271-291. <https://doi.org/10.1002/iroh.200510885>.
- Erfina, E., Sjarmidi. (2019). Evaluasi Fungsi Ekosistem Di Pertambangan Nikel Kecamatan Pomala Sulawesi Tenggara. *Identifikasi*, 5(1), 19-26.
- Fitria, Y., Fitriani, M., Nugroho, R. Y., Putri, W. A. E. (2023). *Gastropods as bioindicators of heavy metal pollution in the Banyuasin estuary shrimp pond area, South Sumatra, Indonesia*. *Acta Ecologica Sinica*.
- Gitarama, A. M., Krisanti, M., Agungpriyono, D. R. (2016). Komunitas Makrozoobentos dan Akumulasi Kromium di Sungai Cimanuk Lama, Jawa Barat. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 21(1): 48-55.
- Hamzah, H. E., Riani, E., Saharuddin, N. S. I. (2015). Pollution load, assimilative capacity and quality status of coastal waters in Pomalaa nickel mining site of Southeast Sulawesi. *International Journal of Research*, 3(03), 2311-2484.
- Hamzah. (2009). *Studi kualitas air lokasi pertambangan nikel Pomalaa, Sulawesi Tenggara*. [Tesis]. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor. 270 hal.
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 201. (2004). *Kriteria Baku dan Pedoman Penentuan Kerusakan Mangrove*. Jakarta-Indonesia: Menteri Negara Lingkungan Hidup.
- Ludwig, J. A., Reynolds, J. F. (1988). *Statistical ecology: a primer in methods and computing (Vol. 1)*. John Wiley & Sons.
- Menon, M., Mohanraj, R., Joemon, V. B., Rv, A. P. (2023). Bioaccumulation of heavy metals in a gastropod species at the Kole wetland agroecosystem, a Ramsar site. *Journal of Environmental Management*, 329, 117027.
- MolluscaBase. (2023). <https://www.molluscabase.org/>. Diakses pada tanggal 21 Juli 2024.
- Mukhtorova, D., Hlava, J., Száková, J., Najmanová, J., Tlustoš, P. (2023). Can mollusks or insects serve as bioindicators of the risk element polluted area? Gastropods (Gastropoda) versus leaf beetles (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
- Norris, R. H., Thoms, M. C. (1999). What Is River Health?. *Freshwater Biology* 41: 197-209. DOI:10.1046/J.1365-2427.1999.00425.X.
- Odum, E. P. (1993). *Dasar-Dasar Ekologi*. Gramedia. Jakarta. 697 hlm.
- Pramudji. (2001). Ekosistem Hutan Mangrove dan Perannya sebagai Habitat Berbagai Fauna Aquatik. *Oseana* 26 (4): 13-23.
- Purnama, M. F., Prayitno, S. B., Muskananfolo, M. R., & Suryanti, S. (2024a). Tropical gastropod density and diversity in the mangrove forest of Totobo Village, Southeast Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas*, 25(4).
- Purnama, M. F., Prayitno, S. B., Muskananfolo, M. R., & Suryanti, S. (2024b). Red berry snail *Sphaerassiminea miniata* and its potential as a bioindicator of environmental health in mangrove ecosystem of Pomalaa, Kolaka District, Indonesia. *Biodiversitas*, 24(6).
- Ruppert, E., Fox, R., & Barnes, R. (2004). *Invertebrate Zoology. A Functional Evolutionary Approach*. Thompson Brooks\_Cole.
- Saleky, D., Anggraini, R., Merly, S. L., Ruzanna, A., Isma, M. F., Manan, J., & Syahrial, S. (2023). Gastropoda Mangrove *Terebralia palustris* di

- Pantai Payum Kabupaten Merauke Papua. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(1), 54-64.
- Singer, G. A., Battin, T. J. (2007). Anthropogenic Subsidies Alter Stream Consumer Resource Stoichiometry, Biodiversity, and Food Chains. *Ecological Applications* 17(2): 376-389. <https://doi.org/10.1890/06-0229>.
- Srihastuti, Riswan, Rapin, Fahriansyah, Abrar, & Sardyono. (2022). *SIBio measures the biotic index based on Chaetogaster sp. annelids in fisheries gills: Towards quality control of brackish seafood*. Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/boe.00673>.
- Strong, E. E., Gargominy, O., Ponder, W. F., & Bouchet, P. (2008). Global diversity of gastropods (Gastropoda; Mollusca) in freshwater. *Hydrobiologia*, 595(1), 149–166. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9012-6>.
- Timm H, Ivask M, Möls T. (2001). Response of Macroinvertebrates and Water Quality to Long-Term Decrease in Organic Pollution in Some Estonian Streams During 1990–1998. *Hydrobiologia* 464: 153–164. <https://doi.org/10.1023/A:1013999403209>.
- Wilhm, J. L. (1975) Biological Indicators of Pollution. In Whitton, B. A., Ed., *River Ecology*, Blackwell Scientific Publication, Oxford, 375-402.
- World register of marine species (worms). (2024). <https://www.marinespecies.org/>. Diakses pada tanggal 21 Juli 2024.
- Worldwide seashells collection. (2024). [http://www.idscaro.net/sci/01\\_coll/index.htm](http://www.idscaro.net/sci/01_coll/index.htm). Diakses pada tanggal 21 Juli 2024.
- Yadav, R., Malla, P. K., Dash, D., Bhoi, G., Patro, S., & Mohapatra, A. (2019). Diversity of gastropods and bivalves in the mangrove ecosystem of Paradeep, east coast of India: a comparative study with other Indian mangrove ecosystems. *Molluscan Research*, 39(4), 325-332. <https://doi.org/10.1080/09291010600689101>.
- Zubayr, S. A. (2009). *Analisis Status Pencemaran Logam Berat di Wilayah Pesisir (Studi Kasus Pembuangan Limbah Cair dan Tailing Padat/Slag Pertambangan Nikel Pomalaa)*. [Tesis]. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor. 127 Hal.
- Zvonareva, S., & Kantor, Y. (2016). Checklist of gastropod molluscs in mangroves of Khanh Hoa province, Vietnam. *Zootaxa*, 4162(3), 401-437.
- Zvonareva, S., Kantor, Y., Xinzheng, L., Britayev, T. (2015). Long-term monitoring gastropoda (Mollusca) fauna in planted mangroves in central Vietnam. *Zoological Studies*, 54:1–30. <https://doi.org/10.1186/s40555-015-0120-0>.