

Indeks Kondisi dan *Stress On Stress* Kerang Hijau (*Perna viridis*) sebagai *Biomarker* Sederhana Pencemaran Logam Cd di Pesisir Kabupaten Pangkep

(*Condition Index and Stress On Stress of Green Mussels (*Perna viridis*) as Simple Biomarkers for Cd Metal
Pollution on the Coast of Pangkep Regency*)

Arnold Kabangnga^{1*}, Nursyahrani², Andi Ugi Asminingrum³, Ika Eviyanti Ugraha³

¹Program Studi Pemanfaatan Sumberdaya Perairan, Institut Teknologi dan Bisnis Maritim Balik Diwa

²Program Studi Budidaya Perairan, Institut Teknologi dan Bisnis Maritim Balik Diwa

³Program Studi Ilmu Kelautan, Institut Teknologi dan Bisnis Maritim Balik Diwa

*Corresponding author: arnold@itbm.ac.id

ABSTRACT

Environmental biomonitoring serves as an early detection system for the presence of hazardous pollutant exposure, based on the biological responses of organisms, and provides an overview of environmental impacts on these organisms. The aim of this study was to assess the condition index in relation to the bioavailability index of metal content in green mussels (*Perna viridis*) and their stress on stress (SoS) response. This research was conducted from July to August 2023. Green mussels were collected from two different locations: Maccini Baji waters, with a total of 100 specimens, and Mandalle waters, also with 100 specimens, with an average shell length of 4.9–6.1 cm. The mussels were then exposed under non-submersed conditions at room temperature. For the determination of the Condition Index (CI) and the bioavailability index of the mussels, morphometric measurements were conducted, including shell length, height, width, internal shell volume, and dry weight. The cadmium (Cd) content in the muscle tissue was analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results indicated that the SOS response of mussels from Maccini Baji waters was higher, with a Cd content of 0.16 µg/g, compared to the SOS response of mussels from Mandalle waters, which was lower with a Cd content of 0.15 µg/g. The correlation between the Condition Index (CI) and the Bioavailability Index of Metal Content in Mussels (BIMCM) from both locations showed a positive and strong correlation, indicating that the waters of Maccini Baji and Mandalle could be categorized as within tolerance limits or mildly polluted.

Keywords: Biomarker, Condition index, Green mussel, Stress on stress

ABSTRAK

Biomonitoring lingkungan sebagai bentuk deteksi dini adanya paparan polutan berbahaya yang didasarkan pada respons biologis organisme dan menjadi gambaran tentang dampak lingkungan terhadap organisme. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui indeks kondisi terhadap *bioavailability index* (indeks ketersediaan hayati) kandungan logam kerang dan *stress on stress* (SoS) kerang hijau (*Perna viridis*). Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli hingga Agustus 2023. Kerang hijau dikumpulkan dari dua lokasi berbeda yaitu: Perairan Maccini Baji sebanyak 100 ekor dan Perairan Mandalle sebanyak 100 ekor dengan rata-rata ukuran panjang 4,9 – 6,1 cm. Selanjutnya dilakukan pemaparan kerang tanpa media air pada kondisi suhu ruang. Untuk keperluan penentuan Indeks Kondisi (IK) dan indeks ketersediaan hayati kerang dilakukan pengukuran morfometri yaitu panjang, tinggi, lebar, volume internal cangkang dan bobot keringnya. Analisis kandungan logam kadmium di dalam daging kerang menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Hasil penelitian menunjukkan SOS kerang yang berasal dari perairan Maccini Baji lebih tinggi dengan kandungan logam Cd 0,16 µg/g dibandingkan SOS kerang dari perairan Mandalle yang lebih rendah dengan logam Cd 0,15 µg/g. Korelasi antara indeks kondisi (IK) dan Indeks Bioavailabilitas Logam Kerang (IBLK) dari dua lokasi menunjukkan korelasi positif dan kuat sehingga perairan Maccini Baji dan Mandalle dapat dikategorikan dalam batas toleransi atau tercemar ringan.

Kata Kunci: Biomarker, Indeks kondisi, Kerang hijau, *Stress on stress*

1. Pendahuluan

Aktivitas antropogenik manusia dalam upaya pemenuhan segala kebutuhan senantiasa menghadirkan dua sisi yang berbeda yaitu pemenuhan kebutuhan ekonomi dan degradasi lingkungan. Sejatinya aktivitas tersebut berada dalam koridor beriringan yang disebut sebagai pembangunan berkelanjutan. Degradasi khususnya lingkungan perairan akibat kegiatan antropogenik merujuk pada terganggunya ekosistem memengaruhi kualitas air dan keanekaragaman hayati, yang pada akhirnya berdampak pada keseimbangan ekosistem dan kesehatan manusia pada tingkatan akhir [10, 23].

Dampak lingkungan akibat kegiatan antropogenik memerlukan perhatian dan tindakan mitigasi untuk memastikan perlindungan ekosistem dalam koridor pembangunan berkelanjutan. Pemantauan lingkungan selama ini masih didominasi teknik yang mengandalkan pendekatan klasik berbasis pada informasi konsentrasi bahan-bahan kimia yang ada di lingkungan hal ini tidak memberikan informasi efek yang ditimbulkan oleh bahan-bahan kimia atau stresor lingkungan secara langsung.

Biomonitoring merupakan suatu pendekatan yang digunakan untuk mengevaluasi kesehatan lingkungan dan memantau dampak bahan pencemar atau perubahan ekosistem melalui pengukuran respons biologis pada organisme. Salah satu metode yang populer dalam *biomonitoring* adalah penggunaan *biomarker* sederhana. *Biomarker* sederhana adalah alat yang efektif untuk mengukur dampak polutan atau perubahan kondisi lingkungan pada organisme [14].

Beberapa penelitian telah menunjukkan bagaimana *biomarker* sederhana digunakan untuk memantau kesehatan ekosistem. Penggunaan aktivitas enzim sebagai *biomarker* dalam ikan telah terbukti efektif untuk mendeteksi stres akibat polusi logam berat di perairan [9, 11]. Selain itu, studi tentang kerang juga menunjukkan bagaimana indeks kondisi (IK) dapat digunakan untuk menilai dampak pencemaran pada kesehatan organisme akuatik [5, 15].

Penggunaan *biomarker* sederhana baik di laboratorium maupun di lapangan secara

berkelanjutan akan menghasilkan data yang dapat digunakan untuk mengevaluasi dan memvalidasi data *biomarker* sederhana. Selanjutnya data *biomarker* sederhana dapat digabungkan dengan data lingkungan yang lain untuk menghasilkan suatu kebijakan dalam menata suatu ekosistem.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi indeks kondisi terhadap *bioavailability index* (indeks ketersediaan hayati) kandungan logam kerang dan *stress on stress* kerang hijau (*Perna viridis*).

2. Metode Penelitian

2.1. Materi Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: *digital caliper* untuk pengukuran morfometri kerang hijau, Pisau bedah untuk memisahkan daging dari cangkang, Timbangan Ohaus (0,0001) untuk penimbangan kerang, *cool box* untuk wadah sampel kerang.

Bahan yang digunakan yaitu kerang hijau (*Perna viridis*) sebagai sampel, aluminium foil, dan plastik sampel.

2.2. Prosedur Penelitian

Pengambilan Sampel

Kerang hijau (*Perna viridis*) dikumpulkan dari perairan Desa Maccini Baji dan Desa Mandalle Kabupaten Pangkep. Sampel Kerang yang telah dikumpulkan, kemudian dimasukkan ke dalam dengan *cool box*. Sampel dibawa ke laboratorium tanpa diberikan air sebagai media hidup (kerang hijau dapat hidup di udara lebih dari 24 jam).

Penyiapan Sampel

Sampel diseleksi sebanyak 100 ekor dari tiap lokasi sesuai ukuran yang dibutuhkan dan dibersihkan dari organisme pengotor. Parameter morfometri seperti bobot, panjang, tinggi dan lebar cangkang diukur. Bobot ditimbang dengan timbangan dengan tingkat ketelitian 0,01 g. Panjang, tinggi dan lebar diukur dengan kaliper digital dengan standar terkecil 1 mm. Daging dan cangkang ditimbang bobot basah secara terpisah sebelum dibungkus dengan foil aluminium. Setelah itu daging dan cangkang dikeringkan

dengan menggunakan oven dengan suhu 80°C selama 24 jam. Setelah kering, daging dan cangkang ditimbang. Selanjutnya analisis logam kadmium (CD) di dalam daging kerang dilakukan dengan menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*).

Indeks Bioavailabilitas Logam dalam Kerang (IBLK)

IBLK dihitung dengan formula yaitu konsentrasi logam daging (mg/kg) dikalikan Bobot daging kering (g) dibagi dengan Bobot cangkang kering.

2.3. Variabel yang Diamati

Stress on Stress (SoS)

Pengujian *Stress on Stress* (SoS), kerang hijau akan ditempatkan pada kondisi suhu ruangan selama 2 × 24 jam untuk melihat tingkat kematian kerang [18]. Kerang diletakkan secara terpisah di atas aluminium foil yang telah diberi tanda berupa nomor. Kerang kemudian diamati tiap 30 menit sekali untuk melihat tingkat kematian kerang. Kerang yang telah mati dicatat, lalu posisi kerang diubah berurutan sesuai dengan waktu kematian kerang. Kerang yang telah mati ditandai dengan cangkang kerang yang terbuka kemudian tidak merespons saat cangkangnya ditekan.

Indeks Kondisi (IK)

Indeks kondisi (IK) pada kerrang hijau (*Perna viridis*) dihitung menggunakan formula 1 sampai 4 berdasarkan Lundebye *et al.* [16] dan Freeman [7].

$$IK\ 1 = \frac{\text{Bobot daging kering (g)}}{\text{Volume internal cangkang}} \times 100 \quad (1)$$

$$IK\ 2 = \frac{\text{Bobot daging kering (g)}}{\text{Kapasitas internal cangkang}} \times 100 \quad (2)$$

$$IK\ 3 = \frac{\text{Bobot daging kering (g)}}{(\text{Panjang} \times \text{Lebar}) / \text{Tinggi cangkang}} \quad (3)$$

$$IK\ 4 = \frac{\text{Bobot daging kering (g)}}{(1000 / \text{Panjang cangkang})} \quad (4)$$

$$IK\ 5 = \frac{\text{Bobot daging kering (g)}}{\text{Bobot kering cangkang}} \times 100 \quad (5)$$

2.4. Analisis Data

Stress on Stress dilakukan uji perbandingan *survival* (LT₅₀) antara kerang yang berasal dari perairan Mandalle dan perairan Maccini Baji. LT₅₀ diukur dengan menggunakan uji Kaplan-Meier yaitu mengukur 50 % populasi yang mati pada periode waktu yang ditentukan. Kurva Kaplan-Meier ditampilkan dengan perangkat lunak *Graphpad Prism*.

Korelasi antara IBLK dan IK dianalisis dengan menggunakan korelasi Pearson (*one tail*). Kekuatan koefisien korelasi dianalisis berdasarkan kisaran Tabel 1.

Tabel 1. Kekuatan koefisien korelasi antara IBLK dan IK berdasarkan kisaran .

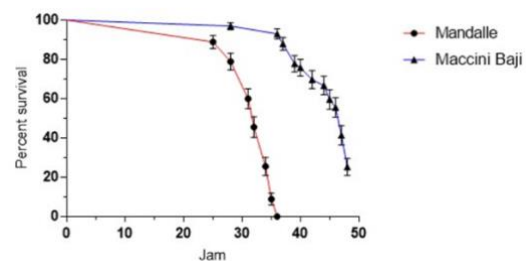
Nilai koefisien R (positif atau negatif)	Makna korelasi
0,00 – 0,19	Sangat lemah
0,20 – 0,39	Lemah
0,40 – 0,69	Sedang
0,70 – 0,89	Kuat
0,90 – 1,00	Sangat kuat

Sumber: Fowler *et al.* [6]

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. *Stress on Stress (SoS)*

Gambar 1 menunjukkan bahwa kerang hijau dari perairan Desa Maccini Baji memiliki tingkat kelangsungan hidup yang lebih lama dari waktu 48 jam yang telah ditentukan. Sementara kerang hijau pada perairan Desa Mandalle yang awalnya sebagai daerah perairan yang dinilai minim sumber polutan menunjukkan tingkat kelangsungan hidup yang lebih rendah.



Gambar 1. Kurva *survival* kerang (LT₅₀ Kaplan-Meier *test*) berdasarkan pengujian *Stress on Stress* kerang hijau (*Perna viridis*).

Hal ini diduga bahwa kerang yang bersumber dari perairan Maccini baji berada dalam kondisi hemostasis adaptif akibat tekanan untuk bertahan hidup. Stres pada kerang juga dapat menginduksi perubahan metabolik adaptif, seperti peningkatan metabolisme energi dalam menghadapi stres fisik atau lingkungan [13]. Kerang dalam kondisi stres yang berulang atau kronis, seperti *stress on stress*, dapat meningkatkan aktivitas *metallothionein* secara signifikan sebagai respons adaptif. Namun, jika paparan stres terus berlanjut, kemampuan *metallothionein* untuk mempertahankan hemostasis dapat berkurang [3, 4, 8, 19].

3.2. Indeks Kondisi

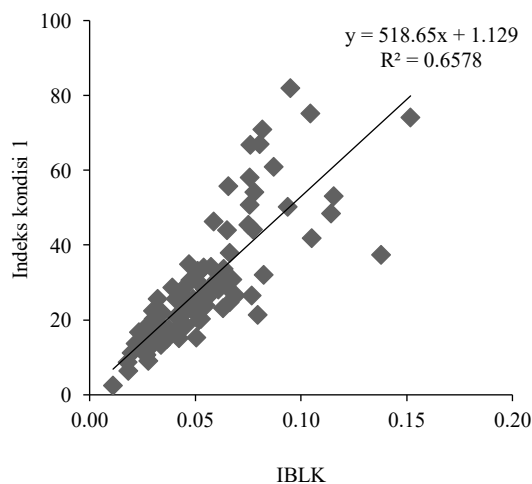
Hasil analisis kandungan logam kadmium dengan AAS dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan logam kadmium dengan AAS

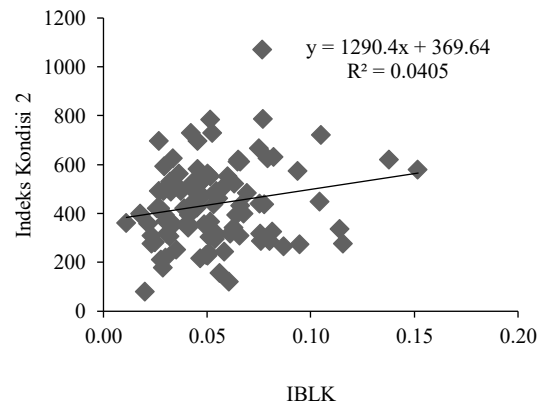
Sumber sampel	Kadar kadmium ($\mu\text{g/g}$)	SNI* (mg/kg)
Mandalle	0,15	1,0
Maccini Baji	0,16	

Keterangan: *Acuan baku mutu logam [1]

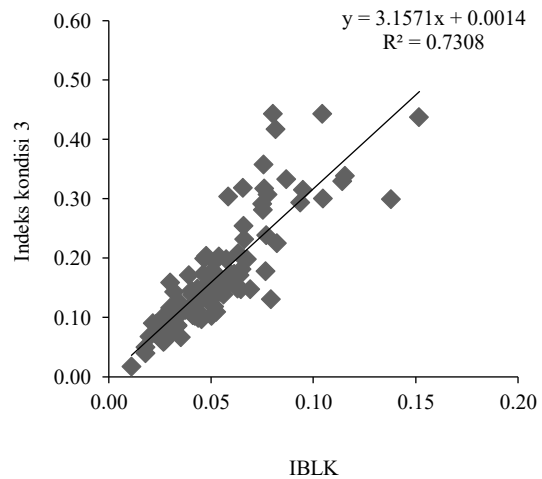
Selanjutnya untuk melihat hubungan antara IK kerang dan IBLK di perairan Maccini Baji dilihat pada Gambar 2, sampai dengan Gambar 6.



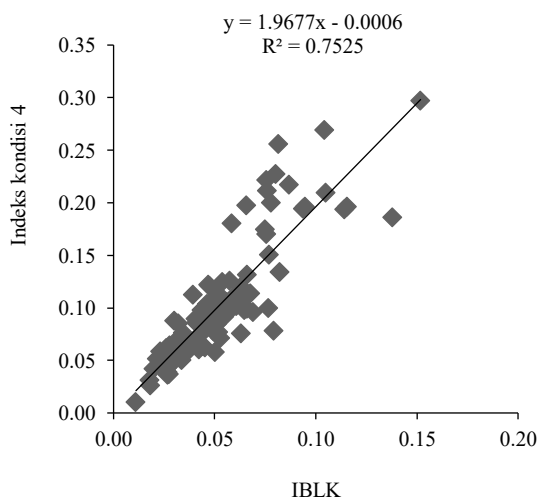
Gambar 2. Korelasi antara IK 1 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Maccini Baji



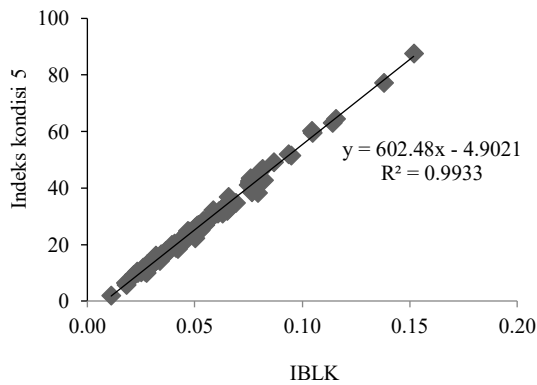
Gambar 3. Korelasi antara IK 2 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Maccini Baji



Gambar 4. Korelasi antara IK 3 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Maccini Baji



Gambar 5. Korelasi antara IK 4 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Maccini Baji



Gambar 6. Korelasi antara IK 5 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Maccini Baji

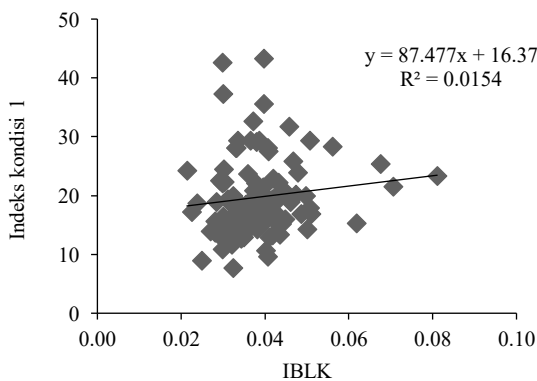
Tabel 3. Korelasi antara IK dan IBLK *Perna viridis* dari perairan Maccini Baji.

Indeks Kondisi	r	Kekuatan Korelasi dan IBLK
1	0,8111	Kuat
2	0,2011	Lemah
3	0,8549	Kuat
4	0,8675	Kuat
5	0,9967	Sangat kuat

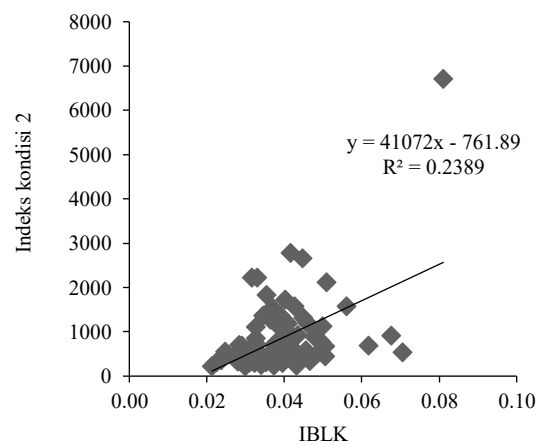
Keterangan: r = koefisien korelasi; IBLK = Indeks Bioavailabilitas Logam Kerang

Tabel 3. Menunjukkan bahwa korelasi IK 1, 3, dan 4 kerang hijau (*Perna viridis*) IBLK di perairan Maccini Baji tergolong kuat, Indeks kondisi 2 tergolong lemah. IK 5 berkorelasi sangat kuat yaitu di antara dua variabel IK dan IBLK menunjukkan korelasi positif.

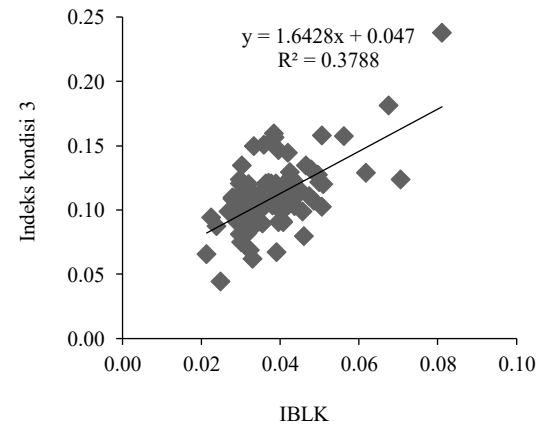
Hubungan antara IK kerang dan IBLK di perairan Mandalle dilihat pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 11.



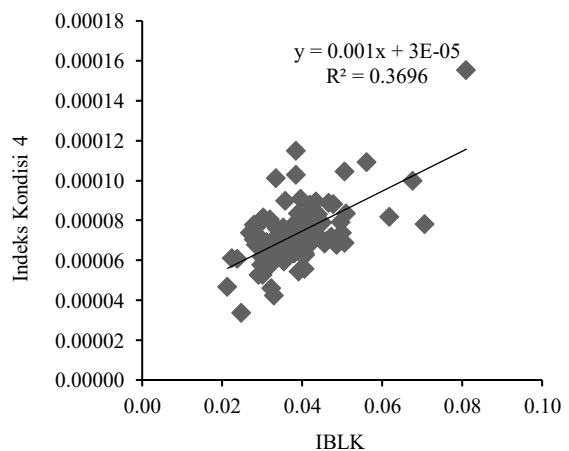
Gambar 7. Korelasi antara IK 1 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Mandalle.



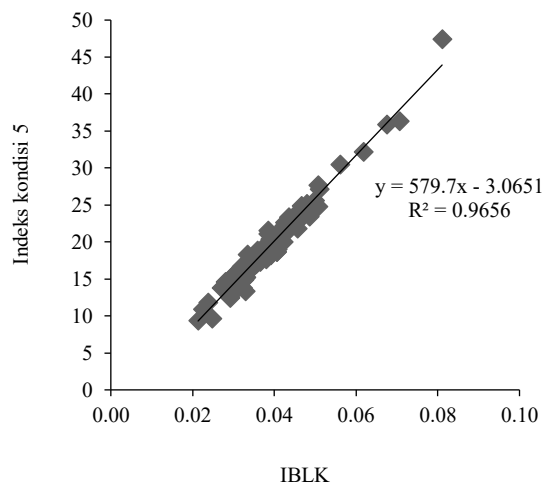
Gambar 8. Korelasi antara IK 2 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Mandalle.



Gambar 9. Korelasi antara IK 3 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Mandalle.



Gambar 10. Korelasi antara IK 4 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Mandalle.



Gambar 11. Korelasi antara IK 5 dan IBLK kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Mandalle.

Tabel 4. Korelasi antara IK dan IBLK *Perna viridis* yang bersumber dari perairan Mandalle.

Indeks Kondisi	r	Kekuatan Korelasi dan IBLK
1	0,1242	Sangat lemah
2	0,4888	Sedang
3	0,6155	Sedang
4	0,6080	Sedang
5	0,9826	Sangat kuat

Keterangan: r = koefisien korelasi; IBLK = Indeks Bioavailabilitas Logam Kerang

Tabel 4. menunjukkan bahwa korelasi IK 1 kerang hijau (*Perna viridis*) IBLK di perairan Mandalle sangat lemah, Indeks kondisi 2, 3, dan 4 memiliki hubungan sedang. IK 5 berkorelasi sangat kuat yaitu di antara dua variabel di atas indeks kondisi dan *bioavailabilitas* menunjukkan korelasi positif.

Hubungan IK dan IBLK menggambarkan tingkat kondisi perairan di mana kerang hidup [12, 21]. Yaqin *et al.* [25] menghipotesiskan bahwa jika hubungan indeks kondisi kerang dan logam tergolong kuat dan berbanding lurus, maka perairan di mana kerang hidup tidak tercemar. Penurunan IK dalam populasi kerang di lokasi yang berbeda dapat menunjukkan tingkat pencemaran lingkungan yang bervariasi, yang sangat membantu dalam pengelolaan lingkungan dan perlindungan ekosistem [17].

Meskipun korelasi negatif lebih umum, dalam beberapa kasus dengan paparan logam, IK dan IBLK dapat juga menunjukkan korelasi positif. Namun, hubungan ini bersifat terbatas dan hanya berlaku pada paparan logam yang mendukung fungsi metabolik tanpa menyebabkan toksisitas [20]. Penggunaan lima formula indeks kondisi dalam penelitian ini menunjukkan korelasi yang positif dan cenderung kuat sampai sangat kuat untuk kedua lokasi yaitu perairan Maccini Baji dan perairan Mandalle. Hasil analisis *AAS* terhadap logam kadmium (Cd) juga menunjukkan bahwa konsentrasi logam dalam kerang masih di bawah ambang batas. Namun demikian hubungan korelasi tidak meniscayakan hubungan sebab akibat, walaupun hubungan korelasi itu dapat digunakan sebagai indikasi adanya keterkaitan antara satu variabel dengan variabel yang lain.

Aktivitas *biomonitoring* lingkungan di mana korelasi antara IK dan IBLK memberikan pemahaman penting tentang kondisi kesehatan kerang di bawah paparan logam berat. Penurunan IK seiring dengan peningkatan IBLK dapat menunjukkan bahwa logam-logam tersebut sangat *bioavailable* dan berpotensi toksik di lingkungan tersebut. Korelasi ini memudahkan deteksi cepat efek lingkungan yang merugikan terhadap populasi kerang [2].

Ketika IBLK meningkat, terutama dengan akumulasi logam berat seperti kadmium dan tembaga, kerang harus mengalokasikan energi untuk detoksifikasi dan mengatasi stres, daripada untuk pertumbuhan dan pemeliharaan jaringan. Hal ini menyebabkan penurunan simpanan energi yang secara negatif mempengaruhi IK. Hubungan ini menjadikan IK sebagai indikator yang berguna untuk memahami dampak *bioavailabilitas* logam terhadap kesehatan kerang secara keseluruhan [2, 22, 24]. Sebagaimana yang dijelaskan di latar belakang penelitian ini bahwa diperlukan studi penggunaan *biomarker* sederhana baik di laboratorium maupun di lapangan secara berkelanjutan untuk bisa menghasilkan data yang dapat digunakan untuk mengevaluasi dan memvalidasi data *biomarker* sederhana sehingga dapat menghasilkan teknik *biomarker* sederhana dan sensitif terhadap berbagai jenis tekanan lingkungan yang ada.

4. Kesimpulan

Kerang hijau (*Perna viridis*) yang dianalisis melalui *Stress on Stress* dan IK dengan klasifikasi tidak tercemar. Kandungan kadmium daging kerang berkonsentrasi rendah dan tergolong aman di bawah ambang batas Badan Standar Nasional Indonesia.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada masyarakat Mandalle dan Maccini Baji yang membantu dalam pengumpulan kerang sesuai perlakuan penelitian yang diperlukan.

Daftar Pustaka

- [1] Badan Standarisasi Nasional Indonesia 2009. *Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Pangan*. https://sertifikasibbia.com/upload/logam_berat.pdf.
- [2] Chandurvelan, R., Marsden, I.D., Glover, C.N. dan Gaw, S. 2015. Assessment of a mussel as a metal bioindicator of coastal contamination: relationships between metal bioaccumulation and multiple biomarker responses. *Science of the Total Environment*. 511, (2015), 663–675.
- [3] Ekelund Ugge, G.M.O., Sahlin, U., Jonsson, A. dan Berglund, O. 2023. Transcriptional responses as biomarkers of general toxicity: A systematic review and meta-analysis on metal-exposed bivalves. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 42, 3 (2023), 628–641. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5494>.
- [4] Fabrin, T.M.C., Diamante, N.A., Mota, T.F.M., Ghisi, N. de C., Prioli, S.M.A.P. dan Prioli, A.J. 2018. Performance of biomarkers metallothionein and ethoxyresorufin O-deethylase in aquatic environments: A meta-analytic approach. *Chemosphere*. 205, August (2018), 339–349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.069>.
- [5] Filgueira, R., Comeau, L.A., Landry, T., Grant, J., Guyondet, T. dan Mallet, A. 2013. Bivalve condition index as an indicator of aquaculture intensity: a meta-analysis. *Ecological indicators*. 25, (2013), 215–229.
- [6] Fowler, J., Cohen, L. dan Jarvis, P. 2013. *Practical Statistics for Field Biology*. John Wiley & Sons.
- [7] Freeman, K.R. 1974. Growth, mortality and seasonal cycle of *Mytilus edulis* in two Nova Scotian embayments. *Departament of the Environment, Fisheries and Marine Service, Canada, Technical Report N*. Dalhousie University Halifax, NS, Canada.
- [8] Ge, D., Zhang, L., Long, Z., Chi, C. dan Liu, H. 2020. A novel biomarker for marine environmental pollution: A metallothionein from *Mytilus coruscus*. *Aquaculture Reports*. 17, July (2020), 100364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100364>.
- [9] Georgieva, E., Velcheva, I., Yancheva, V., Stoyanova, S., Vasileva, T., Bivolarski, V., Todorova, B. dan Iliev, I. 2021. A review on multi-biomarkers in fish for the assessment of aquatic ecosystem contamination with organic pollutants. *Ecologia Balkanica*. 13, 2 (2021), 321–330.
- [10] Han, G. dan Liu, X. 2024. Environmental effects of natural processes and human activities on the water environment in watershed. *Water (Switzerland)*. 16, 20 (2024), 2929. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16202929>.
- [11] Hedayati, A. 2018. Fish biomarkers, suitable tools for water quality monitoring. *International Journal of Veterinary and Animal Research*. 1, 3 (2018), 63–69.
- [12] Ismail, A. dan Yap, C.K. 1999. The relationship of heavy metals and condition indices of green-lipped mussel *Perna viridis* from contaminated and uncontaminated environments. *Malaysian Science and Technology Congress 1999* (Kuala Lumpur, 1999).
- [13] Lannig, G., Eilers, S., Pörtner, H.O., Sokolova, I.M. dan Bock, C. 2010.

- Impact of ocean acidification on energy metabolism of oyster, *Crassostrea gigas* - Changes in metabolic pathways and thermal response. *Marine Drugs*. 8, 8 (2010), 2318–2339. DOI: <https://doi.org/10.3390/md8082318>.
- [14] Lionetto, M.G., Caricato, R. dan Giordano, M.E. 2019. Pollution biomarkers in environmental and human biomonitoring. *The Open Biomarkers Journal*. 9, 1 (2019), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2174/1875318301909010001>.
- [15] Lucas, A. dan Beninger, P.G. 1985. The use of physiological condition indices in marine bivalve aquaculture. *Aquaculture*. 44, 3 (1985), 187–200.
- [16] Lundebye, A.K., Langston, W.J. dan Depledge, M.H. 1997. Stress proteins and condition index as biomarkers of tributyltin exposure and effect in mussels. *Ecotoxicology*. 6, 3 (1997), 127–136. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1018662324296>.
- [17] Marigómez, I., Garmendia, L., Soto, M., Orbea, A., Izagirre, U. dan Cajarville, M.P. 2013. Marine ecosystem health status assessment through integrative biomarker indices: A comparative study after the Prestige oil spill “Mussel Watch.” *Ecotoxicology*. 22, 3 (2013), 486–505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-013-1042-4>.
- [18] Martínez-Gómez, C., Robinson, C.D., Burgeot, T., Gubbins, M., Halldorsson, H.P., Albentosa, M., Bignell, J.P., Hylland, K. dan Vethaak, A.D. 2017. Biomarkers of general stress in mussels as common indicators for marine biomonitoring programmes in Europe: The ICON experience. *Marine Environmental Research*. 124, March (2017), 70–80.
- [19] Matin, M.T., Mashinchian, A., Sinaei, M. dan Jamili, S. 2019. Metallothionein as a biomarker of heavy metal (Cd, Cu, Zn, Pb, Hg, Ni, Cr) pollution in hermit crab (*Clibanarius signatus*). *Environment Asia*. 12, 2 (2019), 164–171. DOI: <https://doi.org/10.14456/ea>.
- 2019.38.
- [20] Mubiana, V.K., Vercauteren, K. dan Blust, R. 2006. The influence of body size, condition index and tidal exposure on the variability in metal bioaccumulation in *Mytilus edulis*. *Environmental Pollution*. 144, 1 (2006), 272–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.017>.
- [21] Pantea, E.-D., Oros, A., Roşioru, D.M. dan Roşoiu, N. 2020. Condition index of mussel *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) as a physiological indicator of heavy metals contamination. *Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Biological Sciences*. 9, 1 (2020), 20–36. DOI: <https://doi.org/10.56082/annalsarscibio.2020.1.20>.
- [22] Poynton, H.C., Robinson, W.E., Blalock, B.J. dan Hannigan, R.E. 2014. Correlation of transcriptomic responses and metal bioaccumulation in *Mytilus edulis* L. reveals early indicators of stress. *Aquatic Toxicology*. 155, (2014), 129–141.
- [23] De Santis, V., Jeppesen, E., Volta, P. dan Korkmaz, M. 2023. Impacts of human activities and climate change on freshwater fish — Volume II. *Water (Switzerland)*. 15, 23 (2023), 4166. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15234166>.
- [24] Soto, M., Ireland, M.P. dan Marigómez, I. 2000. Changes in mussel biometry on exposure to metals: implications in estimation of metal bioavailability in ‘Mussel-Watch’ programmes. *Science of The Total Environment*. 247, 2 (2000), 175–187. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00489-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00489-1).
- [25] Yaqin, K., Fachruddin, L. dan Rahim, N.F. 2015. Studi kandungan logam timbal (Pb) kerang hijau, *Perna viridis* terhadap indeks kondisinya. *Jurnal Lingkungan Indonesia*. 3, 6 (2015), 309–317.