

## Population Structure of Mangrove Snails (*Terebralia sulcata*) Around the Nickel Mining Area of Pomalaa, Southeast Sulawesi

Muhammad Fajar Purnama<sup>1\*</sup>, Farid Yasidi<sup>1</sup>, Dedy Oetama<sup>1</sup>, Haslianti<sup>2</sup>, Salwiyah<sup>1</sup>, La Ode Abdul Rajab Nadia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Aquatic Resources Management, Faculty of Fisheries and Marine Science, Halu Oleo University, Kendari (93232), Indonesia;

<sup>2</sup>Aquatic Product Technology Department, Faculty of Fisheries and Marine Science, Halu Oleo University, Kendari (93232), Indonesia;

### Article History

Received : April 06<sup>th</sup>, 2026

Revised : April 20<sup>th</sup>, 2026

Accepted : May 29<sup>th</sup>, 2026

\*Corresponding Author:

**Muhammad Fajar Purnama**,  
Jurusan Manajemen Sumberdaya  
Perairan, Fakultas Perikanan dan  
Ilmu Kelautan, Universitas Halu  
Oleo, Kendari, Indonesia;

Email:

[muhammadfajarpurnama@uho.ac.id](mailto:muhammadfajarpurnama@uho.ac.id)

**Abstract:** Nickel mining in Pomalaa, Southeast Sulawesi, potentially alters mangrove ecological dynamics, specifically affecting benthic biota. This study analyzes the population structure of the mangrove snail (*Terebralia sulcata*) using purposive systematic sampling across reference, transition, and mining-impacted zones. Data were collected via transect quadrat methods (5x5 m<sup>2</sup>) during January 2024–January 2025. Water quality analysis indicated significant elevations in dissolved Ni and organic loads (COD/BOD) in impacted areas. Population structure revealed a unimodal distribution dominated by the 35–45 mm class, with limited juvenile recruitment in stressed sites. The length-weight relationship (LWR) exhibited a strong negative allometric pattern ( $b = 2.02$ ), indicating faster shell length growth as an adaptive response to environmental stressors. Despite a stable condition factor ( $Kn = 1.124$ ), spatial disparities were evident through a progressive decline in density and biomass toward impacted stations. This study provides a significant scientific contribution by establishing *T. sulcata* as a sensitive bioindicator for nickel pollution. The findings emphasize that mining-derived stressors negatively correlate with biological performance, highlighting the necessity for policy-driven bioindicator monitoring and the integration of benthic health assessments into coastal management protocols within nickel industrial zones to mitigate long-term ecological degradation.

**Keywords:** Bioindicator; Coastal Policy; Nickel Mining; Population Structure; *Terebralia sulcata*.

### Pendahuluan

Ekosistem mangrove di kawasan pesisir tropis memiliki fungsi ekologis dan ekonomi yang krusial, mulai dari siklus nutrisi hingga perlindungan garis pantai (Lee et al., 2014; Rizal et al., 2018; Duke et al., 2022). Namun, integritas ekosistem ini kian terancam oleh intensifikasi aktivitas antropogenik, terutama ekspansi industri pertambangan nikel di wilayah pesisir (Hamzah et al., 2015; Purnama et al., 2024). Di wilayah Pomalaa, Sulawesi Tenggara, aktivitas pertambangan telah memicu perubahan signifikan pada kualitas perairan yang ditandai

dengan peningkatan beban sedimen serta fluktuasi parameter fisika-kimia air (Ilham et al., 2017; Efrianto et al., 2026). Transformasi kualitas air ini mencakup peningkatan *Total Suspended Solids* (TSS), kekeruhan (*turbidity*), dan konsentrasi logam berat nikel (Ni) yang secara kolektif menciptakan tekanan ekologis berat bagi biota akuatik, khususnya gastropoda benthik yang memiliki ketergantungan tinggi pada substrat mangrove (Purnama et al., 2025b; Efrianto et al., 2024).

Sebagai organisme benthik dengan mobilitas rendah, keong bakau (*Terebralia sulcata*) berperan penting sebagai detritivor yang

memfasilitasi transfer energi dalam jaring-jaring makanan (Menon et al., 2023; Hamli et al., 2021). Karakteristik biologisnya yang menetap menjadikan spesies ini sebagai bioindikator ideal untuk mengevaluasi dampak polutan kronis di wilayah pesisir (Zhou et al., 2008; Hamli et al., 2021). Respons terhadap degradasi habitat tersebut tidak hanya terlihat pada penurunan kepadatan, tetapi juga termanifestasi pada perubahan struktur populasi yang mencakup distribusi ukuran dan performa biologis individu (Purnama et al., 2025a; Khotimah et al., 2025). Oleh karena itu, pemahaman mengenai bagaimana populasi ini bertahan di bawah tekanan polutan menjadi kunci dalam menilai kesehatan ekosistem secara menyeluruh.

Untuk mengevaluasi kesehatan populasi tersebut secara kuantitatif, analisis hubungan panjang-bobot (*Length-Weight Relationship/ LWR*) dan faktor kondisi relatif ( $K_n$ ) menjadi instrumen penting. Parameter ini memberikan wawasan mendalam mengenai efisiensi pemanfaatan sumber daya dan kesejahteraan fisiologis biota di lingkungan yang tertekan (Froese, 2006; Blackwell et al., 2000). Stresor lingkungan akibat aktivitas tambang seringkali memicu pergeseran pola pertumbuhan dari isometrik menjadi alometrik, yang mencerminkan adanya hambatan pada akumulasi massa tubuh dibandingkan pertumbuhan linier (Yee-Duarte et al., 2024).

Meskipun dampak teknis pertambangan terhadap kualitas air telah banyak didokumentasikan, terdapat celah penelitian (*research gap*) mengenai mekanisme adaptasi biologis spesifik *T. sulcata* dalam merespons polusi nikel di Sulawesi Tenggara. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi analisis struktur populasi multidimensi yang membandingkan gradien dampak pertambangan secara spasial, guna mengungkap sejauh mana polutan nikel menginterupsi siklus hidup dan kondisi fisiologis gastropoda mangrove.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif struktur populasi *T. sulcata* di kawasan pertambangan nikel Pomalaa dengan membandingkan kondisi di zona referensi, transisi, dan terdampak. Fokus utama studi ini mencakup evaluasi distribusi frekuensi ukuran, penentuan pola pertumbuhan melalui model LWR, serta penilaian status kesehatan populasi melalui faktor kondisi. Hasil

penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi otoritas terkait dalam menyusun protokol mitigasi dampak lingkungan dan strategi pengelolaan ekosistem pesisir yang berkelanjutan di wilayah industri nikel (Purnama et al., 2024; Alongi, 2020).

## Bahan dan Metode

### Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain observasional analitik dengan pendekatan *spatial-comparative*. Desain ini dipilih untuk membandingkan parameter biologis populasi pada gradien lingkungan yang berbeda (referensi vs terdampak). Justifikasi pemilihan desain ini didasarkan pada kebutuhan untuk mengevaluasi dampak *non-experimental* dari polutan tambang nikel terhadap biota bentik secara *in-situ* di ekosistem mangrove (Purnama et al., 2024).

### Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama periode Januari 2024–Januari 2025 di kawasan pesisir Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara. Penentuan stasiun pengamatan dilakukan dengan metode *purposive sampling* yang membagi wilayah studi menjadi tiga zona ekologis utama:

1. Stasiun Referensi (S1 & S2): Area mangrove yang relatif tidak terganggu oleh aktivitas industri.
2. Stasiun Transisi (S3): Area yang berada di antara zona referensi dan zona terdampak.
3. Stasiun Terdampak (S4 & S5): Area yang berbatasan langsung dengan aktivitas pertambangan nikel.

### Alat dan Bahan

Penyediaan perangkat penelitian dikategorikan untuk menjamin standarisasi pengukuran:

- Alat Pengukuran Biota: Jangka sorong digital (ketelitian 0,01 mm) untuk panjang cangkang (L) dan timbangan analitik digital (ketelitian 0,01 g) untuk bobot tubuh (W).
- Alat Sampling & Lingkungan: Kuadrat transek (5x5 m<sup>2</sup>), GPS Garmin untuk penentuan koordinat, *Turbidimeter*, dan *Water Quality Checker* untuk parameter fisik.

- Bahan: Sampel *T. sulcata*, air laut, dan bahan kimia untuk analisis laboratorium (Ni, COD, BOD).

### Populasi dan Sampel

Populasi target adalah seluruh individu keong bakau (*Terebralia sulcata*) yang ditemukan di zona intertidal mangrove Pomalaa. Kriteria pemilihan sampel dilakukan secara inklusif (seluruh ukuran) untuk mendapatkan struktur populasi yang representatif. Jumlah unit pengamatan terdiri dari 15 unit (5 stasiun × 3 plot replikasi). Total sampel yang dikumpulkan secara keseluruhan adalah  $n$  individu (1150 individu) untuk menjamin kekuatan uji statistik.

### Prosedur Pengumpulan Data dan Teknik Sampling

Data biologis *T. sulcata* dikumpulkan menggunakan metode transek kuadrat (English *et al.*, 1997). Pada setiap stasiun, ditarik garis transek tegak lurus garis pantai sepanjang zona mangrove. Teknik sampling menggunakan stratified systematic sampling dengan menempatkan 3 plot kuadrat (5x5 m<sup>2</sup>) pada area *mid-intertidal* untuk mewakili zonasi mangrove. Seluruh spesimen di dalam plot diambil menggunakan teknik handpicking. Spesimen diukur panjang totalnya (Total Length, L) menggunakan jangka sorong (ketelitian 0.1 mm) dan bobot tubuhnya (Total Weight, W) menggunakan timbangan digital (ketelitian 0.01 g) (Budiman, 1988). Pengukuran dilakukan secara teliti untuk meminimalkan sampling error.

### Parameter Kualitas Perairan

Parameter fisika-kimia air kunci diukur secara *in-situ* dan *ex-situ*. Data kualitas air yang dianalisis meliputi:

- Parameter fisik: Kekeruhan (*Turbidity*), dan *Total Suspended Solids* (TSS).
- Parameter kimia: *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan konsentrasi logam berat nikel (Ni Air). Data kualitas air kemudian dinormalisasi terhadap nilai maksimum untuk divisualisasikan dalam bentuk *spider chart* guna membandingkan karakteristik antar stasiun.

### Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif menggunakan beberapa pendekatan

statistik:

#### *Distribusi Frekuensi Ukuran*

Menganalisis struktur populasi berdasarkan panjang cangkang (L). Penentuan jumlah kelas interval menggunakan **Aturan Sturges**:

$$k = 1 + 3.3 \log n$$

Di mana  $k$  adalah jumlah kelas dan  $n$  adalah jumlah sampel. Histogram disusun untuk mengidentifikasi kelompok umur (kohort) dan mendeteksi pergeseran struktur ukuran akibat tekanan lingkungan.

#### *Hubungan Panjang-Bobot (LWR)*

Dianalisis menggunakan persamaan alometrik non-linier:

$$W = aL^b$$

Dimana W adalah bobot (g), L adalah panjang (mm), a adalah konstanta, dan b adalah eksponen pertumbuhan. Untuk linearisasi dan estimasi parameter, data ditransformasi ke dalam bentuk logaritma natural (ln):

$$\ln W = \ln a + \ln b L$$

Uji-t (*One-sample t-test*) digunakan untuk menguji apakah nilai b berbeda nyata dari 3 (Isometrik), serta Analisis Varian (ANOVA) satu arah untuk melihat perbedaan signifikan kepadatan dan ukuran antar stasiun ( $p < 0,05$ ):

- a) Isometrik ( $b = 3$ ): Pertambahan panjang seimbang dengan pertambahan bobot.
- b) Alometrik Positif ( $b > 3$ ): Pertambahan bobot lebih dominan (biota lebih "gemuk").
- c) Alometrik Negatif ( $b < 3$ ): Pertambahan panjang lebih dominan (biota lebih "kurus").

#### *Faktor Kondisi Relatif (Kn)*

Kesejahteraan fisiologis dan status kesehatan populasi di lingkungan terdampak tambang dinilai menggunakan Faktor Kondisi Relatif (Kn). Parameter ini sangat sensitif terhadap perubahan ketersediaan makanan dan polutan lingkungan. Rumus yang digunakan adalah:

$$Kn = \frac{W}{\hat{W}}$$

Di mana  $W$  adalah bobot pengamatan lapangan dan  $\hat{W}$  adalah bobot prediksi yang Analisis data diperoleh dari model LWR. Nilai  $Kn > 1$  mengindikasikan kondisi tubuh yang lebih baik dari rata-rata populasi, sedangkan  $Kn < 1$  mengindikasikan adanya tekanan lingkungan atau defisiensi nutrisi.

#### Kepadatan Individu

Kepadatan individu ( $D$ ) dihitung sebagai jumlah individu per satuan luas ( $\text{ind}/\text{m}^2$ ) pada setiap stasiun pengamatan untuk mengevaluasi kelimpahan populasi *T. sulcata* di area yang terpapar aktivitas pertambangan.

$$D = \frac{ni}{A}$$

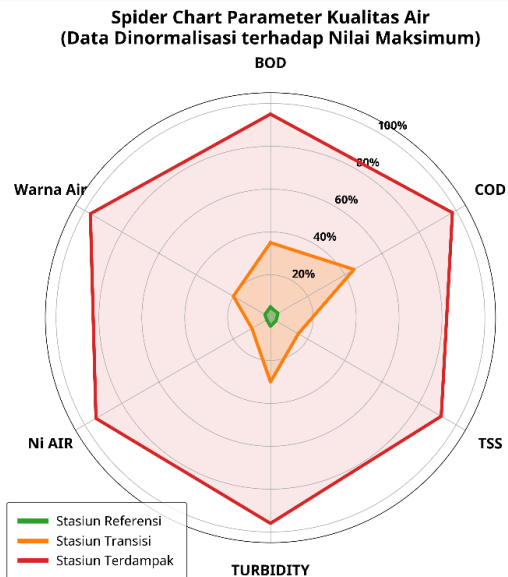
Di mana  $ni$  adalah jumlah total individu yang ditemukan dan  $A$  adalah luas total area sampling ( $\text{m}^2$ ).

## Hasil dan Pembahasan

### Hasil Penelitian

#### Profil Kualitas Perairan pada Gradien Lokasi Pertambangan

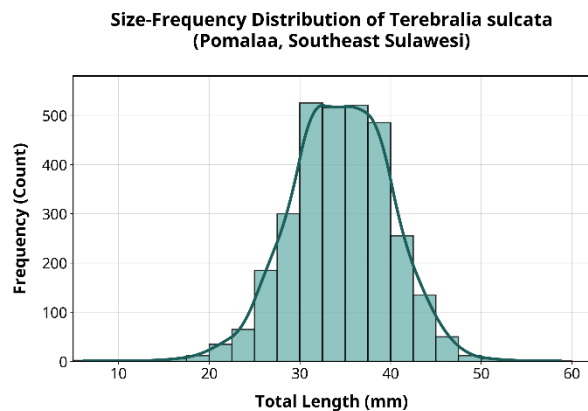
Karakteristik lingkungan perairan di lokasi penelitian dianalisis untuk menentukan sejauh mana aktivitas pertambangan memengaruhi parameter fisika-kimia habitat *T. sulcata*. Data yang diperoleh dinormalisasi terhadap nilai maksimum untuk memberikan gambaran komparatif antar stasiun pengamatan (Gambar 1). Berdasarkan *spider chart* tersebut, terlihat adanya anomali yang signifikan pada Stasiun Terdampak dibandingkan dengan Stasiun Referensi dan Transisi. Parameter kritis seperti konsentrasi Ni (Nikel) di air, *Turbidity* (kekeruhan), dan TSS menunjukkan nilai normalisasi yang mencapai 100% di area terdampak, yang mengindikasikan tekanan lingkungan akibat limbah pertambangan. Tingginya nilai BOD dan COD di lokasi ini juga mencerminkan penurunan kualitas air yang dapat membebani metabolisme biota bentik secara kronis.



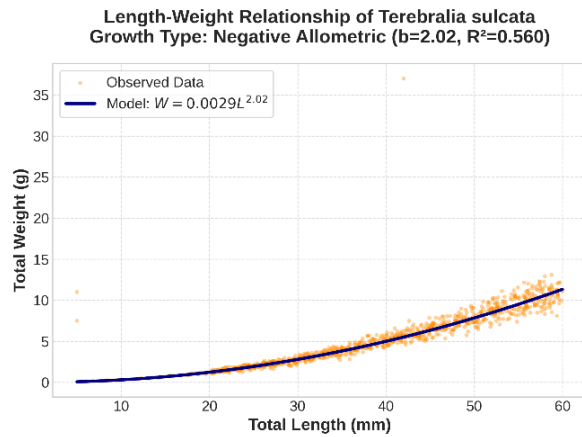
Gambar 1. *Spider chart* Parameter Kualitas Perairan di Lokasi Penelitian

### Struktur Ukuran dan Distribusi Frekuensi Populasi

Struktur ukuran populasi merupakan indikator penting dalam memahami dinamika rekrutmen dan keberlangsungan hidup suatu spesies di habitatnya. Distribusi panjang total (mm) dari seluruh sampel *T. sulcata* disajikan dalam histogram frekuensi berikut.



Gambar 2. Distribusi Frekuensi Ukuran: Histogram yang menunjukkan distribusi unimodal dengan dominasi pada rentang ukuran 35–45 mm.



**Gambar 3.** Hubungan Panjang-Bobot: Plot regresi yang menunjukkan pola pertumbuhan alometrik negatif ( $b = 2.02$ ); hal ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan panjang lebih cepat dibandingkan pertumbuhan bobot, yang kemungkinan disebabkan oleh stres lingkungan di area pertambangan

Persamaan regresi yang dihasilkan adalah  $W = 0.0029L^{2.02}$  dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0.560. Nilai eksponen  $b = 2.02$  menunjukkan bahwa populasi ini mengikuti pola pertumbuhan alometrik negatif secara signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan panjang total berlangsung lebih cepat dibandingkan dengan penambahan bobot tubuh, yang kemungkinan besar merupakan respons fisiologis terhadap stres lingkungan di area pertambangan nikel. Untuk melihat stabilitas ukuran populasi sepanjang waktu, dilakukan perbandingan distribusi panjang total berdasarkan periode pengambilan sampel dari tahun 2024 hingga 2025.

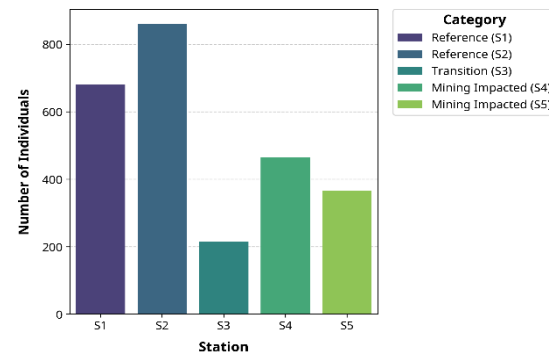
Hasil analisis menunjukkan bahwa populasi *T. sulcata* di wilayah Pomalaa memiliki bentuk distribusi unimodal dengan puncak frekuensi yang sangat jelas. Struktur populasi didominasi oleh individu dalam rentang ukuran 35–45 mm, yang dikategorikan sebagai kelompok dewasa. Terbatasnya jumlah individu berukuran kecil (<25 mm) mengindikasikan adanya potensi hambatan dalam proses rekrutmen atau tingkat mortalitas yang lebih tinggi pada fase juvenil akibat kondisi lingkungan yang kurang optimal.

### Analisis Biometrik Spasial dan Kepadatan Individu

Data kepadatan relatif menunjukkan variasi yang mencolok antar stasiun, di mana

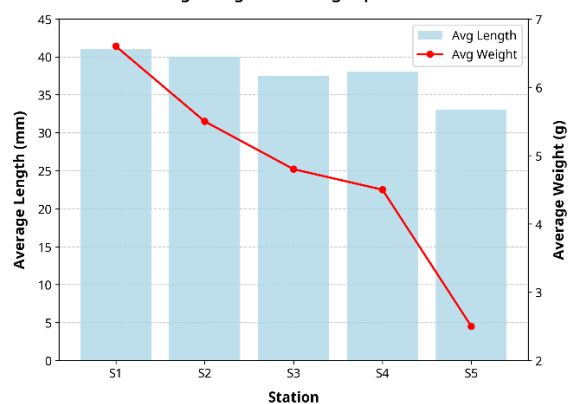
Stasiun Referensi S2 memiliki jumlah individu tertinggi (>800 individu), diikuti oleh S1. Sebaliknya, terjadi penurunan kepadatan yang drastis pada Stasiun Transisi (S3) yang mencatat jumlah individu terendah di seluruh lokasi penelitian. Meskipun jumlah individu di Stasiun Terdampak (S4 dan S5) sedikit lebih tinggi dibandingkan stasiun transisi, nilainya tetap berada jauh di bawah kapasitas populasi pada stasiun referensi, yang mengindikasikan bahwa area yang terpapar limbah tambang mengalami penurunan daya dukung habitat bagi spesies ini. Selain kepadatan, dimensi fisik berupa rata-rata panjang total dan berat tubuh di setiap stasiun dievaluasi untuk melihat korelasi antara posisi geografis stasiun dengan performa pertumbuhan individu.

Relative Density (Count) of *Terebralia sulcata* per Station



**Gambar 4.** Perbandingan Kepadatan Relatif (Jumlah Individu) *T. sulcata* per Stasiun

Average Length and Weight per Station



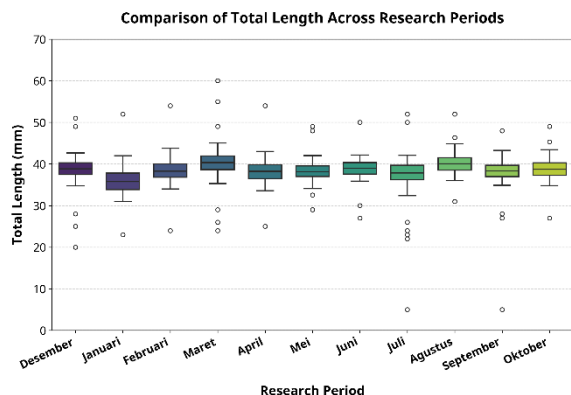
**Gambar 5.** Profil Rata-rata Panjang (mm) dan Berat (g) *T. sulcata* per Stasiun

Hasil analisis biometrik mengungkapkan tren penurunan linier yang sangat jelas dari arah stasiun referensi menuju stasiun terdampak. Rata-rata panjang total tertinggi ditemukan di

Stasiun S1 (>40 mm) dan secara progresif menurun hingga mencapai titik terendah di Stasiun S5. Pola yang lebih ekstrem terlihat pada parameter rata-rata berat (garis merah), di mana terjadi penurunan tajam dari S1 menuju S5, dengan berat rata-rata di stasiun terdampak akhir (S5) hanya berkisar pada 2.5 g. Penurunan signifikan pada panjang dan berat di area yang terpapar aktivitas tambang ini membuktikan adanya hambatan pertumbuhan somatik yang nyata akibat stresor lingkungan di kawasan tersebut.

### Hubungan Panjang-Bobot (LWR) dan Faktor Kondisi ( $K_n$ )

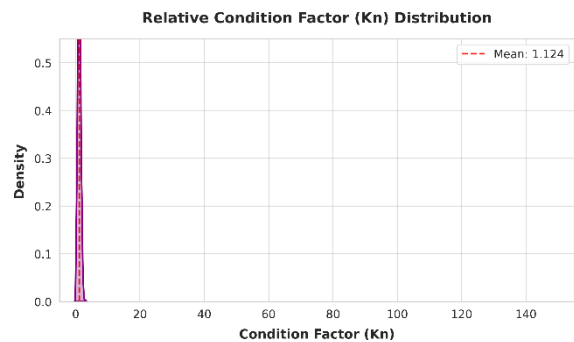
Analisis hubungan panjang-bobot (LWR) digunakan untuk mengevaluasi pola pertumbuhan dan estimasi berat relatif biota berdasarkan panjang total cangkang. Model regresi non-linier diterapkan untuk menentukan nilai parameter pertumbuhan (b).



**Gambar 6.** Perbandingan Musiman: *Boxplot* yang membandingkan distribusi ukuran di berbagai periode penelitian (2024–2025)

Visualisasi melalui *boxplot* menunjukkan bahwa rata-rata ukuran populasi cenderung stabil secara temporal, namun terdapat variasi rentang ukuran (interkuartil) pada bulan-bulan tertentu. Meskipun terdapat fluktuasi, dominasi ukuran tetap konsisten pada kelas menengah-dewasa, yang mempertegas bahwa tekanan lingkungan bersifat konstan sepanjang tahun di lokasi penelitian. Untuk mengevaluasi tingkat kesejahteraan fisiologis populasi *T. sulcata* secara keseluruhan di lokasi penelitian, dilakukan analisis faktor kondisi relatif ( $K_n$ ). Sebaran nilai  $K_n$  di seluruh populasi divisualisasikan menggunakan *density plot* untuk

melihat konsentrasi kesehatan individu dibandingkan dengan bobot prediksi idealnya.



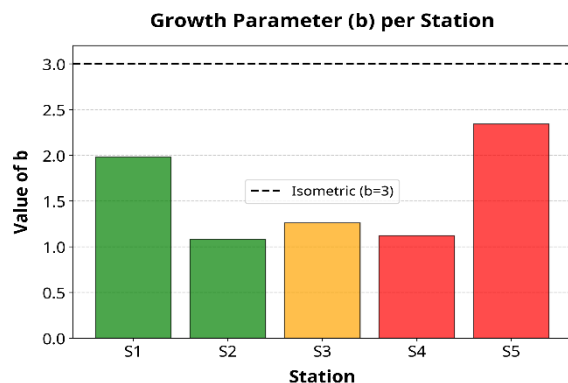
**Gambar 7.** Faktor Kondisi ( $K_n$ ): *Density plot* yang menunjukkan kondisi fisiologis secara keseluruhan dari populasi yang diteliti

Visualisasi melalui *density plot* menunjukkan bahwa nilai faktor kondisi ( $K_n$ ) populasi terkonsentrasi sangat rapat di sekitar nilai rata-rata 1.124. Fakta bahwa rata-rata nilai  $K_n$  berada di atas 1.0 mengindikasikan bahwa secara umum, individu *T. sulcata* di kawasan Pomalaa masih memiliki kondisi fisiologis yang baik atau "gemuk" dibandingkan dengan rata-rata berat populasi standar. Hal ini menunjukkan adanya daya adaptasi atau ketersediaan sumber daya makanan (detritus) yang masih mencukupi untuk mendukung metabolisme dasar meskipun berada di bawah tekanan polutan pertambangan. Distribusi spasial populasi *T. sulcata* dianalisis untuk memahami bagaimana gradien tekanan lingkungan dari aktivitas pertambangan memengaruhi kelimpahan individu di setiap lokasi pengamatan.

Dinamika pola pertumbuhan alometrik yang ditemukan pada tingkat populasi dianalisis lebih lanjut secara spasial. Perbandingan nilai parameter pertumbuhan (b) di setiap stasiun pengamatan disajikan untuk mengidentifikasi tingkat stres lingkungan yang berbeda di sepanjang gradien wilayah pertambangan.

Stasiun Referensi (S1) menunjukkan nilai b tertinggi (mendekati 2.0), sedangkan nilai terendah teramati pada stasiun yang mendekati area terdampak (S2 dan S4). Menariknya, pada Stasiun S5, terjadi sedikit peningkatan nilai b dibandingkan S4, namun tetap mencerminkan ketidakseimbangan antara penambahan bobot dan panjang. Variasi nilai b antar stasiun ini mengonfirmasi bahwa gradien kualitas air, terutama peningkatan kadar nikel dan

sedimentasi, secara langsung memengaruhi efisiensi pertumbuhan somatik biota di masing-masing lokasi. Berdasarkan perbandingan antar stasiun, seluruh lokasi penelitian menunjukkan nilai  $b$  yang berada secara signifikan di bawah garis isometrik ( $b < 3$ ), yang mempertegas dominasi pertumbuhan alometrik negatif di seluruh area.



**Gambar 8.** Distribusi Nilai Parameter Pertumbuhan ( $b$ ) *T. sulcata* per Stasiun

## Pembahasan

### Dampak Sedimentasi dan Polusi Nikel terhadap Kualitas Habitat

Tingginya parameter TSS, kekeruhan, dan konsentrasi nikel di Stasiun S4 dan S5 merupakan konsekuensi langsung dari aktivitas pembukaan lahan (land clearing) dan pembuangan overburden di wilayah hulu pertambangan Pomalaa. Material sedimen yang terbawa melalui limpasan permukaan (*run-off*) saat intensitas hujan tinggi tidak hanya menurunkan kualitas kolom air, tetapi juga mengubah komposisi fisik substrat mangrove secara permanen. Hal ini menciptakan lingkungan intertidal yang tidak stabil bagi biota bentik yang bergantung pada stabilitas sedimen.

Secara fisik, akumulasi sedimen halus yang berlebihan dapat menutupi pori-pori substrat, sehingga mengganggu pertukaran oksigen di lapisan permukaan sedimen. Menurut Efrianto et al. (2026), beban sedimentasi di pesisir Pomalaa secara langsung berkaitan dengan peningkatan kekeruhan yang membatasi penetrasi cahaya. Kondisi ini menekan produktivitas primer mikroalga dan produsen lain di dasar perairan, yang secara tidak langsung mengurangi ketersediaan nutrisi bagi gastropoda

pemakan detritus seperti *T. sulcata*.

Dari aspek kimiawi, keberadaan logam berat nikel (Ni) dalam konsentrasi tinggi menciptakan stresor toksik bagi biota. Peningkatan nikel terlarut dan terikat sedimen berpotensi mengganggu integritas ekologis komunitas gastropoda melalui mekanisme bioakumulasi (Musrin et al., 2025). Pambudi (2025) menyatakan bahwa beban pencemaran di wilayah pesisir Sulawesi Tenggara telah melampaui kapasitas asimilasi alamnya, yang memicu degradasi kesehatan organisme bentik secara kronis. Kondisi ini diperparah oleh nilai BOD dan COD yang tinggi, yang mencerminkan penurunan kadar oksigen terlarut akibat beban organik yang besar. Tekanan simultan antara polusi logam berat dan kondisi hipoksia memaksa biota untuk melakukan kompensasi fisiologis yang berat. Sebagaimana dijelaskan oleh Purnama et al. (2024), stresor lingkungan yang kompleks di kawasan industri nikel secara kolektif menekan kemampuan adaptasi biota intertidal, yang pada akhirnya memengaruhi distribusi spasial populasi.

Selain itu, transformasi kualitas habitat ini merusak fungsi mangrove sebagai "buffer" atau penyaring alami (Alongi, 2008). Sedimentasi yang menimbun pneumatofor mangrove dapat menyebabkan kematian pohon, yang pada gilirannya mengurangi input serasah ke substrat. Karena *T. sulcata* adalah detritivor, hilangnya sumber pakan alami ini memperburuk kondisi populasi di zona terdampak, menciptakan habitat yang marginal bagi keberlangsungan hidup biota tersebut dalam jangka panjang.

### Interupsi Siklus Hidup dan Fenomena Kegagalan Rekrutmen

Dominasi individu dewasa (35–45 mm) dan kelangkaan juvenil di area terdampak merupakan indikator kuat adanya interupsi pada siklus hidup populasi. Struktur populasi yang timpang ini menunjukkan bahwa rekrutmen individu baru tidak berjalan dengan baik. Fenomena ini mengindikasikan bahwa zona terdampak nikel saat ini hanya mampu mendukung kelangsungan hidup individu dewasa yang memiliki toleransi lebih tinggi, namun gagal mendukung fase perkembangan awal yang kritis.

Kegagalan rekrutmen ini kemungkinan besar terjadi pada fase larva dan juvenil.

Sebagaimana dilaporkan oleh Sefali et al. (2026), fase awal perkembangan ikan dan invertebrata jauh lebih sensitif terhadap paparan logam berat dibandingkan fase dewasa. Logam berat seperti nikel dapat menghambat pembentukan cangkang awal pada larva gastropoda (veliger), yang mengakibatkan tingkat mortalitas yang sangat tinggi sebelum larva sempat melakukan penempelan (*settlement*) pada substrat mangrove.

Selain faktor toksisitas, sedimentasi berat di stasiun terdampak dapat menimbun telur gastropoda yang diletakkan pada substrat atau akar mangrove. Kondisi substrat yang tertutup lumpur halus mengurangi area penempelan yang sesuai bagi larva. Purnama et al. (2024) menegaskan bahwa perubahan fisik habitat akibat aktivitas tambang di Pomalaa secara drastis menghambat kemampuan rekrutmen alami gastropoda, yang mengarah pada ancaman kepunahan lokal di masa depan.

Secara demografis, kondisi ini menciptakan fenomena "populasi menua" (*aging population*). Tanpa adanya penambahan individu muda (juvenil), populasi *T. sulcata* di zona terdampak akan mengalami penurunan kelimpahan secara bertahap seiring dengan matinya individu dewasa secara alami. Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan di sekitar industri nikel saat ini berada dalam kondisi "stagnasi ekologis," di mana keberlanjutan regenerasi spesies terhenti akibat tekanan polutan yang konstan. Hilangnya kelompok juvenil juga berdampak pada dinamika jaring makanan di ekosistem mangrove. Juvenil *T. sulcata* biasanya merupakan sumber mangsa penting bagi predator tingkat menengah seperti kepiting dan burung pesisir. Interupsi pada ketersediaan individu muda ini dapat memicu efek domino (cascading effect) yang mengganggu stabilitas ekosistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, rendahnya kepadatan rekrutmen adalah alarm ekologis yang serius bagi kesehatan pesisir Pomalaa.

### **Biomekanisme Pertumbuhan: Alokasi Energi dan Strategi Adaptasi**

Temuan pola pertumbuhan alometrik negatif yang kuat ( $b = 2.02$ ) memberikan gambaran mengenai strategi biologis *T. sulcata* dalam merespons lingkungan yang tertekan. Nilai  $b$  yang jauh di bawah angka isometrik ( $b = 3$ ) menunjukkan bahwa penambahan berat tubuh

tidak mampu mengimbangi pertambahan panjang cangkang. Secara visual, individu di area ini terlihat memiliki cangkang yang memanjang namun dengan massa jaringan lunak yang relatif sedikit atau "kurus."

Pola pertumbuhan ini mencerminkan mekanisme alokasi energi metabolik yang defensif. Di lingkungan yang terkontaminasi logam berat, organisme harus menghabiskan sebagian besar energi metaboliknya untuk proses detoksifikasi, perbaikan seluler, dan pemeliharaan homeostasis. Menurut Froese & Pauly (2025), perubahan nilai eksponen pertumbuhan ( $b$ ) merupakan indikator kuat adanya hambatan dalam akumulasi massa somatik akibat keterbatasan nutrisi atau paparan polutan lingkungan. Perbandingan dengan penelitian Samsi & Rusmidin (2024) di Pulau Pannikiang, yang menunjukkan nilai  $b$  mendekati kondisi isometrik (2.80), membuktikan bahwa deviasi pertumbuhan di Pomalaa disebabkan oleh faktor eksternal industri. Biota di zona terdampak nikel cenderung memprioritaskan energi untuk pertumbuhan struktur pelindung (cangkang) guna meminimalkan kontak jaringan dengan polutan, meskipun harus mengorbankan pertumbuhan massa otot dan organ dalam.

Lebih lanjut, keberadaan logam nikel dapat mengganggu enzim pencernaan gastropoda, sehingga menurunkan efisiensi penyerapan nutrisi dari detritus yang dikonsumsi. Meskipun sumber makanan tersedia, interferensi logam berat pada sistem metabolisme menghambat konversi nutrisi menjadi massa tubuh. Sebagaimana dijelaskan oleh Musrin et al. (2025), akumulasi logam pada jaringan lunak gastropoda seringkali berkorelasi dengan penurunan performa pertumbuhan secara keseluruhan. Stres fisiologis ini juga berkaitan dengan pengeluaran mukus yang berlebihan sebagai bentuk pertahanan diri terhadap sedimentasi dan logam berat. Produksi mukus yang tinggi membutuhkan energi yang besar, yang seharusnya dialokasikan untuk pertumbuhan berat tubuh. Hasilnya, biota tumbuh dengan proporsi tubuh yang tidak seimbang, mempertegas status *T. sulcata* sebagai bioindikator yang sangat responsif terhadap gradien kualitas lingkungan di kawasan pertambangan nikel.

## Resiliensi Fisiologis, Faktor Kondisi, dan Gejala Stunting

Nilai rata-rata faktor kondisi relatif ( $K_n$ ) sebesar 1.124 mengindikasikan bahwa meskipun populasi tumbuh secara alometrik negatif, individu yang berhasil bertahan hidup secara umum masih memiliki kondisi fisik yang relatif stabil. Hal ini menunjukkan resiliensi fisiologis yang tinggi dari spesies ini. Ketersediaan bahan organik dan detritus di hutan mangrove Pomalaa kemungkinan masih mencukupi untuk mendukung metabolisme dasar individu yang bertahan (Fratini et al., 2004).

Namun, jika dilihat secara spasial pada Gambar 7, terjadi penurunan progresif pada rata-rata berat individu dari stasiun referensi menuju stasiun terdampak (S5). Meskipun nilai  $K_n$  secara rata-rata tampak stabil, berat mutlak individu di area terdampak sangat rendah ( $\pm 2.5$  g). Kondisi ini mengarah pada fenomena stunting atau pengkerdilan ukuran. Biota yang terpapar polusi tambang secara terus-menerus cenderung memiliki ukuran tubuh maksimal yang lebih kecil sebagai bentuk adaptasi untuk menekan kebutuhan energi di habitat yang marjinal (Purnama et al., 2025).

Resiliensi ini bersifat semu karena hanya mencerminkan individu yang "mampu bertahan," sementara individu yang lemah kemungkinan besar sudah mati dan tidak terwakili dalam sampel. Tingginya nilai  $K_n$  di area terdampak bisa jadi merupakan hasil dari kompetisi yang rendah akibat densitas populasi yang juga rendah, sehingga individu yang tersisa mendapatkan akses lebih banyak terhadap sumber daya makanan yang terbatas namun tercemar. Gejala stunting ini memiliki implikasi reproduksi yang serius. Biota dengan ukuran tubuh yang kecil biasanya memiliki fekunditas (jumlah telur) yang lebih rendah dibandingkan individu normal. Dengan demikian, meskipun secara fisiologis ( $K_n$ ) mereka terlihat "sehat," kapasitas mereka untuk mempertahankan populasi di masa depan sangatlah lemah. Hal ini memperkuat teori bahwa polusi nikel memberikan tekanan seleksi yang ketat bagi komunitas bentik.

Oleh karena itu, interpretasi faktor kondisi harus diintegrasikan dengan data biometrik lainnya untuk mendapatkan kesimpulan yang akurat. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan bioindikator bentik dalam upaya

mitigasi dampak lingkungan. Perusahaan pertambangan dan otoritas lingkungan disarankan untuk menggunakan perubahan pola pertumbuhan dan faktor kondisi *T. sulcata* sebagai parameter evaluasi kesehatan ekosistem pesisir secara berkala (Alongi, 2008; Purnama et al., 2024).

## Pernyataan Keterbatasan Penelitian

Meskipun memberikan data yang komprehensif, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dicatat untuk studi mendatang. Pertama, durasi pengamatan selama satu tahun (Januari 2024–Januari 2025) belum mampu menangkap fluktuasi jangka panjang yang mungkin dipengaruhi oleh siklus iklim inter-annual seperti El Niño atau La Niña yang memengaruhi pola limpasan sedimen. Kedua, penelitian ini belum melakukan analisis bioakumulasi logam nikel secara langsung pada jaringan lunak (*soft tissue*) biota. Ketiga, keterbatasan metode pengukuran yang hanya berfokus pada morfometri cangkang belum mencakup analisis histopatologi yang dapat mendeteksi kerusakan organ dalam secara mikroskopis. Studi selanjutnya disarankan untuk menggabungkan data biometrik dengan analisis kandungan logam berat dalam sedimen dan jaringan tubuh biota guna memperkuat bukti mekanisme toksisitas nikel secara internal. Namun, temuan saat ini tetap memberikan landasan ilmiah yang kuat bagi kebijakan pengelolaan pesisir di kawasan industri nikel Sulawesi Tenggara.

## Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa aktivitas pertambangan nikel di kawasan Pomalaa secara signifikan memengaruhi dinamika populasi *Terebralia sulcata*, yang tercermin dari perubahan parameter biologis dan strukturalnya. Struktur ukuran populasi menunjukkan distribusi unimodal yang didominasi oleh individu dewasa pada rentang 35–45 mm, namun dengan jumlah rekrutmen juvenil yang sangat terbatas di zona terdampak. Hal ini mengindikasikan adanya hambatan pada siklus regenerasi populasi akibat tekanan lingkungan eksternal.

Secara morfometrik, pola pertumbuhan di seluruh lokasi penelitian bersifat alometrik

negatif ( $b = 2.02$ ), yang memberikan bukti empiris bahwa penambahan panjang cangkang terjadi lebih cepat dibandingkan penambahan bobot tubuh. Fenomena ini diinterpretasikan sebagai respons adaptif biota di mana energi dialokasikan lebih besar untuk pertumbuhan struktur pelindung (cangkang) dibandingkan massa jaringan lunak dalam menghadapi stres lingkungan. Meskipun nilai faktor kondisi ( $K_n = 1.124$ ) menunjukkan status fisiologis yang relatif stabil, tren penurunan kepadatan individu, rata-rata panjang, dan berat yang signifikan pada stasiun yang terpapar limbah nikel menegaskan adanya degradasi kualitas habitat.

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam literatur ekologi pesisir dengan menetapkan *T. sulcata* sebagai bioindikator spesifik yang sensitif terhadap polutan nikel. Penentuan nilai ambang batas pertumbuhan ( $b < 3$ ) dan faktor kondisi dalam studi ini menyediakan basis data kuantitatif baru yang dapat digunakan dalam menyusun indeks kesehatan ekosistem mangrove di kawasan industri pertambangan. Temuan ini menegaskan bahwa pemantauan bioindikator gastropoda harus diintegrasikan secara eksplisit dalam protokol mitigasi dampak lingkungan dan kebijakan manajemen pesisir di zona industri nikel untuk menjamin keberlanjutan fungsi ekologis bentos.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Halu Oleo (FPIK UHO) atas dukungan fasilitas selama penelitian ini berlangsung. Apresiasi dan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada Tim Riset Moluska (Gastropoda) FPIK UHO atas kerja keras, dedikasi, dan bantuan teknisnya yang luar biasa, baik selama pengambilan sampel di lapangan yang penuh tantangan di kawasan Pomalaa maupun selama proses analisis laboratorium. Penulis juga berterima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi pemikiran dan dukungan moril sehingga karya ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik.

### Referensi

- Alfaro, A. C. (2006). Benthic macro-invertebrate community composition within a mangrove/seagrass estuary in northern New Zealand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66(1-2), 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.07.024>
- Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- Blackwell, B. G., Brown, M. L., & Willis, D. W. (2000). Relative weight ( $W_r$ ) status and current use in fisheries assessment and management. *Reviews in Fisheries Science*, 8(1), 1–44. <https://doi.org/10.1080/10641260091129161>
- Budiman, A. (1988). Some aspects on the ecology of mangrove whelk *Telescopium telescopium* (Linne, 1758) (Mollusca, Gastropoda: Potamididae). *Treubia*, 29(4), 237–245. <https://doi.org/10.14203/treubia.v29i4.1545>
- Cannicci, S., Burrows, D., Fratini, S., Smith III, T. J., Offenberg, J., & Dahdouh-Guebas, F. (2008). Faunal impact on vegetation structure and ecosystem function in mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.01.009>
- Degamon, L. S., Eviota, M. P., Hugo, R. L., Bertulfo, R. E., Odtojan, M. M., Buenafior, G. S., & Cuadrado, J. T. (2023). Length–weight relationship of bivalves and gastropods from mangrove forest of Brgy. Nabago, Surigao City, Philippines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1250(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1250/1/012003>
- Duke, N. C., Mackenzie, J. R., Canning, A. D., Hutley, L. B., Bourke, A. J., Kovacs, J. M., & Ai, E. (2022). ENSO-driven extreme oscillations in mean sea level destabilise critical shoreline mangroves: An emerging threat. *PLoS Climate*, 1(8), e0000037.

- <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000037>
- Efrianto, E., Chaerul, M., Marzuki, I., Desi, N., Mahmud, M., & Dirman, E. N. (2026). The impact of nickel mining activities on watershed hydrology and coastal sedimentation. *Journal La Lifesci*, 7(1), 57–68.  
<https://doi.org/10.37899/journallalifesci.v7i1.3059>
- English, S., Wilkinson, C., & Baker, V. (1997). *Survey manual for tropical marine resources*. Australian Institute of Marine Science.
- Fratini, S., Vigiani, V., Vannini, M., & Cannicci, S. (2004). *Terebralia palustris* (Gastropoda; Potamididae) in a Kenyan mangal: Size structure, distribution and impact on the consumption of leaf litter. *Marine Biology*, 144(6), 1173–1182.  
<https://doi.org/10.1007/s00227-003-1282-6>
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight–length relationships: History, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22(4), 241–253. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>
- Froese, R., & Pauly, D. (2025). *FishBase/SeaLifeBase: Growth and condition factors in polluted environments*. World Wide Web electronic publication.
- Hamli, H., Kamal, A. H. M., Idris, M. H., Gerusu, G. J., Ismail, J., & Abualreesh, M. H. (2021). Bivalves (Mollusca: Bivalvia) in Malaysian Borneo: Status and threats. *Journal of Threatened Taxa*, 13(11), 19553–19565.  
<https://doi.org/10.11609/jott.7287.13.11.19553-19565>
- 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.
- Ilham, I., et al. (2017). Metal distribution at river water of mining and nickel industrial area in Pomalaa, Southeast Sulawesi Province, Indonesia. *Oriental Journal of Chemistry*, 33(5), 2541–2548.  
<https://doi.org/10.13005/ojc/330557>
- Le Cren, E. D. (1951). The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*). *The Journal of Animal Ecology*, 20(2), 201–219.  
<https://doi.org/10.2307/1540>
- Lee, S. Y. (1999). Tropical mangrove ecology: Physical and biotic factors influencing ecosystem structure and function. *Australian Journal of Ecology*, 24(4), 355–366. <https://doi.org/10.1046/j.1442-9993.1999.00984.x>
- Lee, S. Y., Primavera, J. H., Dahdouh-Guebas, F., McKee, K., Bosire, J. O., Cannicci, S., & Record, S. (2014). Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: A reassessment. *Global Ecology and Biogeography*, 23(7), 726–743.  
<https://doi.org/10.1111/geb.12155>
- Malik, A., Fensholt, R., & Mertz, O. (2015). Economic valuation of mangroves for comparison with commercial aquaculture in South Sulawesi, Indonesia. *Forests*, 6(9), 3028–3044.  
<https://doi.org/10.3390/f6093028>
- Menon, M., Mohanraj, R., & 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.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117027>
- Musrin, N. D., Tosepu, R., Rachman, R. M., Zainuddin, A., Kete, S. C. R., & Surya, R. A. (2025). Microplastic contamination and exposure in gastropods: A literature review. *Journal of Epidemiology and Health Science*, 2(3), 132–138.  
<https://doi.org/10.36685/jehs.v2i3.1690>
- Pambudi, P. A. (2025). The paradox of nickel investment in Indonesia. *Environmental Pollution Journal*, 5(3), 299–319.  
<https://doi.org/10.58954/epj.v5i3.339>
- Purnama, M. F., Prayitno, S. B., Muskananfolo, M. R., & Suryanti, S. (2024). Ecological indices of mangrove gastropods community in nickel mining impacted area of Pomalaa, Southeast Sulawesi. *Biotropia*, 31(3), 359–371.

- <https://doi.org/10.11598/btb.2024.31.3.2267>
- Purnama, M. F., Prayitno, S. B., Muskananfolo, M. R., & Suryanti, S. (2025a). Existing condition of gastropods community in coastal areas affected by nickel overburden in Pomalaa District, Southeast Sulawesi Province, Indonesia. *Biotropia*, 32(1), 69–86. <https://doi.org/10.11598/btb.2025.32.1.2416>
- Purnama, M. F., Prayitno, S. B., & Muskananfolo, M. R. (2025b). Population densities of *Faunus ater* and *Terebralia sulcata* in areas affected by nickel mining overburden and reference site in the mangrove ecosystem of Pomalaa, Southeast Sulawesi. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 30(3), 473–482. <https://doi.org/10.18343/jipi.30.3.473>
- Rizal, A., Sahidin, A., & Herawati, H. (2018). Economic value estimation of mangrove ecosystems in Indonesia. *Biodiversity International Journal*, 2(1), 98–100. <https://doi.org/10.15406/bij.2018.02.00051>
- Samsi, A. N., & Rusmidin, R. (2024). Size structure and growth of snail *Terebralia palustris* in mangrove ecosystem on Pannikiang Island. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(11), 9027–9032. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i11.8851>
- Sefali, S., Ruby, R., Dimple, D., & Giri, A. (2026). Toxicological implications of emerging pollutants on aquatic organisms. *Discover Environment*, 4(1), 43. <https://doi.org/10.1007/s44274-026-00557-y>
- Taslima, K., Al-Emran, M., Rahman, M. S., Hasan, J., Ferdous, Z., Rohani, M. F., & Shahjahan, M. (2022). Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish: A review. *Toxicology Reports*, 9, 858–868. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.04.013>
- Yee-Duarte, J. A., Arellano-Martínez, M., Roldán-Wong, N. T., Kidd, K. A., & Ceballos-Vázquez, B. P. (2024). Reduction in reproductive activity from degeneration of testicular follicles in *Megapitaria squalida* (Mollusca: Bivalvia) exposed to metal pollution in the Gulf of California. *Marine Pollution Bulletin*, 205, 116648. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116648>
- Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., & Jiang, G. (2008). Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, 606(2), 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.11.018>